



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MEXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y
Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Determinación de las pérdidas de transporte
de flujo en tuberías de acero al carbón
recubiertas con DLC por Triboadhesión

Presentada por

Ing. Dersein Saráoz Domínguez

Como requisito para la obtención del
grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. José María Rodríguez Lelis

Codirector de tesis

Dr. Omar Olvera Tapia

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero del 2022.



Cuernavaca, Mor., 02/febrero/2022
No. De Oficio: SAC/36/2022
Asunto: Autorización de impresión de tesis

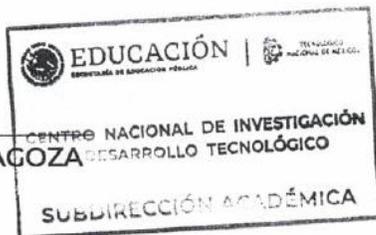
DERSEIN SARÁOZ DOMÍNGUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "DETERMINACIÓN DE LAS PERDIDAS DE TRANSPORTE DE FLUJOS EN TUBERÍAS DE ACERO AL CARBONO RECUBIERTAS CON DLC POR TRIBOADHESIÓN", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Educación Tecnológica al Servicio de México"

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares
Departamento de Comunicación y Eventos
Departamento de Recursos Materiales
CMAZ/CHG



Cuernavaca, Mor., 02/febrero/2022
No. Oficio: DIM/43/2022
Asunto: Autorización de impresión de tesis

**ING. DERSEIN SARÁOZ DOMÍNGUEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN ING. MECÁNICA
P R E S E N T E.**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **DETERMINACIÓN DE LAS PERDIDAS DE TRANSPORTE DE FLUJOS EN TUBERÍAS DE ACERO AL CARBONO RECUBIERTAS CON DLC POR TRIBOADHESIÓN** han informado, que están de acuerdo con el documento presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su documento de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"



CENTRO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO
TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA MECÁNICA


**DR. MARIO ALEJANDRO GÓMEZ JIMÉNEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

C.c.p. Depto. de Servicios Escolares Lic. Silvia Del Carmen Ortiz Fuentes
Expediente
MAGJ/RMA

DEDICATORIA

A Dios,

Por haberme dado la vida y permitido llegar hasta este momento en mi vida profesional y llevar a cabo este sueño.

Mi esposa

Por apoyarme en todo momento y estar conmigo en los momentos mas difíciles Te amo Lilia Flor.

A mi hijo Abinadab

mi fuente de inspiracion

A mis padres, Darsain y Sidney

Unos verdaderos ejemplos de esfuerzo, que no se rinden ante nada y sobre todo demuestran su apoyo y amor incondicional a sus hijos.

A mi hermano Eliel

Por el apoyo y los entrañables momentos que hemos pasado y el cariño brindado

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me otorgó para la realización de mis estudios de maestría.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico por permitirme realizar mis estudios y brindarme lo suficiente para que concluyera satisfactoriamente.

A mi director de tesis el Dr. José María Rodríguez Lelis, por tener la paciencia y la gentileza de explicar y compartir sus conocimientos conmigo.

A mi codirector Dr. Omar Olvera Tapia, y mis sinodales, Dr. José Antonio Arellano, Dr. Arturo Abundez y al Dr. José Alfredo Rodríguez por su paciencia, apoyo y comentarios para poder elaborar este trabajo.

A los catedráticos de la Academia de Ingeniería Mecánica del Cenidet: Dr. Dariusz Szwedowicz, Dr. Eladio Martínez, al Dr. Wilberth Melchor, Dr. Jorge Colín y Dra. Claudia Cortés por haberme compartido sus conocimientos durante mi estancia en dicha institución.

A los trabajadores del Cenidet, en especial a la Sra. Rocío y Nadia, por apoyarme en todos los trámites necesarios durante mi estancia en Cenidet, su apoyo fue indispensable.

A mis compañeros de laboratorio de tribología Cesar, Julio, Andrea, Noemi, Luis, Cristian, Maribel por su amistad y apoyo brindado en toda la maestría.

A mis compañeros de generación Adán, Isidro, Lot, Uziel y por el apoyo brindado.

A mis amigos de Gudiel, Israel, Diana, Karen, Brigett Abel, Gaby, Mimi, David, Viviana, Guillermo y a todos los hermanos de la 3 de mayo por el gran apoyo brindado durante todo este tiempo.

RESUMEN

En presente trabajo se estimó la pérdida de energía debido a la fricción en tuberías de acero tomando en cuenta las características tribológicas de las tuberías; se observó que las pérdidas son causadas principalmente por los esfuerzos cortantes que existen entre el fluido con la superficie de la tubería, la fricción de la sangre con el stent y del petróleo con el tubo de acero x52 y la adhesión de partículas que existe en las paredes de la tubería, por lo cual se propone la utilización de un recubrimiento de DLC por medio de triboadhesión para poder disminuir los esfuerzos cortantes, el coeficiente de fricción y la adhesión de partículas sobre la superficie de las paredes de la tubería.

Se realizó un análisis numérico con el programa ANSYS Fluent para ver el efecto del recubrimiento en la tubería y poder determinar las pérdidas en la tubería de acero al carbón con petróleo y en los stent con la sangre;

Con el recubrimiento de DLC se logró disminuir el coeficiente de fricción teórico hasta 0.0878 para el contacto del petróleo-DLC y 0.0568 en el caso de la sangre-DLC; estos resultados representan una disminución de 67.6% de las pérdidas de energía en los ductos de acero X52 con petróleo y 68.5% de las pérdidas de presión en los stent y la sangre.

ABSTRACT

In this work, the energy loss in steel piping was estimated taking into account the tribological characteristics of the pipes; It was observed that the losses are mainly caused by shear stresses, friction and the adhesion of particles that exist in the walls of the pipe, From there it is proposed the DLC coating by means of triboadhesión In order to reduce the shear stresses the coefficient of friction and the adhesion of particles on the surface of the pipe walls.

A numerical analysis was carried out with the ANSYS Fluent program to see the effect of the coating on the pipe and to be able to determine the losses in the carbon steel pipe with oil and in the stents with the blood;

With the DLC coating, the theoretical friction coefficient was reduced to 0.0878 for the oil-DLC contact and 0.0568 in the case of the blood-DLC. These results represent a 67.6% decrease in energy losses in X52 steel oil pipelines and 68.5% in pressure losses in stents and blood.

CONTENIDO

<i>CONTENIDO</i>	<i>V</i>
<i>NOMENCLATURA</i>	<i>VIII</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>IX</i>
<i>LISTA DE TABLAS</i>	<i>X</i>
<i>LISTA DE GRÁFICAS</i>	<i>X</i>
<i>LISTA DE DIAGRAMAS</i>	<i>XI</i>
<i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
<i>CAPÍTULO I</i>	<i>4</i>
<i>ESTADO DEL ARTE</i>	<i>4</i>
1.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>4</i>
1.2 <i>FLUJO DE FLUIDOS</i>	<i>4</i>
1.3 <i>PETRÓLEO</i>	<i>9</i>
1.4 <i>SANGRE Y STENTS</i>	<i>12</i>
1.5 <i>TRIBOLOGÍA</i>	<i>17</i>
1.6 <i>CONCLUSIÓN DE ESTADO DE ARTE</i>	<i>20</i>
<i>CAPÍTULO II</i>	<i>21</i>
<i>TEORÍA BÁSICA</i>	<i>21</i>
2.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	<i>21</i>
2.2 <i>VISCOSIDAD</i>	<i>22</i>
2.3 <i>DESLIZAMIENTO</i>	<i>23</i>
2.4 <i>FUNDAMENTO DE MECÁNICA DE FLUIDOS</i>	<i>25</i>
2.4.1 <i>CONSERVACIÓN DE LA MASA</i>	<i>25</i>
2.4.2 <i>CONSERVACIÓN DE FUERZA Y MOMENTUM</i>	<i>27</i>
2.4.3 <i>CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA</i>	<i>29</i>
2.4.4 <i>SISTEMA COMPLETO DE NAVIER-STOKES</i>	<i>30</i>
2.5 <i>MODELADOS DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES (RANS)</i>	<i>31</i>
2.5.1 <i>MODELO $k-\varepsilon$</i>	<i>33</i>
2.6 <i>TRATAMIENTO DE PARED</i>	<i>34</i>
2.6.1 <i>MODELO DE DOS CAPAS PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO DE LA PARED</i>	<i>35</i>

2.7 ENERGÍA LIBRE SUPERFICIAL.	35
2.8 ADHESIÓN.	36
2.9 TRABAJO DE ADHESIÓN.	36
2.10 TRIBOLOGÍA.	36
2.11 CONDICIÓN DE DESLIZAMIENTO EN LA INTERFASE SÓLIDO LÍQUIDO.	40
2.12 PÉRDIDAS EN TUBERÍAS.	42
2.13 LEYES DE SEMEJANZA.	43
<i>CAPÍTULO III</i>	<i>45</i>
<i>MODELADO Y EXPERIMENTACIÓN</i>	<i>45</i>
3.1 INTRODUCCIÓN.	45
3.2 DESCRIPCIÓN DE FLUENT.	45
3.3 MATERIALES Y PROPIEDADES.	46
3.3.1 DIAMANTE TIPO CARBÓN.	46
3.3.2 ACERO AL CARBÓN.	47
3.3.3 PETRÓLEO CRUDO MAYA.	48
3.3.4 SANGRE.	48
3.4 ANÁLISIS NUMÉRICO.	49
3.5 SIMULACIÓN NUMÉRICA STENT.	50
3.6 SIMULACIÓN NUMÉRICA TUBO.	53
3.7 BANCO EXPERIMENTAL.	56
3.8 PROCESO DE TRIBOADHESIÓN.	58
<i>CAPÍTULO IV</i>	<i>60</i>
<i>RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES</i>	<i>60</i>
4.1 INTRODUCCIÓN.	60
4.2 RESULTADO NUMÉRICO.	60
4.3 STENT.	60
4.4 TUBERÍA DE PETRÓLEO.	65
4.5 RESULTADO EXPERIMENTAL.	71
<i>CAPÍTULO V</i>	<i>75</i>
<i>CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS</i>	<i>75</i>

5.1 CONCLUSIÓN.	75
5.2 TRABAJOS FUTUROS.	76
REFERENCIAS	77
ANEXO A.	86
ANEXO B.	87
ANEXO C.	88
ANEXO D.	89
ANEXO E.	90

NOMENCLATURA

a_0	Distancia entre centros de iones del material.
a	Radio de contacto que considera la carga normal.
A_{adh}	Área real de contacto en función de la adhesión.
A_{com}	Área real de contacto plástico que considera el deslizamiento y la adhesión.
A_r	Área real de contacto.
D_m	Propiedades elásticas de la matriz.
D_f	Propiedades elásticas de la inclusión.
E	Módulo de elasticidad del material.
F	Parámetro que relaciona $\tau(N/H_m)$
H_m	Dureza de indentación del material.
n	Número de asperezas que están en contacto.
N	Carga normal.
r_{adh}	Radio de contacto en función de la adhesión.
r_{com}	Radio de contacto por carga combinada.
W_{adh}	Trabajo de adhesión.
y	Parámetro que determina la magnitud de los efectos de adhesión.
γ	Energía libre superficial del material.
γ_{12}	Energía interfacial de los materiales en contacto.
E_m	Energía por unidad de masa
G	Energía total del sistema
θ	Ángulo de las asperezas interfaciales.
τ	Esfuerzo cortante.
k	Deslizamiento
u	Velocidad del deslizamiento
η	Viscosidad
D	Diámetro de la tubería
Ω	Volumen de control
k_ρ	Difusividad térmica
ρ	Densidad
μ	Coefficiente de fricción
λ	Tensión superficial

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de flujo en tubería.....	21
Figura 2.2 Diagrama de Viscosidad	22
Figura 2.3 Condición de límite de velocidad y longitud de deslizamiento.....	24
Figura 2.4 Volumen de control cuadrado.....	25
Figura 2.5 Volumen de control mostrando la entrada y salida de flujo másico en x.....	25
Figura 2.6 Fuerzas actuando en la superficie del volumen de control	28
Figura 2.7 Superficie rugosa en contacto directo b) Plano normal a la interfaz que muestra el área real total entre las dos superficies.	37
Figura 2.8 Rugosidad esférica dentro de un fluido	41
Figura 3.1 Modelo para simulación.....	49
Figura 3.2 Geometría de tubería para petróleo.....	50
Figura 3.3 Geometría del stent	50
Figura 3.4 Geometría del stent para la simulación	50
Figura 3.5 Mallado de la geometría	51
Figura 3.6 Mallado más fino del stent, para obtener resultados más precisos.	51
Figura 3. 7 Entrada de flujo del stent.....	52
Figura 3. 8 Salida de flujo del stent	52
Figura 3. 9 Strut del Stent.....	53
Figura 3. 10 Vena.....	53
Figura 3. 11 Geometría de la tubería para petróleo	54
Figura 3. 12 Mallado de la tubería de petróleo.....	54
Figura 3. 13 Entrada de flujo de petróleo	55
Figura 3. 14 Salida de flujo de petróleo	55
Figura 3. 15 Pared de la teoría	55
Figura 3. 16 Banco de pruebas.....	57
Figura 3. 17 Contenedor de polvos	57
Figura 3. 18 Adaptación de quipo para proceso de triboadhesión en tuberías de acrílico	58
Figura 3. 19 Fresa de algodón	58
Figura 4. 1 Esfuerzo cortante en stent sin recubrimiento.....	63
Figura 4. 2 Esfuerzo cortante en stent con recubrimiento	63
Figura 4. 3 Perfil de velocidad sin DLC	64
Figura 4. 4 Perfil de velocidad con DLC	64
Figura 4. 5 Turbulencia sin DLC	64
Figura 4. 6 Turbulencia con DLC.....	64
Figura 4. 7 Cortante sin DLC.....	68
Figura 4. 8 Cortante con DLC.....	68
Figura 4. 9 Turbulencia en tubería sin recubrimiento de DLC.....	69
Figura 4. 10 Perfil de velocidad de la tubería sin DLC	69
Figura 4. 11 Perfil de velocidad de la tubería con DLC.....	69

Figura 4. 12 Turbulencia en tubería con recubrimiento de DLC	69
Figura 4. 13 Banco para pruebas de plano inclinado	71
Figura 4. 14 Gota de agua colocada para realizar la prueba.....	71
Figura 4. 15 Deslizamiento de la gota en el tubo con DLC.....	72
Figura 4. 16 Ángulo de contacto del acrílico y agua.....	73
Figura 4. 17 Ángulo de contacto de acrílico recubierto con DLC y agua	73

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 3.1 Propiedades del diamante tipo carbón [89] [90].</i>	47
<i>Tabla 3.2 Propiedades de acero al carbón X52 API 5L [92] [93].</i>	47
<i>Tabla 3.3 Propiedades del stent [94].</i>	48
<i>Tabla 3.4 Propiedades del crudo Maya [96], [97] [98].</i>	48
<i>Tabla 3.5 Propiedades de la sangre [100] [101].</i>	49
<i>Tabla 3.6 Valores de entrada para simulación del stent</i>	51
<i>Tabla 3.7 Valores de entrada para la simulación de la tubería</i>	53
<i>Tabla 3.8 Propiedades del sustrato y fresa de algodón para el proceso de triboadhesión</i>	56
<i>Tabla 3.9 Especificaciones del torno</i>	57
Tabla 4. 1 Comparación de datos obtenidos de simulación del stent	65
Tabla 4. 2 Comparación de datos obtenidos de la simulación de tubería y petróleo.....	70
Tabla 4. 3 Pérdida de longitud, presión y energía con y sin DLC.....	74

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 3. 1 Convergencia del mallado en stent	52
Gráfica 3. 2 Convergencia del mallado de la tubería de petróleo	54
Gráfica 4. 1 Coeficiente de fricción sangre-stent dependiente del porcentaje de DLC.....	61
Gráfica 4. 2 Comparación del trabajo de adhesión de la sangre-stent.....	62
Gráfica 4. 3 Comparación Reynolds sin y con DLC	62
Gráfica 4. 4 Coeficiente de fricción petróleo -ducto dependiente del porcentaje de DLC.....	66
Gráfica 4. 5 Trabajo de adhesión en tubería y petróleo	66
Gráfica 4. 6 Comparación de Reynolds en tuberías de petróleo con y sin recubrimiento de DLC	67
Gráfica 4. 7 Relación de coeficiente de fricción y el radio de adhesión en el stent y la tubería	70

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 2.1 Modelo de la técnica RANS.....	32
Diagrama 3.2 Proceso de solución del modelado numérico en CFD	46

INTRODUCCIÓN

La fricción es un fenómeno complejo que involucra liberación de energía, principalmente en forma de calor. Este calor afecta las propiedades físicas de las superficies materiales así como las químicas y físicas de cualquier elemento que esté en contacto. Los problemas provocados por la fricción son motivo de investigaciones científicas, a causa de las pérdidas económicas que ocasionan. Investigaciones desarrolladas en Canadá demuestran la alta incidencia de la fricción y el desgaste en diferentes sectores industriales, por ejemplo en la industria papelera se tiene una pérdida energética de un 8.1%, que representa unos 105 millones de USD, en la agricultura se tiene una pérdida energética por fricción de 16.8% que son 321.00 millones de USD, la industria automotriz tiene una pérdida energética de 18.5% que representa 126.1 millones de USD [1].

El transporte de fluidos a través de una tubería es una actividad que requiere de equipo de bombeo. En fluidos con poca viscosidad como el agua, dicho transporte es fácil de realizar y los equipos de bombeo requeridos no son sofisticados. Sin embargo, para líquidos especiales como el petróleo o la sangre que posee una viscosidad mayor, se requiere de un método de estudio especial, ya que muchas veces quedan adheridas partículas sobre la superficie la cual hace más difícil el transporte del fluido. En el caso del petróleo se requiere equipo de bombeo más sofisticado y con mayor potencia para transportar este fluido. Pero en el caso de la sangre que circula por ductos muy pequeños la adhesión de partículas pueden significar un taponamiento de la circulación [2]. Sin embargo, actualmente no existe estudios sobre tubería recubierta con DLC para disminuir la fricción, las fuerzas de adhesión y los esfuerzos cortantes que provoca el paso del fluido a través de ella.

El proceso de fricción seca se usa para mejorar algunas propiedades mecánicas de una superficie. Dentro del proceso de Triboadhesión se utiliza la fricción seca para lograr la adhesión de un material de aporte, generalmente en polvo, sobre dicha superficie. Con una fresa que gira

a alta velocidad se produce calor y las partículas del material de aporte se adhieren sobre la superficie [3].

Los recubrimientos de Diamante Tipo Carbono (DLC) por medio de triboadhesión, sirven para disminuir el coeficiente fricción y las fuerzas de adhesión, el cual se utilizará en una tubería de transporte de fluidos para disminuir la fricción, las fuerzas de adhesión y los esfuerzos cortantes al momento del transportar cualquier tipo de fluidos.

En esta propuesta se utilizo la metodología de triboadhesión para recubrir una tubería de acero al carbón, utilizando DLC como material de aporte para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las superficies, en específico, para disminuir la fricción, la adhesión y mejorar la transportación de fluidos y evitar que queden adheridas partículas sobre la superficie de la tubería.

Se determino la cantidad de pérdidas de transporte a través de una tubería de acero al carbón recubierta con DLC por medio de triboadhesión; se analizo los efectos de la fuerza de adhesión y el coeficiente de fricción entre un fluido y una superficie sólida y la influencia que tiene en el transporte de fluido y analizar numéricamente de pérdidas de transporte en tubería de acero al carbón recubiertas con DLC para transporte de petróleo y stents coronarios.

Así se logra disminuir la potencia de las bombas o con las mismas bombas, trasegar más líquido a mayor distancia, lo cual se traduce en un ahorro económico, y disminución de los gastos de mantenimiento y aumento de la vida útil de la tubería al tener mayor resistencia al desgaste y a la corrosión.

Sepuede aplicar el mismo principio al momento de usar un implante de stents para destapar las venas y arterias y evitar que se produzca un taponamiento, al recubrir los stents con DLC se logra disminuir la fuerza de adhesión y el coeficiente de fricción lo cual evitan de que se produzca un nuevo un taponamiento evitando que se adhieran partículas sobre el stent aumentando su vida útil.

El presente trabajo se divide en 5 capítulos

En el capítulo I se presenta el estado del arte, que contiene aspectos relacionados a los fluidos y los problemas de transportación del petróleo y la sangre, las soluciones que se le han dado los problemas tribológicos y las aplicaciones tribológicas de los recubrimientos.

El capítulo II contiene los fundamentos teóricos de transporte de fluidos y las pérdidas por fricción y el análisis tribológico para la determinación del coeficiente de fricción.

El capítulo III contiene los parámetros para el análisis numérico de los fluidos y la pared de las tuberías.

En el capítulo IV se presentan las pruebas y resultados numéricos y experimentales.

El capítulo V contiene las conclusiones del análisis de los resultados de esta investigación, además incluye sugerencias para la realización de trabajos futuros.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN.

El transporte de fluidos a través de ductos es una actividad muy común en la industria hoy en día, por ejemplo, el transporte de petróleo y la sangre, dos fluidos importantes para la vida económica de un país y el sostén propio de la vida. El estudio de los fenómenos que están involucrados en el proceso de transporte y estudios relacionados al respecto se muestran en este capítulo.

1.2 FLUJO DE FLUIDOS.

En la historia de la civilización ningún otro producto ha contribuido tanto para la salud y el confort de las personas de las grandes ciudades del mundo como son las tuberías. Comenzando con la tubería de arcilla cruda de los tempranos días de Babilonia, 4000 años A.C. hasta el hierro que se le conocía desde 1313 en Europa occidental con la manufactura de cañones de hierro fundido, la primera tubería auténtica de hierro fundido fue instalada en Alemania en 1455 y conducía agua al Castillo Dillenberg. La primera tubería de hierro fundido que se instaló en Londres fue instalada alrededor del año 1746. En los Estados Unidos fue en la Ciudad de Filadelfia en la que se usó la primera tubería de hierro fundido en el año de 1804.

En un esfuerzo constante para llegar a lo ideal de una tubería, se han creado tuberías de distintos materiales como son: concreto, plomo, cobre, aluminio, aleaciones de metales como el acero, los galvanizados, plásticos como el PVC, ABS o CPVC entre otros, dependiendo del uso y del

fluido que pase en él. Siempre buscando la fabricación en forma económica y con la menor pérdida posible.

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la mecánica de los fluidos se vio enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, también por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, este último interesado en la circulación de la sangre. Sobresalieron también en el aspecto teórico Julios Weibach y Gottlieb Hagen, y se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venant, Venturi y Pitot entre otros [4].

En 1738 Bernoulli [5], expresó que, en un fluido ideal en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido, esto se conoce como la ecuación de Bernoulli para fluido y relaciona las energías potenciales, cinéticas y presión a la entrada y salida de un ducto a través de la ecuación de conservación de la energía

Darcy y Weisbach [6] en 1850 describieron la relación entre la pérdida de carga hidráulica a causa de la fricción que existe a lo largo de una tubería este es función de la velocidad media del flujo del fluido y de las propiedades de la superficie de la tubería, como de la rugosidad.

A lo largo de la historia se ha tratado de estudiar el comportamiento de los fluidos en las tuberías varios de los fenómenos dependen de la viscosidad. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e independientemente al matemático británico George Stokes, el cual en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se les conoce como ecuaciones de Navier-Stokes [7].

En 1851 Stokes [8], introduce el concepto de número de Reynolds, el cual consiste en relacionar las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Relaciona las propiedades físicas del fluido como es la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica del flujo en una expresión adimensional que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos.

Por otro lado, los estudios de Nakayama *et al.* [9] en el transporte de fluidos no newtonianos, demostraron que con la determinación de las caídas de presión a través de una tubería, se comprobó la presencia de valores altos en las pérdidas de energía atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano del fluido.

En los estudios realizados por García y Steffe [10] y Liu y Masliyah [11], se da a conocer la importancia que tiene la consideración del esfuerzo cortante en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; en este caso las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron con el índice de flujo, los números de Reynolds y Hedstrom.

En 1988 Manssur y Rajie [12] desarrollaron una ecuación explícita generalizada para el factor de fricción de fluidos newtonianos y no newtonianos en conductos circulares y no circulares, considerada por sus creadores como un paso primario en el desarrollo de una expresión universal para la determinación del factor de fricción de todo tipo de fluido, conducto y régimen de circulación, para la cual se utiliza el criterio generalizado de Reynolds.

Al paso de los años se han realizado varios experimentos para entender el comportamiento de fluidos, uno de los trabajos es el realizado por Wojs [13], el cual realizó estudios del efecto de la fricción en tuberías lisas y rugosas con soluciones diluidas de polímeros y desarrolló una ecuación teórico-experimental que, aunque concuerda adecuadamente con los resultados experimentales, su aplicación se encuentra limitada por el factor de fricción de Darcy implícito en la ecuación.

En el 2000 Pedroso *et al.* [14], a partir del modelo de Otswald de Waele, obtuvieron la expresión para el cálculo de la velocidad media de transporte de un fluido y los gradientes de velocidad a la que son transportadas las mieles y meladuras en un conducto, lo que permitió obtener el perfil universal de distribución de la velocidad a través de la sección de un conducto circular, en dependencia del valor del índice de flujo.

En la actualidad se utilizan métodos numéricos y volumen finito para agilizar los cálculos de hidrodinámica, Sánchez [15], realizó un estudio numérico de mecánica de fluidos 2D en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald de Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de momentum lineal y de continuidad. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de flujo- pero Adhikari y Jindal [16], fueron los primeros que incorporaron el concepto de las redes neuronales en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano; se obtienen errores de predicción menores a 5.4 % con respecto a los valores experimentales mejorando los métodos numéricos convencionales.

De la Paz [17], Caldiño y Salgado [18] presentaron una metodología para obtener funciones reológicas en forma simplificada, de utilidad para ajustar modelos de cálculo para fluidos con altas concentraciones. En los mismos se observó y evaluó la influencia del componente sólido en el valor de la viscosidad, aunque en ambos casos no se tuvieron en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas, como el pH y diámetro medio de las partículas, lo que limita la aplicación de la metodología.

En el 2004 Haoulo y García [19], observaron un marcado efecto de la densidad de mezcla en el gradiente de presión a causa de los cambios de energía cinética, y adicionalmente evaluaron el efecto de la viscosidad del líquido en el gradiente de presión total. Sin embargo, no evaluaron el efecto de las propiedades de mezcla en el gradiente de presión total.

En 2006 Khatib [20], propuso un modelo matemático que correlaciona la viscosidad de fluidos pseudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo, ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental, nombrado como constante de tiempo de deformación; este modelo se ha relacionado con la viscosidad del fluido cuando el gradiente de velocidad tiende desde cero hasta infinito.

En 2009 Japper *et al.* [21], analizaron el flujo de polímeros en tuberías, para el caso en estudio se determinó la relación del factor de fricción mediante la experimentación del gradiente de presión, para mezclas Newtonianas y no Newtonianas del tipo pseudoplásticas. Las correlaciones obtenidas fueron expresadas en función del número de Reynolds, evidenciándose ciertas desviaciones del modelo tradicional en el caso del régimen laminar, atribuidas al efecto de esfuerzos de cortes perpendiculares a la velocidad del fluido en la tubería, manifestado en los líquidos de viscosidad elevada.

El 2010 Balagui *et al* [22] descubrieron que el comportamiento del fluido siempre y cuando no exista ninguna reacción o proceso físico, puede seguir un comportamiento de acuerdo con la ley de Arrhenius. En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura.

De acuerdo con Nilolaev la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura, y en la práctica, la aplicación del efecto de la temperatura para la disminución de la viscosidad del combustible es el método de mayor aplicabilidad, prevaleciendo la dificultad de que la temperatura de transporte se selecciona de manera irracional [23].

En la actualidad se considera que entre los fluidos más importantes se encuentran el petróleo y la sangre, porque el petróleo es el fluido que mueve económicamente el mundo actual; la sangre es el fluido principal del cuerpo humano por lo que es de gran importancia, ya que en la actualidad existen muchas enfermedades relacionadas con el flujo de la sangre; ambos fluidos tienen en común es que son fluidos no newtonianos y viscosos, además de que contienen otras fases lo que hace más complejo el análisis de su comportamiento y por lo que al reducir el coeficiente de fricción reduce la adhesión sobre las paredes.

1.3 PETRÓLEO.

En el mundo actual la energía se obtiene principalmente de los combustibles fósiles y uno de los más utilizados es el petróleo; de este se extraen los principales combustibles los cuales se utilizan para motores, para la generación de electricidad, para climatización de ambientes, para cocinar y muchas otras cosas.

En el transporte de fluidos a través de ductos se han tenido muchas aplicaciones a lo largo de la historia en un principio se utilizó para el transporte de agua y fluidos de baja densidad, pero fue a principios del siglo XIX cuando se empezó a utilizar ductos para transporte de fluidos viscosos; en año de 1863 el ruso Dimitri Mendeleev [24] propuso por primera vez la utilización de tuberías para el transporte de petróleo, pero fue Vladimir Shukhov [24] con la compañía Branobel, el primero en usar tuberías para transportar petróleo a finales del siglo XIX.

Antes de transportar el petróleo en ductos se transportaban en barriles a través de las líneas férreas, lo cual hacía que el transporte tuviera costos muy elevados, por lo que el transporte en ductos fue una solución muy viable, pero al ser un fluido con alta densidad y viscosidad se presenta varios problemas como es la adhesión de partículas sobre la superficie de los ductos, los cuales hasta hoy en día son un problema, ya que los costos de mantenimiento y operación son muy elevados; en 2018 los gastos del transporte de petróleo por ducto tuvo un costo de \$28, 833, 618.408 pesos anuales sin contar el mantenimiento a los ductos los cuales triplican el gasto [25].

El petróleo es un fluido de alta densidad y viscosidad por lo que el avance tecnológico en la industria del petróleo se enfoca primordialmente en la mejora de las herramientas y metodologías. En particular, los estudios reológicos y dieléctricos, estos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos [26].

Al comienzo de 1960 se propuso por primera vez en Reino Unido la utilización de mezclas dispersantes y de disolventes hidrocarbonados para emulsionar los hidrocarburos flotantes o depositados en las costas para evitar que contaminaran. Aunque los disolventes eran productos

tóxicos, se consideró que la disolución del agua del mar era suficiente para reducir su concentración a niveles que no fueran dañinos a la flora y fauna marina [27].

El primer uso generalizado de estos dispersantes aplicados fue al vertido del buque Torrey Canyon en 1967, demostraron que su toxicidad era tan elevada que no justificaba su uso como agente anticontaminante; pero se dieron cuenta que los disolventes tenían como función la reducción de la viscosidad y permitía una rápida solubilidad del petróleo dando ideas a la emulsión del petróleo para su trasportación en ductos [27].

Según Schramm [28], la alta relación de aceite-agua son emulsiones que se comportan como fluidos pseudoplásticos. El comportamiento reológico depende fundamentalmente del diámetro promedio de las gotas de la fase interna, así como de la concentración. La emulsificación normalmente requiere de la presencia de un tercer componente con actividad interfacial que es adsorbido en la interfase de las gotas en la fase dispersa, denominado surfactante; este facilita la formación de la emulsión y prolonga su estabilidad.

El método de formulación de emulsiones fue muy usado en la industria del petróleo, para su aplicación en el transporte, requiere de equipamientos específicos, que de no realizarse un estudio económico adecuado se encarecería el proceso de transporte con emulsiones.

Uno de los problemas más graves en los fluidos de alta densidad es el de la acumulación de sedimentos en las paredes de las tuberías como es en el caso del petróleo. A partir del estudio reológico de un petróleo parafínico, Harms [29] propuso un método para controlar la acumulación de depósitos de parafina en la tubería de producción y líneas de flujo. La exitosa herramienta previene la obstrucción de la tubería por sedimentos utilizando la caracterización reológica a diferentes temperaturas por medio de campos magnéticos.

En 1993 Garcell [30], declaró que la disminución de la viscosidad se debe a dos efectos principales

- Utilizar medio dispersante o emulsiones.
- Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

Al investigar sobre el transporte de fluidos de alta viscosidad en tuberías surgieron nuevos métodos uno de ellos fue presentado por Wang y Dong [31] en 1995, los cuales realizaron estudios del comportamiento de la viscosidad en diferentes petróleos pesados, comparando la acción de la temperatura y el campo magnético sobre el área de flujo. En todos los casos la viscosidad disminuyó y según sus recomendaciones el generador de campo magnético puede ser conectado a la tubería en el sistema de bombeo mecánico.

Liang [32] continuó la investigación sobre la influencia de los campos magnéticos en el transporte de fluidos viscosos y realizó pruebas para transporte de crudo tratado magnéticamente a grandes distancias a través de oleoductos. Las pruebas se corrieron en un aparato de tratamiento magnético para varias intensidades y diferentes configuraciones del campo magnético bajo ciertas temperaturas, flujo y caída de presión. Las deducciones mostraron que los factores más importantes en el tratamiento son la temperatura y el campo magnético los cuales disminuyen de manera significativa la viscosidad del fluido.

Resultados reportados por García [33], mostraron diferencias significativas en la predicción del gradiente de presión entre modelos homogéneos, cuya única diferencia es la forma de evaluar la viscosidad de mezcla de petróleo.

En 2005 Mansoori [34], describió la conducta electrocinética de ciertos crudos vinculándolos con el flujo dinámico. Plantea que cuando el crudo ingresa a la tubería se genera una diferencia de carga entre asfaltenos y los demás componentes del petróleo, creándose un campo de potencial entre la pared de la tubería y el fluido; la diferencia de potencial se opone al movimiento del flujo multifásico. Como resultado de la diferencia de carga, las partículas tienden a contra fluir debido a la transferencia de carga, conocida como corriente de pérdida o potencial espontáneo.

En 2005 Haoulo *et al.* [35], evaluaron el efecto de la densidad y de la viscosidad dinámica de mezcla en la determinación del gradiente de presión longitudinal de flujo de petróleo bifásico en tuberías horizontales para un fluido pseudohomogéneo, se evaluaron 16 ecuaciones de viscosidad de mezcla y cuatro ecuaciones de densidad, para ver cuál de todas las ecuaciones eran más aproximadas a los datos experimentales.

En 2008 Balan *et al.* [36], caracterizaron el comportamiento reológico del petróleo crudo al ser tratado mediante variaciones del campo eléctrico y magnético para diferentes temperaturas. Mediante este estudio se demostró la relación de variaciones de la viscosidad para distintas temperaturas e intensidades del campo electromagnético.

En los fluidos con características coloidales, se manifiestan significativamente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales, que pueden ser afectados por la presencia del campo electromagnético. En los fluidos cuya distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se revelan también estos fenómenos, modificándose el equilibrio de atracción-repulsión entre partículas al desplazarse hacia la atracción, debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals [37]. Actualmente no se han reportado los efectos del campo electromagnético en la propiedad del combustible mexicano.

1.4 SANGRE Y STENTS.

La sangre está compuesta por plasma, glóbulos blancos, glóbulos rojos y plaquetas. El cuerpo humano contiene unos 5 litros de sangre. Una vez que la sangre es expulsada desde el corazón, tarda de 20 a 30 segundos en recorrer por completo el sistema circulatorio y volver, por ello es considerado como un sistema de bombeo.

Mientras la sangre circula por el cuerpo, realiza varias funciones esenciales. Distribuye oxígeno y nutrientes esenciales como grasas, azúcares, minerales y vitaminas a los diferentes tejidos del organismo. Además, transporta el dióxido de carbono a los pulmones y lleva otros productos de desecho hacia los riñones para que sean eliminados del organismo [38].

Cuando la sangre tiene alto contenido de grasa, tienden a adherirse en la pared de las arterias. Por lo general, el colesterol en las arterias y la inflamación son los responsables de la enfermedad de las arterias coronarias, Cuando la placa se acumula, estrecha las arterias coronarias, lo que provoca que disminuye el flujo sanguíneo al corazón, esto se conoce como estenosis. Con el tiempo, la disminución del flujo sanguíneo puede provocar dolor en el pecho, dificultad para respirar u otros signos y síntomas de la enfermedad de las arterias coronarias, una obstrucción completa puede provocar un ataque cardíaco [39].

En la actualidad los problemas cardiacos son muy comunes en la sociedad, y la mayoría de los casos son provocados por la estenosis, el cual es un estrechamiento de los conductos, este estrechamiento evita que la válvula se abra por completo, lo que reduce la irrigación sanguínea y hace que al corazón le cueste más funcionar [40], para dar solución a este problema se someten a los pacientes a un proceso llamado angioplastia con stent. La angioplastia utiliza un catéter con un balón en un extremo para abrir y bloquear vasos sanguíneos y mejorar el flujo sanguíneo. El médico utiliza imágenes médicas para guiar el catéter hasta el área bloqueada, una vez que está en la zona obstruida se infla un balón para abrir el vaso y mejorar el flujo sanguíneo [41].

La angioplastia es un proceso quirúrgico con costos demasiado elevados, en un paciente promedio varía de entre \$100,000.00 a \$150,000.00 de pura intervención, más aparte hospitalización y medicinas; la vida útil es de 2 a 4 años dependiendo del cuidado que tenga el paciente, después de este tiempo se presenta la restenosis la cual se da cuando el stent se ve obstruido por el colesterol principalmente, por lo que es necesario retirar el stent y colocar uno nuevo.

Su origen se remonta a 1964, cuando el radiólogo intervencionista Charles Dotter, en la Universidad de Oregón Estados Unidos, realizó la primera angioplastia en una arteria de las piernas. Se denominó angioplastia (reparación de vaso sanguíneo).

En 1856, Stent, patentó un material termoplástico para realizar impresiones dentales que le llamó “pasta de Stent”. Durante la primera guerra mundial, el cirujano Alemán J.F. Esser la

utilizó para fijar injertos de los soldados con quemaduras y como soporte de prótesis de cara y boca.

Dotter, en 1968, 4 años después de su primera angioplastia en la pierna, empezó a implantar espirales metálicas en las piernas de los perros, a las que llamó Stents por la semejanza a la pasta de Stent, pero Grüntzig, fue el primer médico que realizó la primera angioplastia en una vena coronaria, con balón, técnica que fue un éxito, aunque se reservó solo para pacientes con lesiones de una sola arteria coronaria, localizada, cercana a su inicio y no calcificada, quedando, por tanto, reservada para tan solo menos del 10% de los pacientes [42].

En 1984, Maas et.al. [43] en un trabajo experimental utilizaron alambres extravasculares de acero, pero en 1985 Wright usó stents autoexpandibles hasta esta fecha los stent eran montados en forma coaxial en una guía y colocados en el sitio de la estenosis empujándolos con un catéter.

En 1985 el argentino Julio Palmaz, junto con Richard Schatz, crearon un Stent expansible, montado en la punta del catéter y que expandían al inflar el balón, lo emplearon en las arterias de las piernas [44].

El material más utilizado en su fabricación es el acero inoxidable, pero se emplean otros elementos solos o en aleación: platino, iridio, cobalto, tantalio, nitinol y el oro. Su forma es variable: alambre en espiral, tubular hendido, anular, malla y de diseño múltiple [45].

En 2000 Gutensohn, K. et al. [46] realizaron estudios de los stents recubiertos con DLC mediante una técnica de deposición en frío inducida por plasma con un espesor de $60 \mu\text{m} \pm 10\%$; se pudo demostrar que el recubrimiento de carbono con forma de diamante de los stents reduce significativamente la liberación de iones metálicos de los stents. Como consecuencia, la activación plaquetaria se ve disminuida. Los resultados de este estudio sugieren que los stents recubiertos con carbono de tipo diamante mejoran la biocompatibilidad y disminuye la restenosis.

Un año después fue implantado por primera los stent liberador de sirólímo, también conocido como rapamicina, en América Latina (Brasil) [47] y en los Países Bajos en 2001 [48]. Los datos de la investigación del uso de stents con sirólímo evaluados por el equipo de investigaciones del Hospital de Cardiología de Róterdam, fue que un total de 508 pacientes con lesiones coronarias no tratadas fueron tratados con stents liberando sirólímo, y los compararon con un grupo controlado constituido por 450 pacientes tratados con stents de meta de la época inmediatamente tuvieron menos eventos adversos después del año.

En el 2002 entraron en el mercado europeo los stents revestidos, al compararlo respecto a la implantación de stents revestidos frente a los stents metálicos no revestidos, que ha demostrado reducir la tasa de restenosis, lo cual sería de manera general si no fuera por dos factores: su precio y los posibles efectos secundarios. En ese entonces se desconocían los efectos secundarios específicos de los stents revestidos, ahora, con el uso clínico desde 2002, sabemos que los stents recubiertos tienen dos efectos secundarios que los diferencian de los stents no recubiertos: la mayor tasa de trombosis tardía y lenta inhibición de la endotelización.

En 2003 se aprueba el stent recubierto de medicamento, que se libera de manera progresiva, siendo antiproliferativos e inmunopresores, evitando la restenosis, hasta la aparición reciente de los stents biodegradables, que se reabsorben a los 2 o 3 años, tras cumplir su función, permitiendo a la arteria coronaria su completa función [42].

La implantación de stents ha ayudado a la reducción de manera significativa de la restenosis, ya que ha eliminado el retroceso elástico y disminuido el remodelado tardío del vaso que son 2 factores que intervienen en la patogenia de la restenosis, sin embargo, la proliferación e hiperplasia de la neointima persisten con el stent e incluso puede ser estimulada por este, produciendo restenosis sobre todo si se utiliza la técnica de las altas presiones para su implantación [49].

Para el tratamiento de la restenosis del stent se puede utilizar la angioplastia coronaria por vía transluminal percutánea sola, la colocación de otro stent, la aterectomía direccional o rotatoria

y el láser. Para la prevención de la restenosis se ha recurrido al recubrimiento del stent con sustancias biodegradables como el ácido poliláctico al que pueden añadirse agentes farmacológicos, pero la braquiterapia ha surgido como la mayor esperanza para reducir este efecto adverso de la aplicación del stent.

En 2005 Migliavacca. F. *et al.* [50] realizaron un estudio predictivo del comportamiento mecánico de los stents coronarios mediante modelado por computadora en el cual determinó los esfuerzos del stents al ser expando e hizo una comparación del análisis numérico y experimental para tener una correcta expansión del stents y encontrar las partes de mayores esfuerzos.

El análisis elemento finito se ha utilizado para estudiar las propiedades mecánicas de los stents metálicos, como la presión de despliegue, el retroceso elástico y la flexibilidad. Varios estudios han abordado los efectos de las geometrías del stent, la interacción entre el stent y el balón del catéter, o las interacciones entre el stent y la pared arterial [51].

Gu L. *et al.* [52] en 2005 realizaron un análisis de elementos finitos de los microstents recubiertos usado para comparar las propiedades mecánicas con un stent y del recubrimiento, así como el comportamiento al ser expandido el stent. Los resultados obtenidos fueron que el contacto entre el stent y la cubierta influye en el comportamiento mecánico del stent cubierto. Se encontró que la presión de despliegue requerida para inflar el stent cubierto era proporcional al grosor de la cubierta.

En 2005 Ohta *et. Al.* [53], demostraron por medio de simulaciones por computadora las suposiciones experimentales y clínicas de que los stents intracraneales actúan de dos maneras: mediante la reducción de la tensión de cizallamiento en la pared aneurismático y aumentando la viscosidad dentro del saco aneurismático, además de demostrar que los stents conducen una reducción inmediata de la resistencia al esfuerzo cortante, lo que resultó en una reducción inmediata del riesgo de ruptura, y se creó una región con alta viscosidad de la sangre.

En 2009 Sebezov. V. et al. [54] realizaron recubrimientos de nanocompuestos DLC y metal / DLC depositados mediante deposición de láser pulsado (PLD), usaron láser de nitrógeno UV de alta potencia. Los revestimientos de DLC y M/DLC se depositan en sustratos con stents fabricados de NITINOL (NiTi). El espesor de las películas de DLC depositadas oscilo entre 80 -120 nm. Mostraron un muy buen efecto de protección contra la corrosión en el entorno y mejoras en el aspecto fisiológico, estructural, físicos, mecánicos, electroquímicos y químicos.

1.5 TRIBOLOGÍA.

La Tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación que tienen lugar durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento. Este término es usado universalmente desde finales del siglo XX.

En la tribología moderna, Bowden y Tabor [55], establecieron que cuando dos superficies se colocan una sobre otra, estas hacen contacto en las crestas de sus asperezas y se adquiere una gran presión una presión en esos puntos. Sobre estas regiones de contacto ocurre una fuerte adhesión y las superficies de contacto forman un sólido continuo. Mencionan que existe una relación muy cerrada entre fricción y adhesión, donde la fricción es básicamente el esfuerzo cortante y la adhesión es el esfuerzo de tensión de las uniones formadas en las regiones de contacto real.

En el año de 1989 Nagy. [3], realizó uno de los primeros trabajos con recubrimientos metálicos y cerámicos sobre superficies de acero y vidrio. La técnica consintió en hacer girar una fresa alta velocidad y pasar un material de aporte en forma de polvo sobre la superficie del material base por recubrir, la cual se conoce como Triboadhesión o fricción seca. Este método representó un costo menor a los métodos ya establecido como la implantación iónica.

Basado en la técnica de Nagy, Rodríguez en 1997 [3], inició una investigación referente a recubrimientos por Triboadhesión en el CENIDET. La primera etapa de esta investigación consistió en analizar la factibilidad de los recubrimientos, los primeros materiales utilizados

fueron pintura para cemento como material de aporte y lámina de acero como sustrato. Con los resultados obtenidos se pudo ver la factibilidad del proceso y se observó los grandes beneficios y aplicaciones de la técnica.

Dando seguimiento a los trabajos de triboadhesión en 1999 Aguilar [56], realizó el primer diseño de un dispositivo para recubrir superficies metálicas con óxidos metálicos por medio de fricción seca y superficies planas obteniendo el primer banco para realizar el proceso de Triboadhesión en el CENIDET.

Viendo la necesidad de realizar el proceso de triboadhesión en superficies que no eran planas, en el 2000 Roble [57], diseñó y construyó un dispositivo para el recubrimiento de superficies curvas por fricción seca dando un paso más para poder realizar el recubrimiento sobre superficies cilíndricas y esféricas obteniendo como resultado el banco para realizar Triboadhesión en diversos materiales y piezas tales como prótesis o piezas mecánicas en el CENIDET.

Al tener los bancos para realizar la triboadhesión En 2005 Tolosa [58], caracterizó una prótesis de cadera recubierta mediante el proceso de Triboadhesión recubierta con DLC, obteniendo las señales de vibración, las cuales analizó a través de transformada de Fourier y transformada Wavelet.

En 2005 Rodríguez Et Al. [59], realizaron la evaluación de velocidades para la deposición de FeSi y MoS₂ por Triboadhesión en aceros AISI 304 y SAE 4140 respectivamente. Obtuvo que para el acero AISI 304 con FeSi se requiere una carga de 0.3 N y una velocidad de giro de 21,000 r.p.m. y para el acero SAE 4140 con MoS₂ se requiere una carga de 0.5 N y una velocidad de 21,500 r.p.m, dejando el método para poder determinar la velocidad y la carga adecuada para poder realizar la triboadhesión en cualquier material.

Con base en los estudios previos sobre la triboadhesión en 2006 Rodríguez et. al. [60], analizaron y evaluaron el desgaste de prótesis de cadera recubierta de DLC obteniendo que la

prótesis recubierta con DLC tiene una mayor resistencia al desgaste en comparación de una sin recubrimiento lo cual le da una vida útil más grande y reduce la fricción además de ser biológicamente compatible.

En el 2006 Vela D. [61] comenzó la exploración en el área de los fluidos y la triboadhesión ampliando la aplicación del método al realizar la evaluación del efecto de la modificación de la superficie en el sistema de lubricación de una chumacera hidrodinámica, determinó:

- El comportamiento de la presión debido a la modificación de la superficie.
- La fuerzas de adhesión entre la superficie y el fluido lubricante.

En 2007 Melvyn [62] realizó una solución numérica de la ecuación de Reynolds del flujo de líquido sinovial en el espacio entre copa acetabular y acetábulo de una prótesis de cadera el cual observó una disminución de la presión cuando se utilizó la condición de frontera con deslizamiento por el recubrimiento de DLC lo que implica una reducción en la fricción y el desgaste, así como también una reducción en los esfuerzos cortantes de fluido sobre la superficie salida de la prótesis.

En 2009 Pedrero [63] realizó el recubrimiento con DLC y bisulfuro de molibdeno en anillos de motor de combustión interna para analizar el efecto en el desempeño y el desgaste y observo una reducción de esfuerzos cortantes del fluido sobre la superficie sólida del anillo del pistón al modificar el coeficiente de fricción por la deposición de DLC, por lo cual sufre menor desgaste y aumenta el tiempo de vida útil.

En 2009 Kouda [64], realizó una evaluación de la resistencia al desgaste de probetas de tungsteno recubiertas y no recubiertas con DLC, y concluyó que una película de DLC es eficaz en la prolongación de la vida de los troqueles y herramientas, con un mayor grado de resistencia al desgaste y menor fricción.

En 2013 Herrera [65], realizó el diseño de un catéter con material compuesto recubierto por triboadhesión con DLC y nanotubo de carbono logrando disminuir el coeficiente de fricción al momento de penetrar la piel hasta un 140% con DLC y hasta 280% con nanotubos de carbono y disminuir la sensación de dolor.

En 2015 Esguerra [66], realizó pruebas de tribológicas del recubrimiento de calcio de titanio y el hueso en fluidos corporales teniendo como resultado un mayor desgaste del hueso en fluidos corporales simulados en comparación del hueso sin el fluido.

1.6 CONCLUSIÓN DE ESTADO DE ARTE.

Se han realizado muchos trabajos referentes a la triboadhesión en el cual se han recubierto herramientas mecánicas, superficies metálicas, prótesis para cadera y rodilla y mejorar sus propiedades mecánicas, aumentar la resistencia al desgaste y disminuir el coeficiente de fricción, estas características lo hacen deseable para su aplicación en transporte de líquido, en particular de petróleo y del efecto en el transporte de sangre a través de stents, que son el objetivo de este trabajo.

Con base en los resultados del proceso de triboadhesión, se propone el recubrimiento del tubo con DLC para incrementar su dureza superficial y en específico disminuir el coeficiente de fricción, los esfuerzos cortante y las fuerzas de adhesión, se pretende sea uno de los métodos a utilizar, por su bajo costo y su alta eficiencia como se han demostrado en los trabajos antes realizados en donde se han logrado disminuir el coeficiente de fricción, el desgaste, la corrosión y aumentar la vida útil de las piezas recubiertas.

CAPÍTULO II

TEORÍA BÁSICA

2.1 INTRODUCCIÓN.

Todo tipo de sistema fluido se basa en tres principios fundamentales de la física los cuales son: conservación de la masa; conservación del momentum y, conservación de energía. Estos se usan tanto para mecánica de fluidos como para mecánica de sólidos [67], además de tomar en cuenta las propiedades de cada tipo de fluido así como su naturaleza en la Figura 2.1 se muestra el diagrama del fluido sobre una tubería

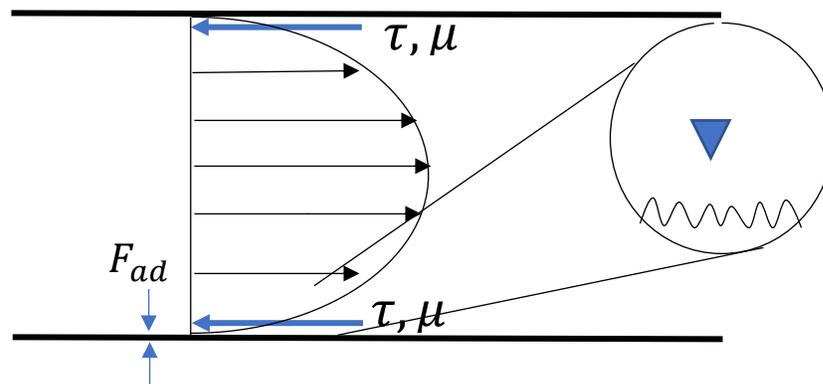


Figura 2.1 Diagrama de flujo en tubería

En el de transporte de fluido existe una fuerza que produce una resistencia al flujo del fluido, se denomina esfuerzo cortante, y se produce en las paredes del sólido, esto a su vez depende de la viscosidad y del tipo de fluido. Además de las fuerzas y trabajo de adhesión entre las partículas del fluido y la superficie del sólido.

Todos estos fenómenos tienen ecuaciones que gobiernan su comportamiento y se pueden mejorar la resistencia al flujo al disminuir los esfuerzos cortantes y que la fricción sea el mínimo y las fuerzas de adhesión disminuyan lo cual aumenta la eficiencia del sistema que es lo que se busca en este trabajo.

2.2 VISCOSIDAD.

Es aquella propiedad del fluido mediante la cual este ofrece resistencia a los esfuerzos tangenciales o cortantes. La ley de viscosidad de Newton establece que para una tasa baja de deformación angular del fluido, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad
 Figura 2.2 [68]

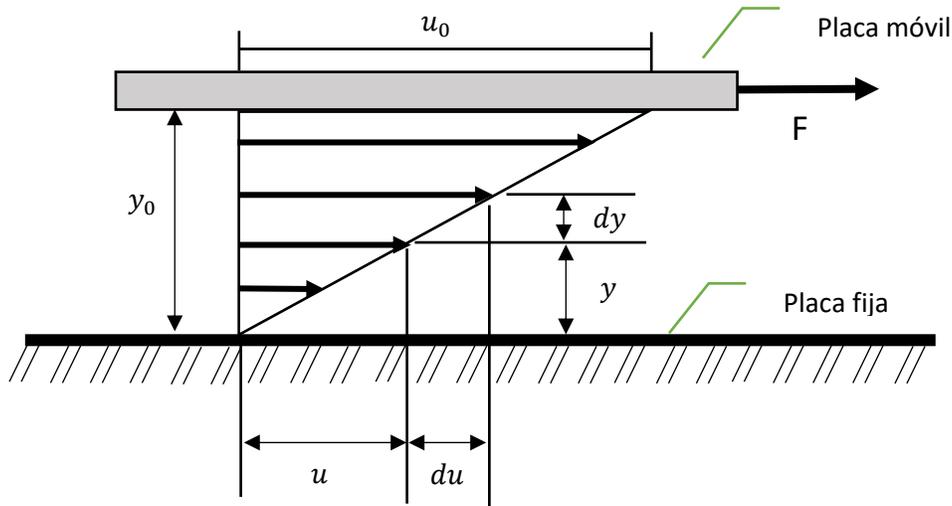


Figura 2.2 Diagrama de Viscosidad

$$F = A\mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2)$$

Donde

F : Fuerza

u : Velocidad

y : Distancia transversal

A : Área de contacto con el fluido

τ : Esfuerzo cortante aplicado al fluido

η : Viscosidad dinámica

Viscosidad dinámica: Es una propiedad que tiene el fluido mediante la cual ofrece una resistencia al esfuerzo cortante, esta varía con la temperatura, aumenta con la temperatura en los

gases y en los líquidos disminuye, pero en algunos casos es independiente de la presión; mientras más denso, más viscoso.

Viscosidad cinemática: Es el cociente entre la viscosidad dinámica de un fluido y su densidad. Esta propiedad para los gases varía mucho con la presión y temperatura, mientras que para los líquidos varían solo con la temperatura.

2.3 DESLIZAMIENTO.

Uno de los parámetros fundamentales necesarios para resolver ecuaciones de mecánica de fluidos es el conocimiento de la velocidad del fluido. Feynman escribió: “Resulta, aunque esto no es en absoluto evidente, que en todas las circunstancias en las que se ha comprobado experimentalmente, la velocidad de un fluido es exactamente cero en la superficie de un sólido” [69].

Sin embargo, para fluidos no newtonianos como los polímeros, varios experimentos han demostrado la existencia de un verdadero deslizamiento en la pared. La extensión del deslizamiento puede ser dependiente de la tensión en estos sistemas. Está claro que, si se pasa de una situación de no deslizamiento a una situación de deslizamiento, la tensión transmitida a la superficie variará en consecuencia [70].

Una forma conveniente de caracterizar el flujo en la pared es introduciendo la longitud de deslizamiento como se ilustra en la Figura 2.3. Esta derivada en la pared es la misma que la pendiente dada por u/\bar{k} . De esta forma, se puede obtener la siguiente relación que involucra la velocidad de deslizamiento [71].

$$\frac{u_p}{\bar{k}} = \left. \frac{du}{dy} \right|_{pared} \quad (3)$$

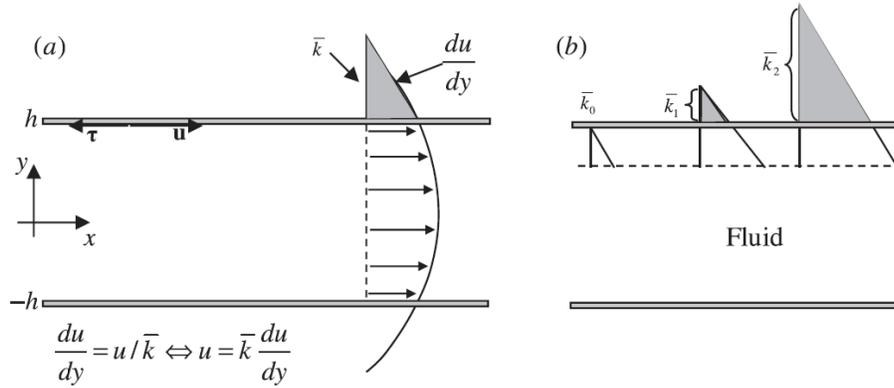


Figura 2.3 Condición de límite de velocidad y longitud de deslizamiento

Donde \mathbf{u} es la velocidad del fluido, \mathbf{y} es la coordenada del \bar{k} es la longitud de deslizamiento.

Resolviendo para la relación entre la velocidad de deslizamiento y el gradiente de velocidad de la pared es

$$\mathbf{u}_p = k \left. \frac{d\mathbf{u}}{d\mathbf{y}} \right|_{pared} \quad (4)$$

Yilmazer et.al. [72] propusieron una ecuación para determinar la velocidad de desplazamiento en función del esfuerzo cortante, viscosidad cinemática y el diámetro de la tubería.

$$\mathbf{u} = \frac{\tau k}{\eta} \left(1 - \left(\frac{k}{D} \right) \right) \quad (5)$$

Donde k es la longitud de deslizamiento o el coeficiente de deslizamiento. Si $k = 0$, entonces se obtiene la condición de límite supuestamente antideslizante. Si k es finito, el deslizamiento de fluido ocurre en la pared, pero su efecto depende de la escala de longitud del flujo [73]. El desplazamiento en función de la viscosidad y el esfuerzo cortante está dado por [74]:

$$\mathbf{k} = \frac{8 \mathbf{u}}{D} + \frac{\tau}{\eta} \quad (6)$$

2.4 FUNDAMENTO DE MECÁNICA DE FLUIDOS.

Las ecuaciones de Navier-Stokes involucra aplicar el principio de conservación de masa, fuerza-momentum y energía al volumen de control teniendo en cuenta lo que sucede en el límite cuando el volumen de control se vuelve infinitamente pequeño, aunque la derivación se puede hacer usando cualquier volumen de control con forma arbitraria por simplicidad consideramos un volumen de control cúbica como se ve en la Figura 2.4 [75].

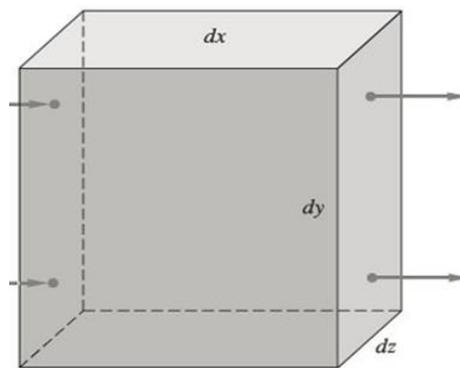


Figura 2.4 Volumen de control cuadrado

2.4.1 CONSERVACIÓN DE LA MASA.

La magnitud que se conserva en este caso es la densidad, ρ . De esta forma, la variación de la masa total contenida en el volumen de control, se puede ver en la Figura 2.5:

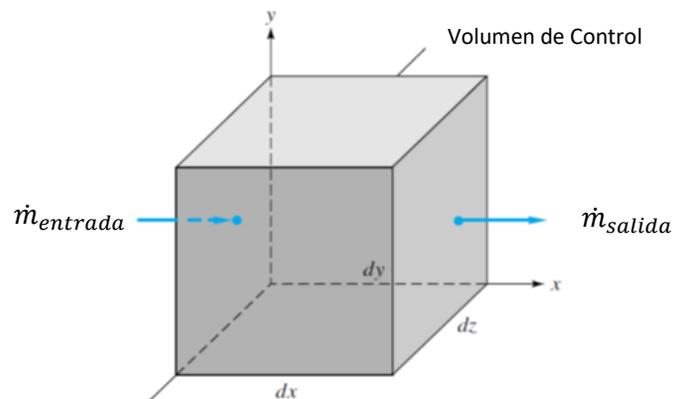


Figura 2.5 Volumen de control mostrando la entrada y salida de flujo másico en x .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV \quad (7)$$

Se considera un flujo másico a través de cada una de las caras del volumen de control (dx,dy,dz) mostrado en la Figura 2.5. [3] El flujo de masa neto que entra al elemento se hace igual a la velocidad de cambio de la masa del elemento, es decir

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{m}_{elemento} \quad (8)$$

Donde $\dot{m}_{entrada}$ y \dot{m}_{salida} son los flujos de masa y $\frac{\partial}{\partial t} \dot{m}_{elemento}$ es la razón de cambio dentro de la frontera del volumen de control.

El flujo másico a través de una superficie fija en el espacio es el producto de la densidad por el área por el componente de velocidad perpendicular a la superficie.

$$\rho(\vec{V})dS \quad (9)$$

Donde \vec{V} es hacia afuera del volumen de control.

En el estado estacionario, no existe fuerza de superficie actuando sobre el dominio. Por lo que la forma general se escribe como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (10)$$

Se introduce ahora el operador gradiente que en coordenadas rectangulares es:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (11)$$

El cual permite reescribir la ecuación de continuidad de forma simplificada de manera que los últimos tres términos de la ecuación son equivalentes a la divergencia del vector $\rho\vec{V}$ por lo tanto:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}) = 0 \quad (12)$$

Donde

- ρ Densidad
- \vec{V} Vector de velocidad
- u, v, w Componentes

2.4.2 CONSERVACIÓN DE FUERZA Y MOMENTUM.

Basándose en la 2ª ley de Newton, expresa que “la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él y es inversamente proporcional a su masa”. El momentum para un elemento infinitesimal dentro del volumen de control es:

$$\sum F = \rho \frac{dV}{dt} dx dy dz \quad (13)$$

La variación dentro del volumen de control es

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV \quad (14)$$

La magnitud que se conserva es el producto de la densidad por la velocidad.

$$\rho \vec{v} = [\rho u, \rho v, \rho w]^T \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x &= \rho u \vec{v} \\ y &= \rho v \vec{v} \\ z &= \rho w \vec{v} \end{aligned} \quad (16)$$

La contribución de flujo convectivo a la ecuación de momentum es:

$$- \int_{\partial V} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dV \quad (17)$$

Se pueden diferenciar dos tipos de fuerzas que actúan en un volumen de control:

- Fuerzas de volumen: son las que actúan directamente sobre la masa del volumen. Por ejemplo, la fuerza de la gravedad, de Coriolis, centrífuga o debidas al campo electromagnético.
- Fuerzas de superficie: son las que actúan directamente sobre la superficie que delimita el volumen de control. Estas fuerzas provienen de dos posibles fuentes: la distribución de presiones y las tensiones normales y tangenciales [76].

La fuerza por unidad de volumen, expresada por $\rho \vec{f}_e$, se corresponde con las fuerzas de volumen, de este modo, la contribución de las fuerzas de volumen a la ecuación de conservación del momento es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{f}_e dV \quad (18)$$

Las fuerzas de superficie están formadas por dos términos como se observa en la Figura 2.6, la componente isótropa de la presión, y un tensor de esfuerzos viscosos, $\bar{\tau}$ es decir

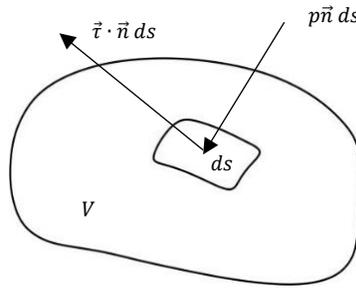


Figura 2.6 Fuerzas actuando en la superficie del volumen de control

$$\bar{Q}_s = -p\bar{I} + \bar{\tau} \quad (19)$$

Donde \bar{I} es el tensor unitario

Sumado todas las contribuciones de acuerdo con el principio general de conservación se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV + \int_{\partial V} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{f}_e dV - \int_{\partial V} \rho \vec{n} dS + \int_{\partial V} (\bar{\tau} \cdot \vec{n}) dS \quad (20)$$

Los esfuerzos viscosos, originados de la interacción entre el fluido y la superficie de un elemento, se representan mediante el tensor de esfuerzos $\bar{\tau}$.

$$\bar{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (21)$$

El tensor de esfuerzos viscosos es función de las propiedades dinámicas del fluido. Para fluidos como el agua, Newton propuso que el tensor de esfuerzos fuera proporcional al gradiente de velocidades. Por otro lado, fluidos como la sangre o el petróleo se comportan de manera muy distinta y son conocidos como fluidos no newtonianos.

Las componentes del tensor de esfuerzos viscosos quedan:

$$\begin{aligned}
 \tau_{xx} &= 2\eta \frac{\partial u}{\partial x} \\
 \tau_{yy} &= 2\eta \frac{\partial v}{\partial y} \\
 \tau_{zz} &= 2\eta \frac{\partial w}{\partial z} \\
 \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\
 \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \eta \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\
 \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \eta \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

2.4.3 CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.

Principio en el que se basa la ecuación de la energía es el primer principio de la termodinámica. La energía total por unidad de masa, E , de un fluido se obtiene añadiéndole a la energía por unidad de masa, e , un término correspondiente a la energía cinética por unidad de masa, $\frac{|\vec{v}|^2}{2}$. De este modo, podemos escribir la energía total como:

$$E_m = e + \frac{|\vec{v}|^2}{2} = e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \tag{23}$$

La energía por unidad de volumen total se expresa como

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E_m dV \quad (24)$$

En la ecuación general de conservación, se puede expresar la contribución al término convectivo como:

$$\int_{\partial V} \rho E_m (\vec{v} \cdot \vec{n}) d\Omega \quad (25)$$

2.4.4 SISTEMA COMPLETO DE NAVIER-STOKES.

Teniendo las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de momentum y energía por separado, lo que procede es agruparlas en un único sistema de ecuaciones para tener una mejor visión de todos los términos involucrados.

Se define un vector de variables, \vec{W} que se expresa:

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix} \quad (26)$$

Además, se definen dos vectores de flujos \vec{F}_v el cual es el vector de flujos viscosos, que contiene los esfuerzos viscosos y la difusión de calor; matemáticamente se expresa:

$$\vec{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ n_x \tau_{xx} + n_y \tau_{xy} + n_z \tau_{xz} \\ n_x \tau_{yx} + n_y \tau_{yy} + n_z \tau_{yz} \\ n_x \tau_{zx} + n_y \tau_{zy} + n_z \tau_{zz} \\ n_x \theta_x + n_y \theta_y + n_z \theta_z \end{bmatrix} \quad (27)$$

Donde n_i son las componentes del vector normal.

$$\begin{aligned} \theta_x &= u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} + k \frac{\partial T}{\partial x} \\ \theta_y &= u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} + k \frac{\partial T}{\partial y} \\ \theta_z &= u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} + k \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (28)$$

Se define un vector, \vec{Q} que engloba a aquellas fuentes debidas a fuerzas de volumen y generación de calor en el volumen fluido:

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho f_{e,x} \\ \rho f_{e,y} \\ \rho f_{e,z} \\ \rho f_e \cdot \vec{v} + \dot{q}h \end{bmatrix} \quad (29)$$

Ecuación general de Navier-Stokes para un fluido queda como. [76]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{W} dV + \int_{\partial V} (\vec{f}v) ds = \int_V \vec{Q} dV \quad (30)$$

2.5 MODELADOS DE LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES (RANS).

La turbulencia es uno de los fenómenos muy complejos que involucra diferentes variables, sin embargo, las ecuaciones de Navier Stokes siguen siendo válido, por ende, estas ecuaciones son aplicables al flujo turbulento. Sin embargo, su solución numérica para el estudio de flujo turbulento involucra mucho tiempo de cómputo e inestabilidad numérica.

Con los avances tecnológicos actuales, las computadoras han logrado un gran avance en la solución numérica eficiente de estas ecuaciones, dando lugar a la dinámica de fluidos computacionales CFD; existen tres técnicas principales de solución.

La solución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes, denominado técnica DNS (Direct Numerical Simulation), es la más exacta de predecir un fluido turbulento, se resuelven todas las escalas espaciales y temporales del fluido turbulento sin aproximaciones. Su desventaja está en los altos costos computacionales a causa del mado superfino que requiere, por lo que queda limitado a geometrías sencillas y Reynolds relativamente bajos.

Técnica LES (Large Eddy Simulation) es la más adecuada para fluidos turbulentos con torbellinos grandes está basado en promediar volumétricamente las ecuaciones de Navier-Stokes pro los que es posible involucrar volumen de control relativamente grande, sin embargo, los incrementos en el tiempo tienden a ser muy pequeños demandando altos tiempos de cómputo.

La técnica que se utiliza con más frecuencia en aplicaciones de ingeniería para predecir flujo turbulento es la de promedio de Reynolds de las ecuaciones de Navier -Stokes denominado técnica RANS, la cual consiste en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo descomponiendo cada variable instantánea del campo turbulento en dos componentes (un valor medio y otro fluctuante), lo cual permite usar mayas temporales burdas, pero se requiere mallas espaciales finas, especialmente en la región de la capa límite y de fuertes gradientes de variables [77].

En la técnica RANS los modelos de turbulencia se dividen en 3 como se observa en el Diagrama 2.1 los cuales son: a) modelo de esfuerzo de Reynolds (RMS), b) modelo de esfuerzo algebraico (ASM) y c) modelo de remolinos de viscosidad (EVM). Estos últimos consisten a su vez de modelos de cero, una y dos ecuaciones, específicamente el modelo $k-\epsilon$, el cual es considerado el mejor para este tipo de estudios.

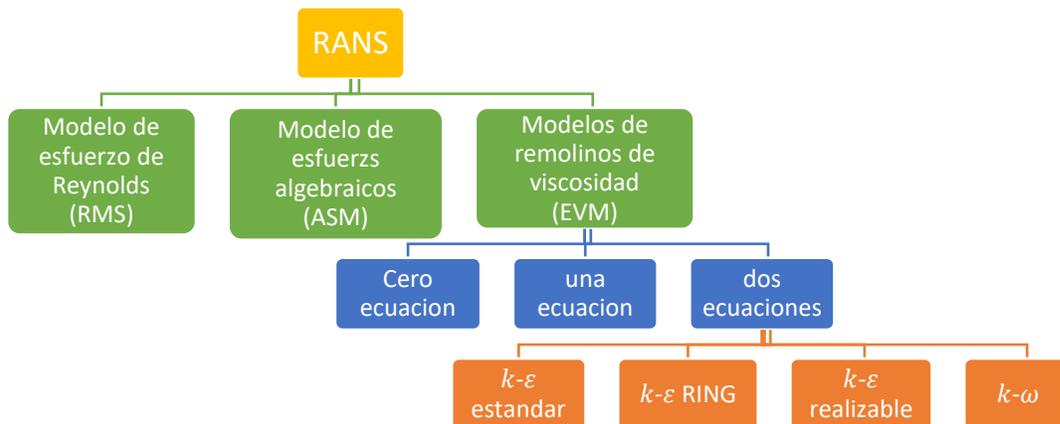


Diagrama 2.1 Modelo de la técnica RANS

El modelo EVM establece que el tensor de esfuerzo turbulento de Reynolds es proporcional a los gradientes de velocidad media a través de una viscosidad turbulenta (μ_t). Esta relación se expresa matemáticamente como:

La ecuación de continuidad en forma diferencial es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = s_m \quad (31)$$

Conservación de momentum [78]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \vec{v} = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + F \quad (32)$$

2.5.1 MODELO k - ε .

El modelo de dos ecuaciones es el modelo de turbulencia más práctico y simple. En este modelo, las escalas de longitud y la velocidad turbulenta se calculan independientemente utilizando la solución de diferentes ecuaciones de transporte. El modelo estándar de k - ε se ha convertido en el modelo de turbulencia ampliamente utilizado para la solución de problemas prácticos de flujo de ingeniería [79].

Dicho modelo es un modelo semiempírico basado en ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética de turbulencia k y su tasa de disipación ε . La ecuación de transporte modelo para k se deriva de la ecuación exacta, mientras que la ecuación de transporte modelo para ε se obtuvo utilizando el razonamiento físico y tiene poca semejanza con su contraparte matemáticamente exacta [80].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (33)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (34)$$

Modelo de viscosidad turbulenta.

$$\eta_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (35)$$

2.6 TRATAMIENTO DE PARED.

Para realizar la simulación de manera correcta es necesario conocer detalladamente la física del flujo en la cercanía de la pared. El tratamiento de pared es un método de modelado cerca de la pared que combina un modelo de dos capas con funciones de pared mejoradas. La complejidad del problema se centra en la capa límite turbulenta. Esta puede dividirse en tres regiones en función del tipo de esfuerzo dominante. La primera región en contacto directo con la superficie de la pared, se conoce como subcapa viscosa o laminar y se caracteriza por estar altamente influenciada por la viscosidad. Luego de la subcapa viscosa el efecto de la turbulencia es evidente. Esta región se conoce como zona de amortiguación y finalmente existe una zona completamente afectada por las turbulencias denominadas zona turbulenta [81]

Se utiliza una relación de ecuación para evaluar la subcapa laminar con malla fina y la transición a la función de registro bajo para la parte turbulenta de la capa límite. Es común expresar la función de pared en forma adimensional en función de y^+ que se define como:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (36)$$

Donde

u_τ : Velocidad de esfuerzo cortante $\left(= \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \right)$

2.6.1 MODELO DE DOS CAPAS PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO DE LA PARED.

En el modelo cercano a la pared, la región cercana a la pared afectada por la viscosidad está completamente determinada hasta la subcapa viscosa. El método de dos capas es una parte integral del tratamiento mejorado de la pared y se usa para especificar ϵ y la viscosidad turbulenta en las celdas cercanas a la pared. La separación de las dos regiones se expresa mediante un número de Reynolds turbulento basado en la distancia de la pared, Re_y , definido como [80].

$$Re_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (37)$$

$$y = \frac{\min_{r_w \in \Gamma_W} \|\vec{r} - \vec{r}_w\|}{\epsilon} \quad (38)$$

Esta descripción permite que se explique exclusivamente en dominios de flujo de forma compleja, incluyendo múltiples paredes. Además, y definida de tal manera es independiente del tipo de malla utilizada, y es definible incluso en mallas no estructuradas.

2.7 ENERGÍA LIBRE SUPERFICIAL.

La energía libre superficial γ se define como la energía necesaria para romper los enlaces intermoleculares dando lugar a una superficie. Para efectos de análisis se considera que la energía de superficie es función de la resistencia mecánica del material y la fuerza de los enlaces entre sus elementos. Por esto, se espera que elevados valores de energía de superficie estén asociados a elevadas fuerzas de enlace y se expresa como [82].

$$\gamma = \frac{E a_0}{10} \quad (39)$$

Donde

γ = Energía libre superficial

E = Módulo de elasticidad del material.

a_0 = Separación ente los centros de iones del material

2.8 ADHESIÓN.

La adhesión es un fenómeno que se da cuando dos superficies se encuentran en contacto bajo la acción de una carga normal o bajo una carga combinada, normal o cortante; este fenómeno se puede dar entre un sólido-sólido o en un sólido-líquido [83].

La ASTM define a la adhesión como “la condición en la que dos superficies se mantiene unidas. Esta puede ser, por fuerzas de Valencia, por un ancla mecánica o por una combinación de estas”. Las fuerzas de unión pueden ser de Van der Waals, electrostáticas, y lo de lazo químico [57].

2.9 TRABAJO DE ADHESIÓN.

El trabajo de adhesión está en función de las energías superficiales de los cuerpos en contacto. Se define como la suma de todas las fuerzas intermoleculares que se encuentran en la superficie de un material, es decir el grado de atracción o repulsión que la superficie de un material ejerce sobre otro [84].

Cuando un enlace es formado entre dos materiales con energía de superficie γ_1 para un material y γ_2 para el segundo material, la energía de superficie de la interfaz por unidad de área cambia a γ_{12} . Este cambio de energía de adhesión por unidad de área, puede expresarse con la Ecuación de Young-Dupre.

$$W_{adh} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (40)$$

2.10 TRIBOLOGÍA.

La fricción es un fenómeno que se compone de tres contribuciones: adhesión interfacial entre asperezas en contacto, acción cortante de la película del fluido viscoso y la deformación durante el movimiento relativo [85].

Si se considera dos materiales en contacto, algunas regiones en su superficie estarán muy cercana una de otras y algunas muy separadas como se muestra en la Figura 2.7 Superficie rugosa en contacto directo b) Plano normal a la interfaz que muestra el área real total entre las dos superficies. es posible asumir que la suma de todas las interacciones que toman lugar en esta región de contacto entre la superficie y en las cuales existen contacto átomo-átomo, corresponde al área real de contacto y se puede expresar matemáticamente como [86].

$$A_r = \frac{N}{\sigma_f} \quad (41)$$

Donde A_r es el área real de contacto a determinada carga normal, N es la carga normal aplicada y σ_f es el esfuerzo último del material.

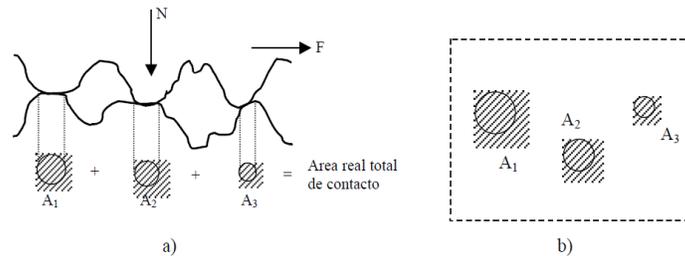


Figura 2.7 Superficie rugosa en contacto directo b) Plano normal a la interfaz que muestra el área real total entre las dos superficies.

Para el caso de superficies en contacto, las asperezas se encuentran deformadas dentro del rango plástico, al aumentar la carga, el área de contacto debe incrementar en igual proporción para mantener una presión constante. El área de contacto real depende del número de puntos en contacto n y del área de contacto de cada punto a_i .

$$A_r = n a_i \quad (42)$$

El radio que considera los efectos de adhesión, está en función del radio de contacto r por efecto de carga normal y de la componente de adhesión y , teniendo:

$$r_{adh} = (r^2 + y^2)^{1/2} + y \quad (43)$$

$$y = \frac{W_{adh} \cot \theta}{H_m} \quad (44)$$

Área real de contacto en función de la adhesión se expresa como:

$$A_{adh} = \pi r_{adh}^2 \quad (45)$$

Si el sistema en contacto se encuentra bajo la acción de una carga normal N y una carga tangencial F , el área de contacto real para cada aspereza se incrementa. Por tanto, el área real de contacto plástico que considera los efectos de deslizamiento y adhesión se considera como [87]:

$$A_{com} = A_{adh} \left[1 + \alpha_c \left(\frac{F}{N} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (46)$$

El radio de contacto por carga combinada está dado por:

$$r_{com} = \left(\frac{A_{com}}{\pi} \right)^{1/2} \quad (47)$$

Con la relación de deformación y radio de contacto se puede obtener el ángulo de contacto promedio de las asperezas superficiales:

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{\delta}{a} \quad (48)$$

Coefficiente de fricción que considera los efectos de adhesión en la interfaz sólido-sólido se expresa como:

$$\mu = \frac{\tau}{H_m - \frac{2W_{adh} \text{Cot}\theta}{r_{com}}} \quad (49)$$

Dónde:

- μ . Coeficiente de fricción
- τ . Esfuerzo cortante
- H_m . Dureza del material
- W_{adh} . Trabajo de adhesión
- θ . Ángulo de contacto
- r_{ab} . Radio de adhesión

Durante el proceso de triboadhesión se genera calor ente la superficie del sustrato y la superficie de la fresa de algodón, por la fricción generado entre ellos, este proceso de generación de calor por fricción entre las dos superficies con movimiento relativo entre si requiere de parámetros adimensionales de la velocidad, ya que estos son los que denotan la generación instantánea de calor.

$$L = \frac{vr}{2\alpha} \quad (50)$$

Donde

- L . Número adimensional de Peclet
- v . Velocidad del cuerpo
- r . Radio de cuerpo
- α . Difusividad térmica

La partición de calor que se genera durante la fricción depende esencialmente de las propiedades térmicas de los materiales y de las condiciones de operación. La fracción de calor que se transfiere a cada cuerpo es determinada con base en el criterio de que la temperatura superficial promedio es la misma en el área real de contacto el calor que se genera en la interfase se divide entonces en diferentes proporciones a cada uno de los elementos del sistema que están en contacto [88].

$$\lambda = \frac{1}{\frac{(\rho c_p v)_s}{(\rho c_p v)_f} \sqrt{\frac{(L_f)}{(L_s)} + 1}} \quad (51)$$

- λ . Función de partición de calor
- ρ . Densidad
- c_p . Calor específico
- v . Velocidad tangencial
- L_f . Peclet de la fresa
- L_s . Peclet del sustrato

La función de partición de calor permite calcular el calor para cada uno de los elementos a partir del calor total generado por la fricción en función de una carga normal y la velocidad tangencial en el punto de contacto [88].

$$Q_t = \mu v N \quad (52)$$

Donde Q_t es el calor total generado por la fricción, μ es el coeficiente de fricción v es la velocidad tangencial en la interfase y N es la carga normal.

Para determinar el calor generado por la fresa se tiene la ecuación

$$Q_f = \lambda Q_t \quad (53)$$

Q_f Calor generado por la fresa

Y para poder determinar el calor generado por el sustrato se tiene

$$Q_s = (1 - \lambda)Q_t \quad (54)$$

Q_s Calor generado por el sustrato

Para expresar la temperatura superficial promedio como una función del número de Peclet (L), y el calor superficial de cada elemento (Q_s y Q_f), se tiene la siguiente ecuación para la superficie del sustrato [89]:

$$T_s = \frac{Q_s}{\pi \sqrt{(\sqrt{r^3 k p C_p V})_s}} \quad (55)$$

Para la fresa de algodón se tiene que:

$$T_f = \frac{Q_f}{\pi \sqrt{(\sqrt{r^3 k p C_p V})_f}} \quad (56)$$

2.11 CONDICIÓN DE DESLIZAMIENTO EN LA INTERFASE SÓLIDO LÍQUIDO.

De acuerdo con Rabinowicz, al considerar una partícula esférica de radio R que se sumerge dentro de un fluido una distancia x , y se genera trabajo para sobrellevar la presión del fluido como se muestra en la Figura 2.8, se introduce la ecuación de energía de superficie libre, la cual contiene la suma de las energías libres que interactúan en las superficies, donde se obtienen las siguientes ecuaciones [90].

$$G = 2\pi R x (\sigma + \gamma_{ab}) - 2\pi R x^2 P \quad (57)$$

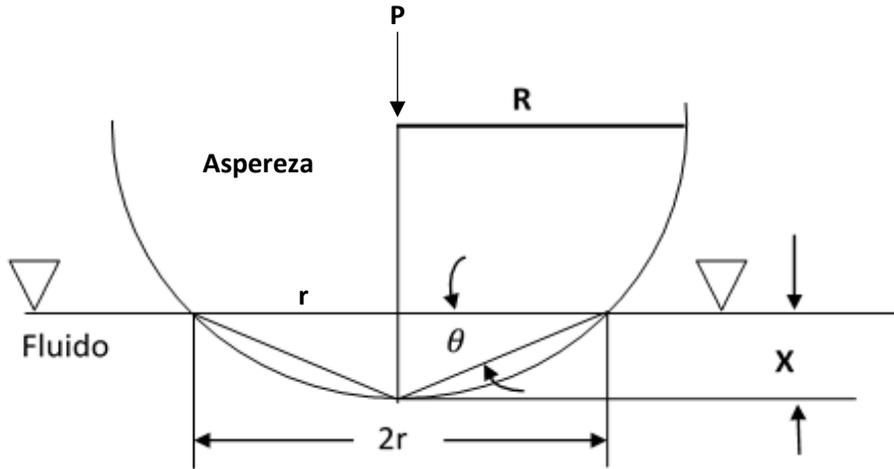


Figura 2.8 Rugosidad esférica dentro de un fluido

Donde G es la energía total del sistema sobre la superficie, P es la presión que se ejerce por el fluido, σ es la tensión superficial, γ_{ab} es la energía de adhesión entre los dos materiales y R es el radio de la rugosidad y x es la distancia para que el fluido adquiera la forma de la rugosidad. Cuando el fluido adquiere la forma de las asperezas la derivada de G es cero. Al despejar la presión e introducir la ecuación de coeficiente de fricción se obtiene el coeficiente de fricción en la interfaz sólido-liquido el cual está dado por [91]:

$$f = \frac{\tau \cot^2 \theta}{\frac{3}{4} \left(\frac{\sigma + \gamma}{R} \right)} \quad (58)$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, σ es la tensión superficial, γ es la energía de adhesión entre los dos materiales, R es el radio de la rugosidad y θ es el ángulo de contacto.

Se puede reducir la ecuación (58) y se obtiene:

$$f_{ad} = \tau k_{ad} \quad (59)$$

Para determinar la velocidad de deslizamiento se describe un perfil rectangular por medio de

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (h - y)y \quad (60)$$

El esfuerzo cortante con condición de deslizamiento se expresa por:

$$\tau = k_{ad}\mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (61)$$

Al derivar la velocidad con respecto a y se tiene:

$$\tau = k_{ad}\mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (h-y)y \right) \quad (62)$$

Al sustituir la ecuación (59) en (61) se obtiene:

$$f_{ad} = k_{ad} \frac{1}{2} \frac{\partial P}{\partial x} (h-2y) \quad (63)$$

Por lo tanto, la velocidad de deslizamiento es [62]:

$$U_s = \frac{\tau h}{f_{ad}\mu} \quad (64)$$

2.12 PÉRDIDAS EN TUBERÍAS.

Representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo de un conducto por efecto del rozamiento. Este rozamiento es debido a la viscosidad de los fluidos reales, ya que en su movimiento aparecen fuerzas cortantes entre las partículas fluidas y las paredes del contorno y entre las diferentes capas del fluido, lo que permite, que en un tramo de conducción de fluido haya pérdida de energía. A medida que un fluido se desplaza por un conducto forzado ocurren pérdidas de energía debido a la fricción, entre las mismas partículas de líquido y entre el líquido con las paredes de la tubería. Osborne Reynolds con base en sus experimentos fue el primero que propuso evaluar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre la inercia, el cual se define mediante la ecuación.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (65)$$

Se consideran 3 factores que influyen en las pérdidas por fricción los cuales son:

- Características del fluido: densidad y viscosidad.
- Características de la tubería: diámetro interior, rugosidad y longitud.
- Característica del flujo: velocidad y número de Reynolds.

Por lo tanto, la pérdida de carga por fricción depende de la longitud, diámetro, velocidad, viscosidad, densidad y rugosidad.

La ecuación de Darcy – Weisbach es considerada como la ecuación universal de pérdidas de carga en conductos cerrados, ya que tiene una amplia fundamentación al ser dimensionalmente homogénea con una buena precisión en sus resultados en comparación con otras de su mismo género y se deduce analíticamente. La variable “ f ” se determina en forma experimental o a través de otras ecuaciones, y depende de la turbulencia del flujo y de la rugosidad de las paredes en contacto. Esta ecuación es válida para cualquier tipo de tubo y flujo.

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (66)$$

Donde

- f . Fricción
- L . Longitud de la tubería
- D . Diámetro de la tubería
- v . Velocidad del fluido
- g . Constante gravitacional.

Considerando la ecuación (58), con la cual se determina el coeficiente de fricción considerando las fuerzas de adhesión entre la pared y el fluido se puede obtener la pérdida por fricción en la tubería.

2.13 LEYES DE SEMEJANZA.

No siempre se puede realizar las pruebas con el mismo material que se tiene de modelo, por ello existen las leyes de semejanza la cual es una herramienta para analizar el comportamiento de un modelo, ya sea para comparar entre una misma familia geoméricamente semejante o para analizar una de ellas cuando se la hace funcionar en condiciones diferentes. Por ello no es necesario realizar el ensayo con el mismo fluido que utilice el prototipo. El agua y el aire son los fluidos que generalmente se utilizan para los prototipos, y los modelos se hacen de diversos materiales como madera, escayola, metales, hormigón, plástico o etc.

Dos corrientes fluidas son semejantes cuando las líneas de flujo de una lo sean respecto a las homólogas de la otra; diremos entonces que existe semejanza cinemática. Para ello es necesario [92].

a) Semejanza geométrica.

$$\frac{l_p}{l_m} = \lambda; \frac{l_p^2}{l_m^2} = \lambda^2; \frac{l_p^3}{l_m^3} = \lambda^3 \quad (67)$$

Siendo λ la escala.

b) Semejanza dinámica. Las fuerzas en puntos homólogos han de ser semejantes: siendo λ la escala.

$$Re_p = Re; Fr_p = Fr_e; Ma_p = Ma_e; We_p = We_m \quad (68)$$

Donde

Re es el número de Reynolds.

Fr es el número de Froude.

Ma es el número de Mach.

We es el número de Webwer.

Cuando el predomina la fuerza de viscosidad se utiliza la semejanza de Reynolds.

$$Re_p = Re_m \quad (69)$$

$$\frac{l_p \cdot u_p}{v_p} = \frac{l_m \cdot u_m}{v_m}; \frac{u_p}{u_m} = \frac{v_p}{v_m} \cdot \frac{1}{l_p/l_m} \quad (70)$$

$$\frac{u_p}{u_m} = \frac{v_p}{v_m} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (71)$$

CAPÍTULO III

MODELADO Y EXPERIMENTACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se muestran las propiedades de los materiales a analizar, así como el modelo de elemento finito, los datos de entrada y las condiciones de frontera de los sistemas.

3.2 DESCRIPCIÓN DE FLUENT.

Fluent es una herramienta para el análisis, cálculo y diseño de sistemas. Su principal propósito es modelar fluidos, turbulencias, reacciones químicas y transferencia de calor para aplicaciones industriales. Todo esto se realiza mediante un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento del fluido como son las ecuaciones de Navier-Stokes descritas en el capítulo II. Fluent utiliza el método de volumen finito (MVF) para convertir las ecuaciones en derivadas parciales de conservación en ecuaciones algebraicas que puedan ser resueltas numéricamente.

El punto de partida del método de volúmenes finitos es la descomposición del dominio en pequeños volúmenes de control (VC) donde las variables son almacenadas en los nodos. Usualmente, los volúmenes de control y los nodos son definidos con una malla numérica. Los nodos, donde se guardan las variables a resolver, se ubican en los vértices de esta malla o en los centros de los volúmenes, y es la referencia con la que se cuenta para aproximar la solución en el resto del dominio. Después de haber definido los VC, las ecuaciones de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen. En este proceso el teorema de la divergencia de Gauss es usado para convertir integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de superficie. El proceso para la simulación se presenta en el siguiente diagrama.

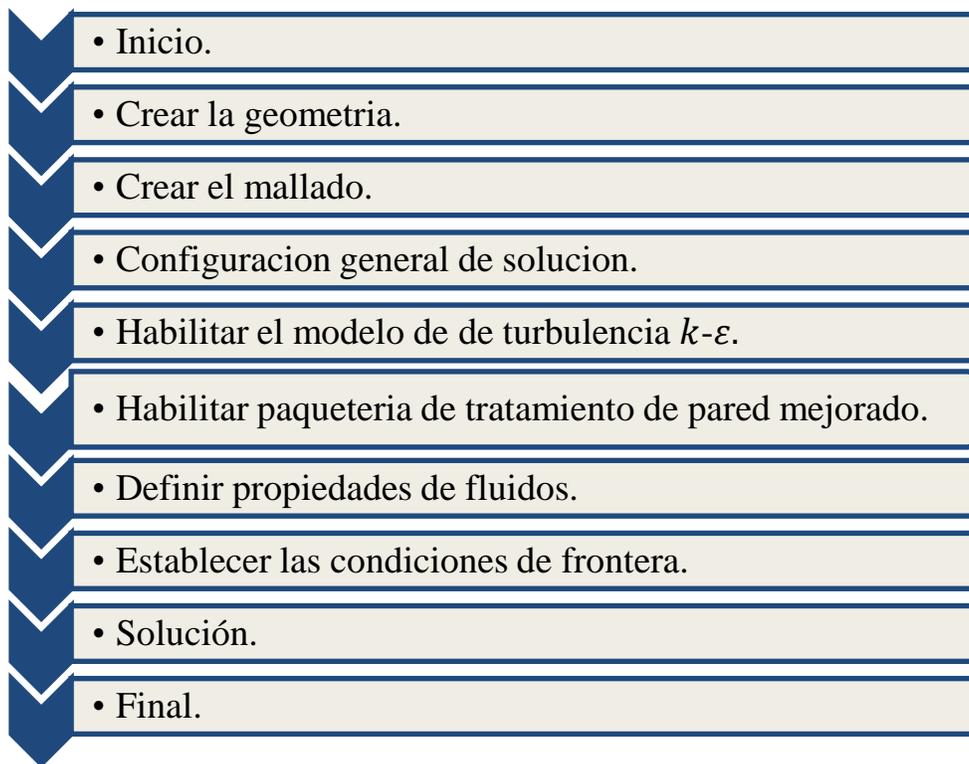


Diagrama 3.2 Proceso de solución del modelado numérico en CFD

3.3 MATERIALES Y PROPIEDADES.

Se analizarán dos sistemas con materiales y fluidos diferentes, el primer sistema son los tubos de acero x52 los cuales son lo que se utilizan en la industria petrolera y como fluido el petróleo, el segundo es un stent de acero inoxidable y como fluido la sangre. Por ello es necesario conocer sus propiedades de cada uno, además se realizará un análisis del recubrimiento de la tubería y el stent con polvo de diamante tipo carbono (DLC), por lo que es importante conocer sus propiedades y poder analizar el efecto que causa el recubrimiento de DLC.

3.3.1 DIAMANTE TIPO CARBÓN.

Una alta dureza, una gran resistencia al desgaste, un bajo coeficiente de fricción y gran resistencia a la corrosión favorecen la aplicación de diamante tipo carbón (DLC) como

revestimiento, además de ser un material con un alto módulo de elasticidad, sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 3.1 [93].

Las películas DLC son duras, amorfas, con una fracción significativa de los átomos de carbono sp³-hibridizados y que puede contener una cantidad significativa de hidrógeno. Dependiendo de las condiciones de deposición, estas películas pueden ser completamente amorfas o contener diamante cristalino [94]. Las películas DLC típicamente tienen un coeficiente de fricción de $\mu \leq 0.2$.

Tabla 3.1 Propiedades del diamante tipo carbón [93] [94].

Densidad	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último	Dureza	Energía superficial	Poisson
2200 kg/m³	800 GPa	4.5 GPa	20 GPa	20.80 J/m ²	0.20

3.3.2 ACERO AL CARBÓN.

Los aceros al carbono son aleaciones hierro-carbono con un porcentaje en peso de carbono desde un 0.003 a un 1.2 %, e incorporan manganeso de un 0.25 a un 1 %, de este se derivan varios tipos de acero dependiendo del uso que se le vaya a dar y de las propiedades [95].

Para el caso de las tuberías de transporte de ductos existen una serie de normas que se deben de cumplir para poder ser utilizado, uno de las tuberías aceptadas por las normas de Pemex son los acero al carbón grado X52 API 5l los cuales por sus propiedades soportan alta presión y altamente resistente a la corrosión producido por los productos químicos del petróleo sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Propiedades de acero al carbón X52 API 5L [96] [97].

Densidad	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último	Dureza	Energía superficial	Poisson
7850 kg/m³	210 GPa	455 MPa	200 GPa	8 J/m ²	0.3

El acero utilizado en para la fabricación de los stents son de acero inoxidable 316 LVM, el cual es altamente resistente a la oxidación, antialérgico, biocompatible y tiene una alta dureza su principal propiedad mecánica se encuentra en la *Tabla 3.3*.

Tabla 3.3 Propiedades del stent [98].

Densidad	Módulo de elasticidad	Esfuerzo último	Dureza	Energía superficial	Poisson
7850 kg/m ³	193 GPa	550 MPa	300 GPa	8 J/m ²	0.3

3.3.3 PETRÓLEO CRUDO MAYA.

El petróleo se refiere a los recursos naturales no renovables. Actualmente, es la principal fuente de energía en los países desarrollados; el petróleo líquido puede presentarse, en yacimientos que han estado enterrados durante millones de años, cubiertos por los estratos superiores de la corteza terrestre. Son hidrocarburos pesados, los cuales son compuestos orgánicos, que se obtienen de la extracción de la perforación de pozos [99].

En México existen cuatro principales pozos petroleros los cuales son: Altamirano, Istmo, Olmeca y Maya; siendo el petróleo de la zona maya la más influente en el país por lo que se toma las propiedades físicas y se reflejan en la *Tabla 3.4*.

Tabla 3.4 Propiedades del crudo Maya [100], [101] [102].

Material	Densidad	Energía Sup.	radio molecular	viscosidad dinámica	tensión superficial
	Kg/m ³	J/m ²	m	pas.s	N/m
Petróleo	927	8.56	1.54X10 ⁻¹⁰	86.7	0.0309

3.3.4 SANGRE.

La sangre es tejido vivo formado por líquidos y sólidos. La parte líquida, llamada plasma, contiene agua, sales y proteínas. Más de la mitad del cuerpo es plasma. La parte sólida de la sangre contiene glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas. Debido a la composición de la

sangre, realizar un análisis, es un poco complicado, pero existen métodos y modelos para la simulación de la sangre como el modelo propuesto por Jorge Leiva et al [103]. Con base en el modelo se observan algunas de las propiedades de la sangre en la *Tabla 3.5* las cuales son a una temperatura de 37 °C la cual es la temperatura del cuerpo.

Tabla 3.5 Propiedades de la sangre [104] [105].

Material	Densidad	Energía Sup.	radio molecular	viscosidad dinámica	tensión superficial
	Kg/m ³	Kg/m ³	J/m ²	pas.s	N/m
Sangre	1050	50.5	7.90X10 ⁻⁰⁹	44.0	.0560

3.4 ANÁLISIS NUMÉRICO.

La Figura 3.1 muestra un esquema para el modelado de tubería con recubrimiento, el cual consta de un material base representado con una franja negra, siendo acero x52 para la tubería de petróleo y acero inoxidable para el caso del stent, la parte roja representa el recubrimiento por triboadhesión en este caso el recubrimiento se realizó con diamante tipo carbono (DLC) y se proporciona la velocidad y el caudal como datos de entrada y se obtiene la presión y velocidad de salida.



Figura 3.1 Modelo para simulación

En Figura 3.2 se muestra la geometría física de un stent y la Figura 3.3 la geometría de un ducto de petróleo, sobre los cuales se realizará un análisis sin recubrimiento y con un recubrimiento de DLC sobre la superficie interna de cada una.

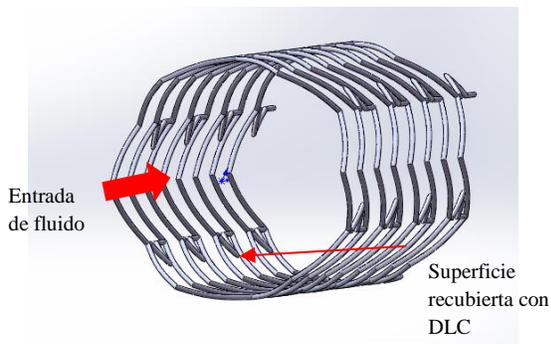


Figura 3.2 Geometría del stent

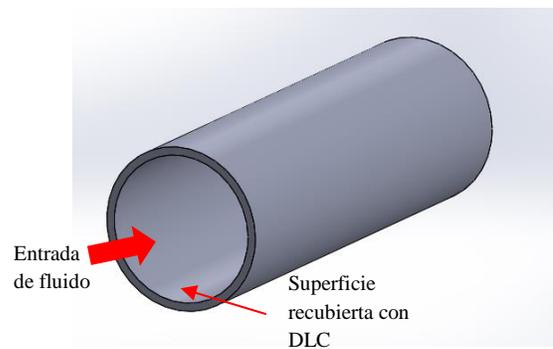


Figura 3.3 Geometría de tubería para petróleo

3.5 SIMULACIÓN NUMÉRICA STENT.

El análisis de simulación numérica se realizó en el programa Fluent de ANSYS 18, para el análisis del stent se basó en el dibujo completo del stent, a causa de los altos tiempos de cómputo para el análisis de la geometría completa del stent se optó por realizar una simulación de una porción del stent de la zona de interés específico la cual representa la parte marcada con el círculo rojo (Figura 3.4). Estos son conocidos como strut y los espacios entre los strut los cuales se consideró como tejido para poder realizar la simulación, del stent dentro de la vena.

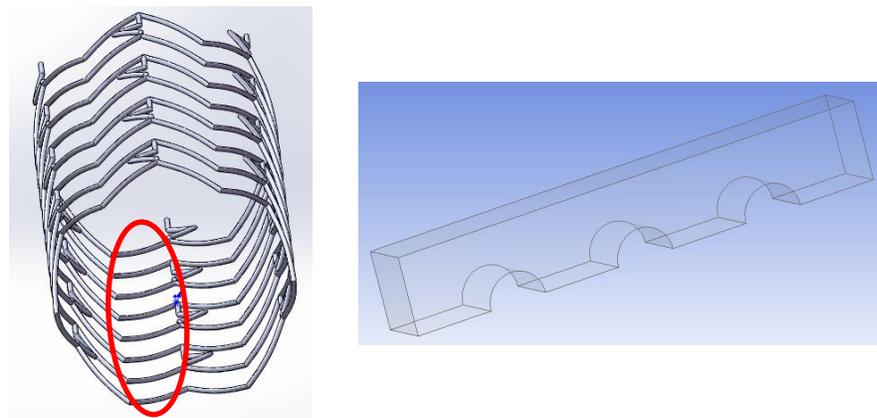


Figura 3.4 Geometría del stent para la simulación

Se asignaron las propiedades de cada uno de los materiales, para el stent se consideró acero inoxidable grado quirúrgico y como fluido se consideró sangre, se asignaron las condiciones de

frontera ente el stent y la sangre, en la Tabla 3.6 se muestran los valores de entrada para la simulación numérica como es el valor de la velocidad, el caudal [104] área de la sección transversal, número de nodos del mallado y número de elementos.

Tabla 3.6 Valores de entrada para simulación del stent

Datos	Valores
Velocidad de entrada	0.0983 m/s
Caudal	4940 mm ³ /s
Diámetro	8 mm
Área de sección transversal	50.3 m ²
Nodos	456212
Elementos	425852

En la Figura 3.5 se muestra el mallado de la geometría, la cual es hexaédricas no estructuradas a cauda de los arcos que existen en la geometría; con este tipo de mallado se obtiene mayor precisión de los resultados y el tiempo de cálculo es mucho menor; se requiere un análisis más preciso sobre la capa límite el cual es donde interactúa el fluido con la superficie; en los arcos que representan los strut de los stent, se realizó un mallado más fino para tener mayor precisión en los datos obtenidos, ya que es la zona en la cual se estudiara el fenómeno de fricción y adhesión en la Figura 3.6.se muestra la zona en la cual se realizó un mallado más fino

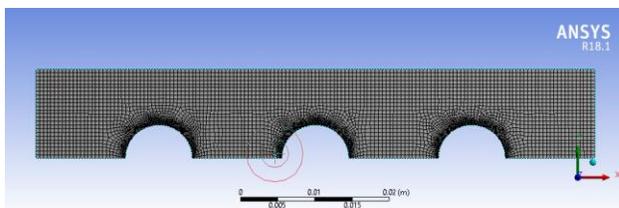


Figura 3.5 Mallado de la geometría

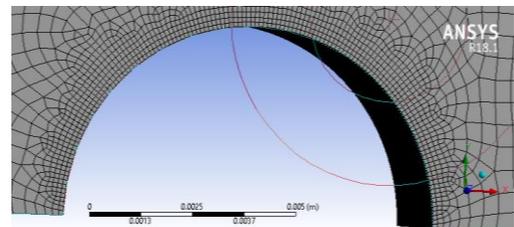
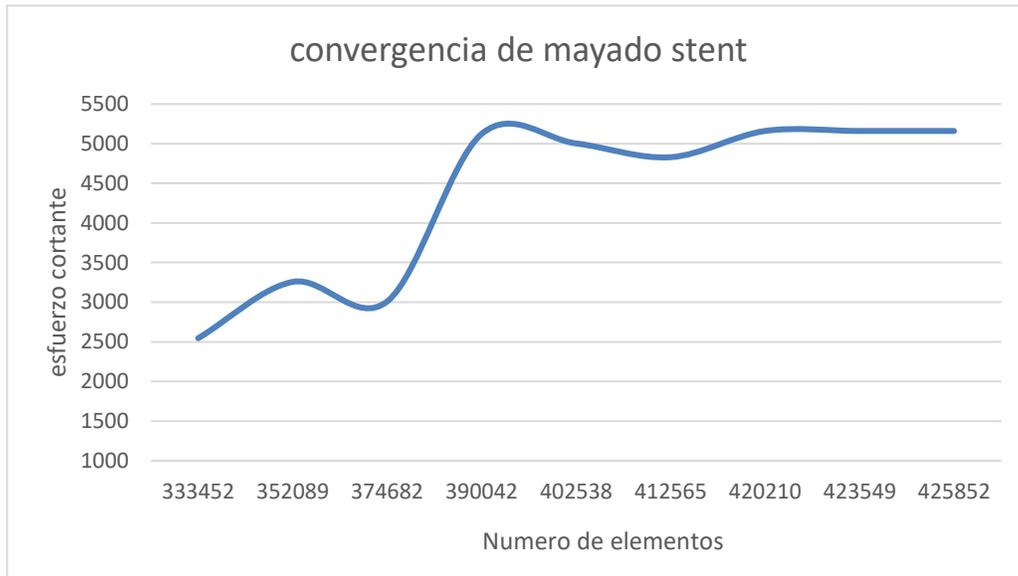


Figura 3.6 Mallado más fino del stent, para obtener resultados más precisos.

En la Gráfica 3. 1 se observa el comportamiento de los esfuerzos cortante dependiendo del número de nodos que hay en el mallado. Se consideró los esfuerzos cortantes para ver la variación de la simulación, ya que una de las magnitudes principales que influyen en las pérdidas de energía en tuberías, se puede observar que a partir de los 333,452 nodos comienza a aumentar hasta llegar a los 352,089, de ahí desciende hasta los 374,682 nodos y vuelve a aumentar hasta

los 390,042 nodos luego tiene un pequeño descenso en los valores hasta los 412,565 nodos que empieza un pequeño incremento hasta los 412,565 nodos y a los 423,549 empieza estabilizarse con pequeñas variaciones hasta los 456,212 elementos donde deja de existir variación en los valores de esfuerzo por lo que se considera que a partir de ese número de nodos ya no hay



Gráfica 3.1 Convergencia del mallado en stent

variación en los resultados.

En la Figura 3.7 se muestra la geometría del stent considerando cada semicírculo como un strut del stent, la parte marcada es la entrada del fluido el cual tiene un área cuadrada de 1200 mm² y un volumen de 8045.7 mm³, los datos de entrada fueron la velocidad del fluido y el caudal la salida del fluido Figura 3.8 se tiene la misma área en la salida, y se obtuvieron la presión de salida y la velocidad de salida.

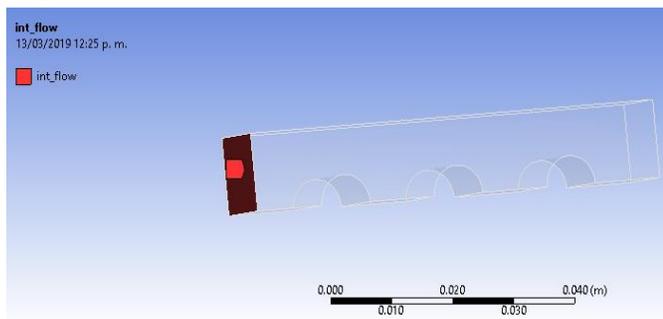


Figura 3.7 Entrada de flujo del stent

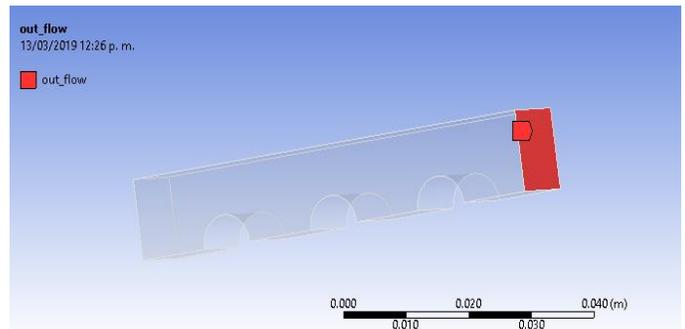


Figura 3.8 Salida de flujo del stent

Los strut tiene un radio de 4.5 mm (Figura 3. 9), y un ancho de 8 mm y se le asignó las propiedades del acero inoxidable, mientras que la superficie entre los strut se consideró como tejido y tiene un largo de 12m (Figura 3. 10), y una densidad de 960 kg/m³ [106].

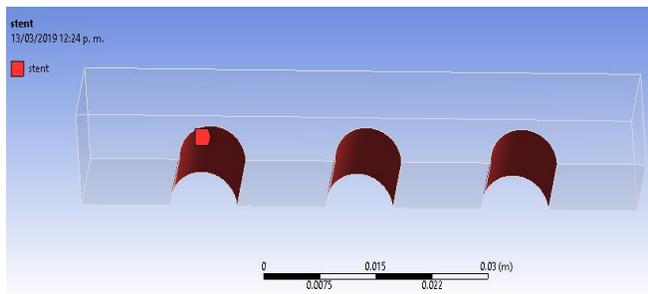


Figura 3. 9 Strut del Stent

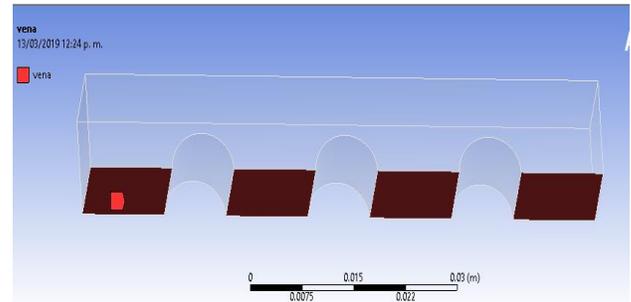


Figura 3. 10 Vena

3.6 SIMULACIÓN NUMÉRICA TUBO.

Se realizó un análisis de una tubería a la cual se le asignaron las propiedades de acero x52 el cual es usado en las tuberías de transporte de petróleo. En la Tabla 3.7 se muestran los valores de entrada para la simulación numérica como es el valor de la velocidad, el caudal.

Tabla 3.7 Valores de entrada para la simulación de la tubería

Datos	Valores
Velocidad de entrada	1.697 m/s
Caudal	0.00367 m ³ /s
Diámetro	0.05251 m
Área de sección transversal	0.002165 m ²
Nodos	651364
Elementos	629100

En la Figura 3. 11 se muestra la geometría de la tubería de petróleo con sus dimensiones los cuales tiene un largo de 30 cm y un radio de 1 pulgada, esto para que se pueda realizar más fácil el recubrimiento, en la Figura 3. 12 se observa el mallado de la tubería de petróleo, por ser una figura cilíndrica no se puede mallar de manera uniforme por lo que el mallado es más fino en las superficies que es donde nos interesa estudiar el comportamiento del fluido con la superficie, y ver los efectos que tiene el recubrimiento de DLC con el fluido.

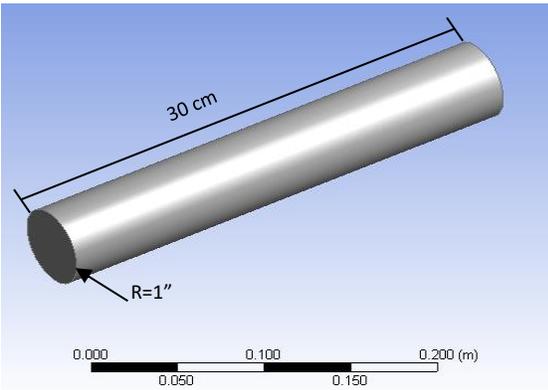


Figura 3.11 Geometría de la tubería para petróleo

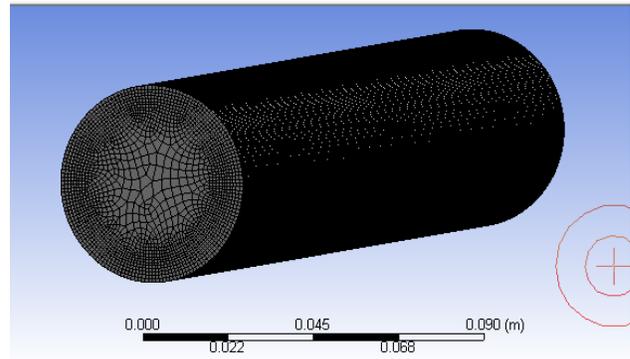
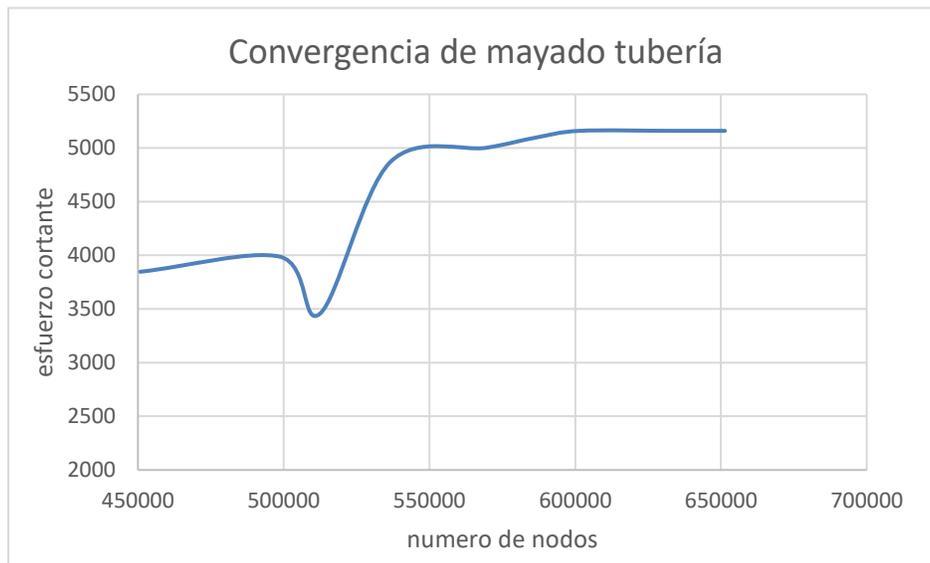


Figura 3.12 Mallado de la tubería de petróleo

Al igual que en el caso del stent se consideró los esfuerzos cortantes para ver la convergencia del mallado, en la Gráfica 3.2 se muestra la convergencia del mallado de la tubería de petróleo en la cual se puede observar que inicia con 450,784 nodos y comienza a incrementar hasta los 498,745 nodos, de ahí tiene una caída de valores hasta los 512,458 nodos y después comienza a subir hasta los 569.745 después tiene un pequeño incremento y a partir de los 632.548 nodos donde se empieza a estabilizar hasta llegar a los 651,364 nodos donde deja de tener variaciones en los esfuerzos cortantes.



Gráfica 3.2 Convergencia del mallado de la tubería de petróleo

El tubo se dividió en tres secciones para poder aplicar las condiciones de frontera para el análisis, en la Figura 3. 13 se observa la entrada de flujo el cual tiene un área de 0.0019635 m^2 , los valores de entrada son la velocidad y el caudal.

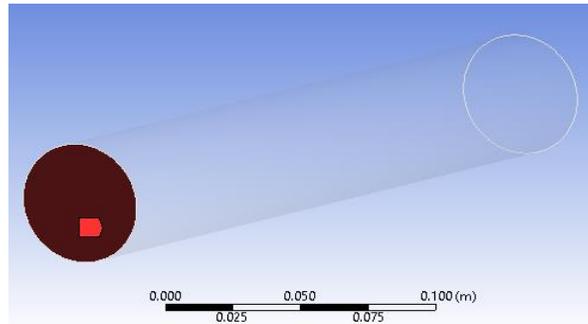


Figura 3. 13 entrada de flujo de petróleo

En la Figura 3. 14 se observa el área de salida del fluido y los datos que se obtienen son una presión y una velocidad de salida, se tiene la misma área de entrada y salida, ya que es un tubo uniforme.

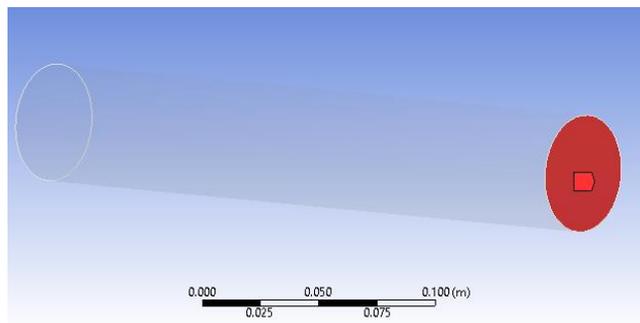


Figura 3. 14 Salida de flujo de petróleo

La Figura 3. 15 muestra la pared de la tubería la cual tiene una longitud de 30 cm, para la simulación de la tubería sin recubrimiento de DLC se le asignan las propiedades mecánicas del

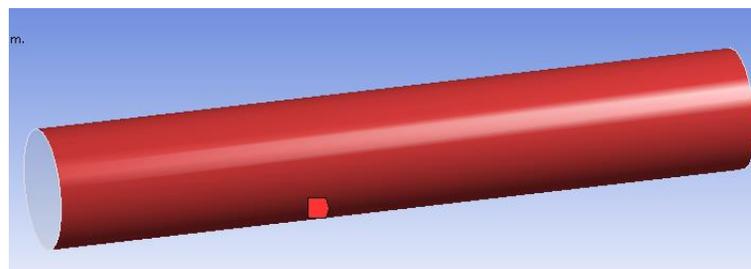


Figura 3. 15 Pared de la teoría

acero x52 con el cual son elaborados los ductos para petróleo; y para cuando se tiene el recubrimiento se le asigna las propiedades mecánicas del DLC.

3.7 BANCO EXPERIMENTAL.

Se realizó un prueba experimental para poder comparar los datos obtenidos por medio de la simulación numérica, consistió en recubrir un tubo de acrílico con DLC y analizar el desplazamiento de una gota de agua y observar el efecto de la adhesión entre la superficie y el fluido; la velocidad es uno de los parámetros que varía en función del coeficiente de fricción y la adhesión.

Aun cuando el material usado no es el mismo que el simulado existen leyes de semejanza en las cuales se puede realizar modelos de diferentes materiales y dimensiones, pero se pueden obtener resultados muy similares a los reales si se tiene una semejanza geométrica, dinámica y cinemática.

El proceso de triboadhesión está en función de la velocidad de la fresa y el sustrato, la carga de la fresa sobre el sustrato y el flujo másico de polvo [57], los datos para poder realizar el proceso de triboadhesión en una tubería de acrílico transparente con una fresa de algodón 100% con un diámetro de 2 cm son los mostrados en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Propiedades del sustrato y fresa de algodón para el proceso de triboadhesión

Material	Conductividad térmica	Calor específico	Densidad	Dureza	M. Young	Esf. Fluencia.	T. Fusión	Cte.red	Energía Sup.	Poisson	radio iónico
	W/mK	J/kgK	Kg/m3	Pa	Pa	Pa	K	M	J/m2		m
Acrílico	3349.4	1,256.	1,180.	7.833x10 ⁸	2.65x10 ⁹	2.942x10 ⁹	433	8.037x10 ⁻¹⁰	0.213	0.33	4.70x10 ⁻⁰⁵
Algodón	0.06	1,300	80.	6x10 ⁷	2x10 ⁸	2x10 ⁷		3.26x10 ⁻¹⁰	0.0065	0.3	1.4x10 ⁻⁷

La Tabla 3.9 muestra las características del torno que se utilizó para realizar el proceso de triboadhesión de la cual se requiere principalmente la velocidad para poder hacer el cálculo de la temperatura para el proceso de triboadhesión.

Tabla 3.9 Especificaciones del torno

Longitud total	Bancada	Distancia entre centros	volteo	Velocidad mínima	Velocidad máxima	Peso total
1.240 m	0.670 m	0.550 m	0.115m	140 rpm	1710 rpm	105 kg

En la Figura 3. 16 se aprecia el banco de pruebas con el cual se realizó el recubrimiento de DLC, se utiliza un dispositivo para dosificar el polvo para el recubrimiento el cual fue diseñado por Navarro en 2004 [107].



Figura 3. 16 Banco de pruebas

En la Figura 3. 17 se observa el contenedor de polvo en el cual se le suministra aire para poder presurizar el contenedor e inyectar polvo en el interior, para evitar la humedad se colocan una



Figura 3. 17 Contenedor de polvos

válvula con filtro antes de que el aire entre al contenedor, la alimentación de polvo está en función de la presión por lo que la válvula también sirve para regular el flujo de polvo que se suministra.

Es necesario que el suministro de polvo sea constante por lo que se requiere mantener en constante movimiento el polvo y evitar aglomeraciones, por lo que este se obtiene con un motor que se ubica en la parte inferior del contenedor el cual sirve como un excitador para que el contenedor esté vibrando de manera constante.

3.8 PROCESO DE TRIBOADHESIÓN.

El proceso de deposición por medio de triboadhesión en el tubo de acrílico transparente se llevó a cabo como se muestra en la Figura 3. 18, el cual consta de una fresa de algodón montada sobre un rotor neumático que gira 60,000 rpm, el tubo de acrílico es colocado sobre el mandril del torno el cual tiene una velocidad de giro de 1,710 rpm; el contenedor de polvos es alimentado con aire a una presión de 2 bar y con una presión en el contenedor de 3 bar; La fresa para realizar el recubrimiento tiene un diámetro de 0.02 m y es de algodón 100%, el cual fue construido con 16 capas de tela pegadas en el centro y deshilada en la orilla Figura 3. 19.

El sustrato sobre el cual se recubrirá es un tubo de acrílico de 0.05251 m de diámetro con una longitud de 0.3 m. Para realizar la deposición de manera adecuada en la superficie del tubo se requirió elevar la temperatura cerca al valor de fusión del acrílico, sabiendo que la temperatura de fusión del acrílico es de 433 K, con las ecuaciones desarrolladas por Navarro [107], se



Figura 3. 18 Adaptación de equipo para proceso de triboadhesión en tuberías de acrílico



Figura 3. 19 Fresa de algodón

calculan las velocidades del sustrato y fresa del rotor para elevar la temperatura del sustrato a 420K para que el depósito de un material de aporte sea viable sobre la superficie del tubo de acrílico, y se determina que el diámetro de la fresa debe ser 0.02 m, con una carga de 0.04 N, con una velocidad de sustrato de 1.76 m/s. y velocidad de la fresa de 100.53 m/s.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se determina el porcentaje de material de aporte que debe tener la superficie del tubo para que se reduzca los esfuerzos cortantes y la adhesión, en conjunto con un recubrimiento cuya finalidad es disminuir el coeficiente de fricción para aumentar la velocidad del fluido y disminuir las pérdidas.

4.2 RESULTADO NUMÉRICO.

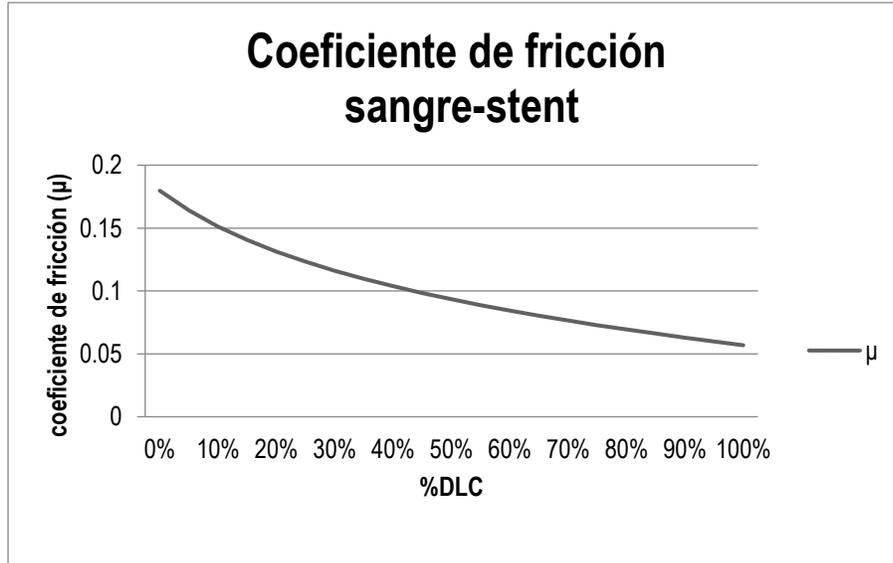
Utilizando las ecuaciones número 58 del capítulo II y las propiedades de los materiales que se encuentran en el capítulo III (pág. 47-48), se calcula el coeficiente de fricción que existe entre la sangre y el stent y el coeficiente de fricción del petróleo con la superficie del ducto.

Se calcula el coeficiente de fricción para el caso cuando el stent está sin recubrimiento y cuando está recubierto con diamante tipo carbono (DLC) y se calcula el coeficiente de fricción para el caso en el que el ducto no posee un recubrimiento y cuando se tiene un recubrimiento con DLC de igual forma. Los recubrimientos tienen como propósito disminuir las fuerzas de adhesión entre la superficie y el fluido, reducir los esfuerzos cortantes y aumentar la velocidad del fluido.

4.3 STENT.

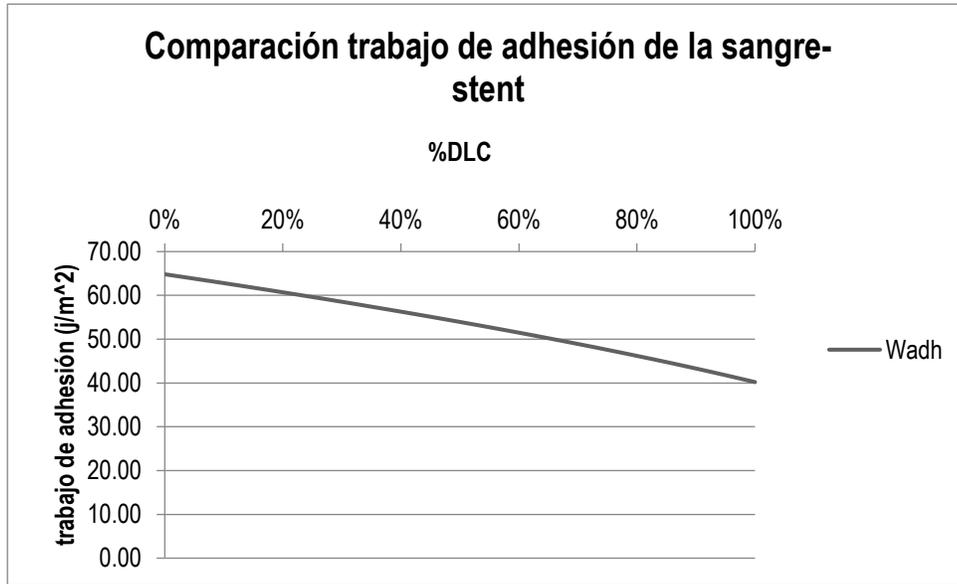
En la Gráfica 4. 1 se puede observar el comportamiento del coeficiente de fricción en función del porcentaje de recubrimiento de DLC sobre la superficie del stent en contacto con la sangre, el cual es una función inversa decreciente, inicia con un valor de coeficiente de fricción $\mu=0.18$ en el caso del stent de acero sin un recubriendo de DLC y va decreciendo de manera casi constante, en el eje y los valores son muy pequeños disminuye hasta llegar a un valor mínimo de coeficiente de fricción $\mu=0.0568$ cuando el stent de acero se encuentra con un recubrimiento

del 100% en el área de superficie con el DLC; el uso de un recubrimiento de DLC en la superficie del stent hace que disminuya el coeficiente de fricción hasta un 68.4% de su valor inicial, es decir se redujo el valor del coeficiente de fricción más de la mitad por lo que hay menos resistencia al flujo.



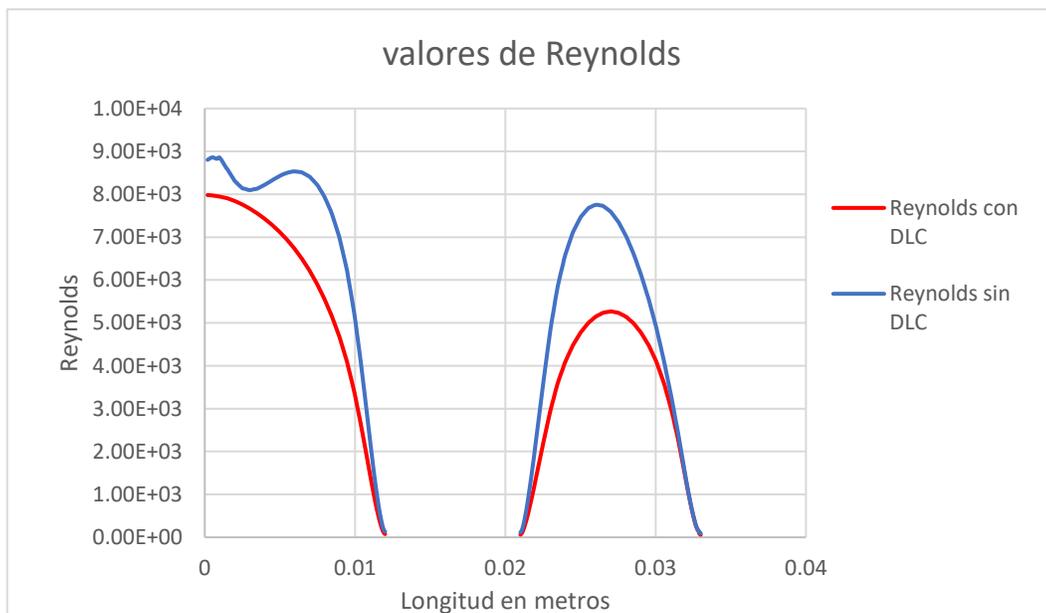
Gráfica 4. 1 Coeficiente de fricción sangre-stent dependiente del porcentaje de DLC

En la Gráfica 4. 2 se puede observar el resultado numérico del trabajo adhesión el cual va disminuyendo en función del porcentaje de DLC con poca variación en el eje “y” aproximándose a una pendiente que inicia con un valor de 64.82 j/m^2 , cuando el stent no se encuentra con un recubrimiento de DLC y va disminuyendo hasta llegar a un valor de 40.20 j/m^2 , cuando se tiene un recubrimiento del 100% con DLC, esto es una disminución de un 37.9% del trabajo de adhesión entre la superficie y el fluido, cuando se aplica el recubrimiento de DLC y al disminuir la fricción, ya que están relacionados por la ecuación (58).



Gráfica 4. 2 Comparación del trabajo de adhesión de la sangre-stent

Una de las maneras para poder ver el comportamiento del fluido es graficando el valor del número de Reynolds, en la Gráfica 4. 3 se observa la comparación del número de Reynolds entre el stent sin recubrimiento de DLC y el stent con recubrimiento de DLC, en el cual se puede observar una disminución en los valores de Reynolds en el stent con recubrimiento de DLC, esto se debe principalmente a la turbulencia que se genera en la tubería de sin recubrimiento,



Gráfica 4. 3 Comparación Reynolds sin y con DLC

los cuales son producidos por la fricción y la adhesión entre la superficie y el fluido; con el recubrimiento de DLC la fricción y la adhesión disminuye, produciendo un flujo menos turbulento y más uniforme, también se puede observar una discontinuidad en la gráfica, esto es principalmente a causa de la geometría del stent, las líneas representan los valores de Reynolds producidos por los strut y la discontinuidad que se observa en la gráfica es por el espacio que hay entre los strut, en los cuales por la geometría llegan a valores muy bajos de velocidad y el Reynolds se vuelve cero como se observa en la Figura 4. 3.

Se realizó una simulación numérica en el programa ANSYS FLUENT, en la cual se obtuvieron los esfuerzos cortantes de un stent sin recubrimiento de DLC Figura 4. 1 y otra con recubrimiento del 100% de DLC Figura 4. 2, en los cuales se puede observar que los esfuerzos cortantes sobre la superficie del stent sin recubrimiento presenta valores más grandes en la parte superior del strut y tiene una capa más grande en la que tiene efecto los esfuerzos cortantes y el stent con recubrimiento se puede observar que los esfuerzos cortantes están más pequeños y su efecto es más delgado y más cercano a la superficie del strut, la cual pasa de un valor de 5.16 kPa. a 0.00271 Pa. El stent con recubrimiento de DLC disminuyó 95% los esfuerzos cortantes en comparación con el stent sin recubrimiento.

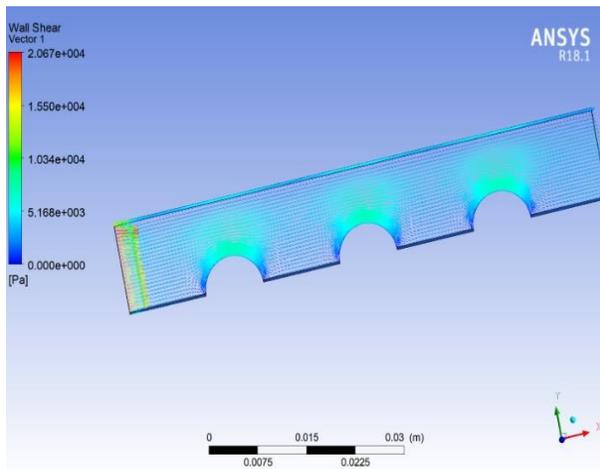


Figura 4. 1 Esfuerzo cortante en stent sin recubrimiento

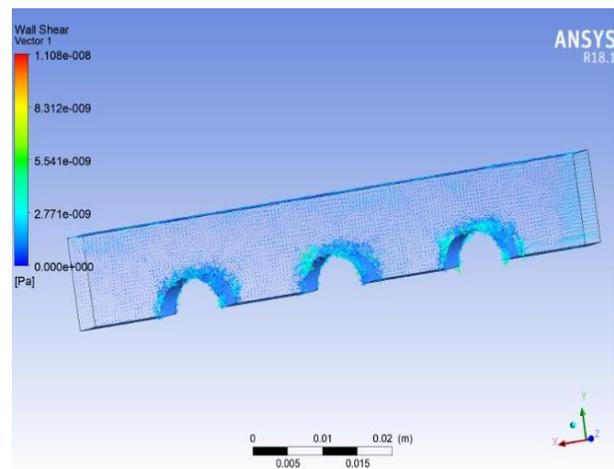


Figura 4. 2 Esfuerzo cortante en stent con recubrimiento

En la Figura 4. 3 se observan los perfiles de velocidad del flujo con el stent sin recubrimiento, el círculo rojo marca las velocidades más bajas la cuales son casi cero entre la interfaz del stent y el tejido esto se debe principalmente por la geometría de los strut, el cambio de dirección

abrupto hace que el fluido no pueda seguir el recorrido de la geometría y en las esquinas exista una pequeña depresión por el cual la velocidad se vuelve cero, las velocidades más altas se encuentran en la parte superior de los strut teniendo un valor promedio de 0.134 m/s y en la Figura 4. 4 se observa el stent con recubrimiento y el cual tiene líneas de flujo más uniforme y presenta menos turbulencia en comparación con la que no tiene recubrimiento y los valores más altos están en la parte superior de los strut con un valor promedio de velocidad de 0.267 m/s, es decir el fluido se desliza con mayor velocidad en el stent con recubrimiento.

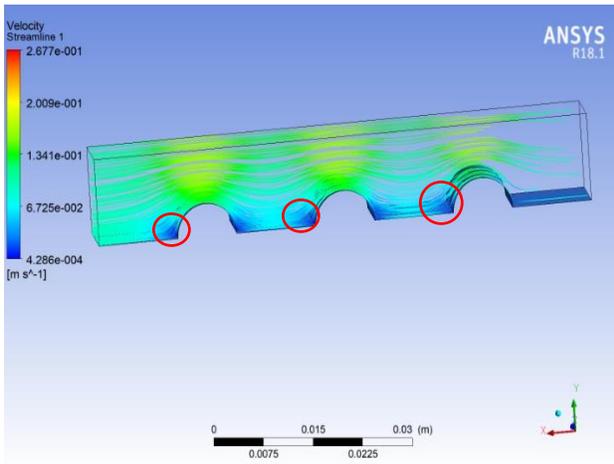


Figura 4. 3 Perfil de velocidad sin DLC

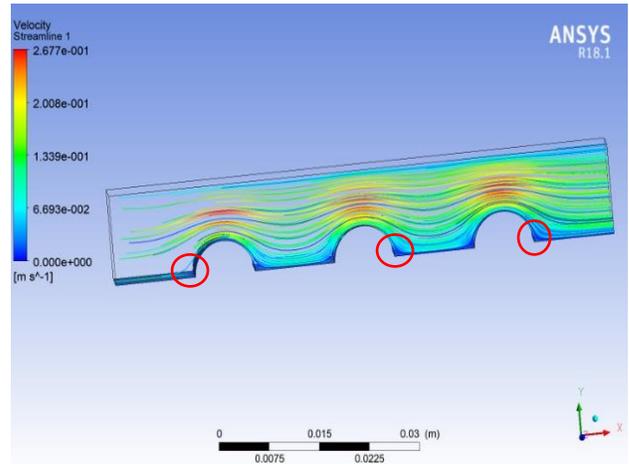


Figura 4. 4 Perfil de velocidad con DLC

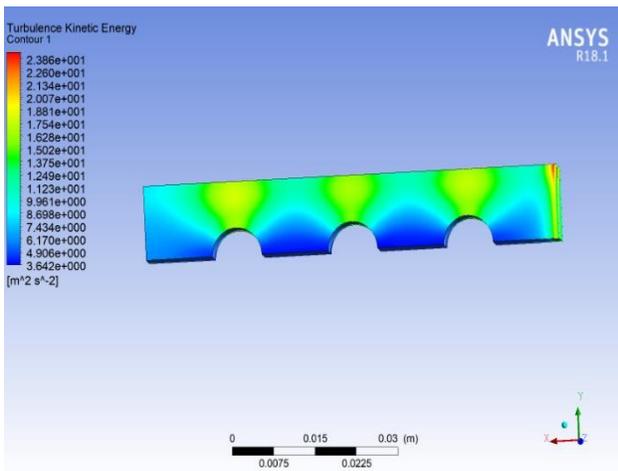


Figura 4. 5 Turbulencia sin DLC

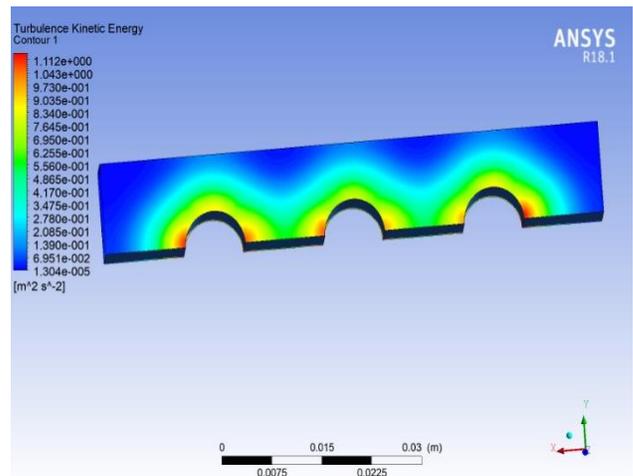


Figura 4. 6 Turbulencia con DLC

En la Figura 4. 5 se observa el fenómeno de turbulencia generada con el stent sin recubrimiento, la mayor parte de la turbulencia se genera en la parte superior de los strut, su efecto abarca un amplio espacio del volumen de control y conforme se aleja de la superficie del strut los valores se van incrementando; se obtuvo un valor mínimo es de $4.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y alcanza un valor máximo de $16.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ esto se debe a la geometría, al esfuerzo cortante que existen entre el fluido y la superficie los cuales producen mayor turbulencia en comparación con el stent con recubrimiento de DLC

En la Figura 4. 6, se puede observar que la turbulencia es menor y las zonas principales en las que se ubica son entre las uniones del stent y la piel y se reparte de manera uniforme por toda la superficie del strut, la turbulencia se va disipando conforme se aleja de la superficie del strut y del tejido. Se obtuvo un valor mínimo de $0.69 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y un valor máximo de $0.903 \text{ m}^2/\text{s}^2$ obteniendo una disminución de un 95% en comparación con el stent sin recubrimiento.

En la Tabla 4. 1 se realizó un concentrado con los valores obtenidos de manera numérica del stent con un 100% de recubrimiento y sin recubrimiento y se puede observar la comparación de los datos obtenidos de esfuerzo cortante, velocidad, turbulencia y número de Reynolds.

Tabla 4. 1 Comparación de datos obtenidos de simulación del stent

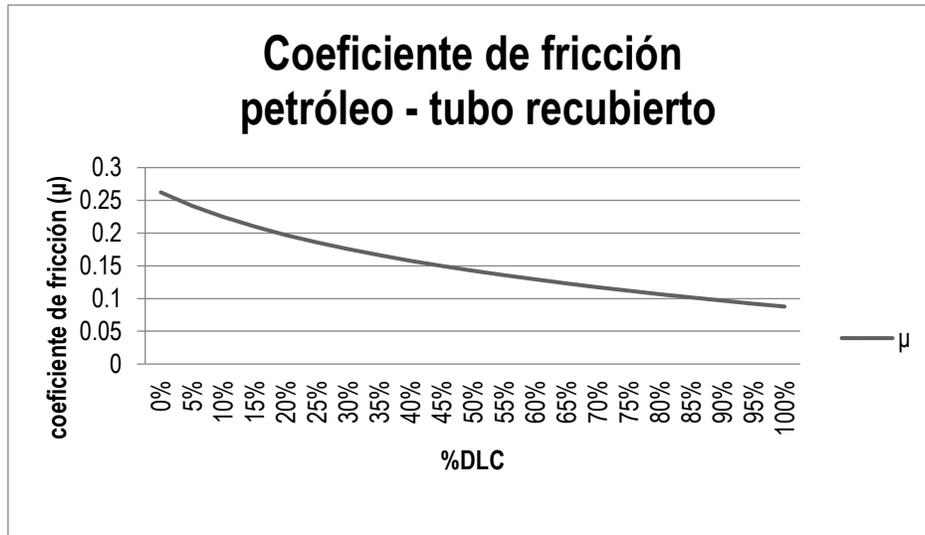
Parámetros	Sin DLC	Con DLC
Fricción	0.18	0.0568
Cortante	5160 Pa	0.00271 Pa
Velocidad	0.134 m/s	0.267 m/s
Turbulencia	$16.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$0.903 \text{ m}^2/\text{s}^2$
Reynolds	9000	8000

4.4 TUBERÍA DE PETRÓLEO.

Se realizó el análisis por método numérico para ver el comportamiento del fluido en un ducto de petróleo teniendo como material base tubo de acero X52 y como material de aporte DLC y como fluido petróleo crudo maya, al realizar la solución se obtuvieron los siguientes datos.

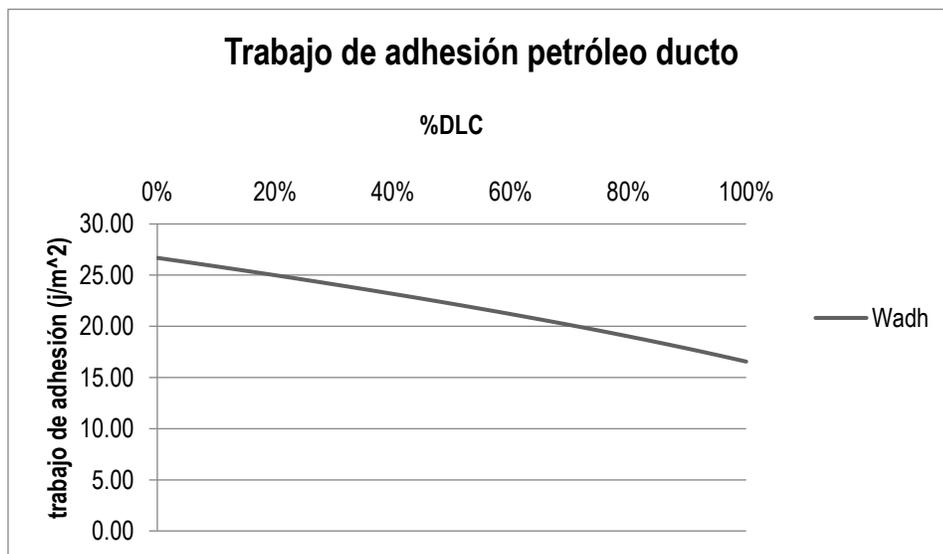
En la Gráfica 4. 4 se puede observar el comportamiento del coeficiente de fricción en función del porcentaje de DLC en la tubería de petróleo, se puede observar como una pequeña curva

decreciente iniciando con un valor de coeficiente de fricción de $\mu=0.262$ el cual representa la fricción del acero X52 y el petróleo, pero al aumentar el porcentaje de recubrimiento de DLC sobre la superficie de la tubería, el coeficiente de fricción va disminuyendo hasta llevar a un valor mínimo de $\mu=0.0878$, el cual representa un 100% de DLC en el eje “y” los valores no varían mucho numéricamente, pero esto representa una disminución del coeficiente de fricción del 66.48%.



Gráfica 4. 4 Coeficiente de fricción petróleo -ducto dependiente del porcentaje de DLC

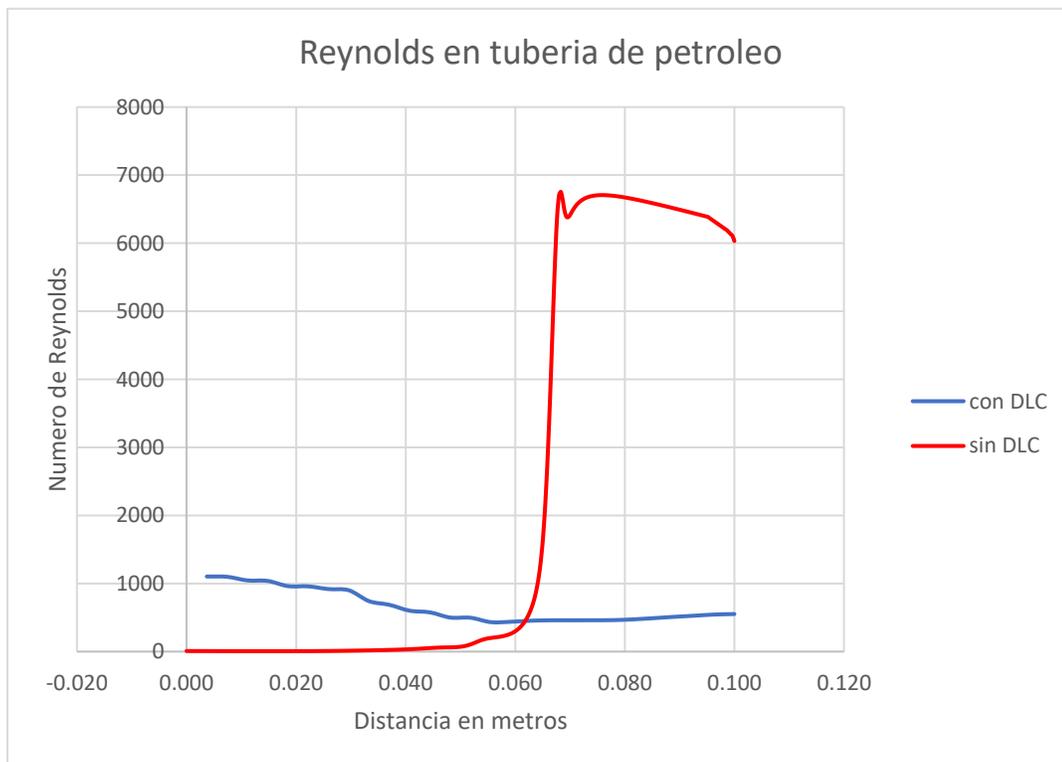
En la Gráfica 4. 5 se observa el comportamiento del trabajo de adhesión (Wadh) entre la tubería de acero X52 y el petróleo, la cual tiene una forma decreciente y se aproxima a una recta con



Gráfica 4. 5 Trabajo de adhesión en tubería y petróleo

una pequeña variación en el eje “y” iniciando con un valor de 26.69 j/m^2 cuando la tubería esta sin recubrimiento es decir el acero X52 y el petróleo y para cuando la tubería tiene un recubrimiento de DLC el trabajo de adhesión va disminuyendo según el porcentaje de DLC y disminuye hasta obtiene un valor de 16.55 j/m^2 que es cuando la tubería está totalmente recubierta don DLC reduciéndose un 38%.

La Gráfica 4. 6 muestra los valores de Reynolds obtenidos durante la simulación numérica en la cual se puede observar que la línea azul que representa la tubería recubierta con DLC, este tiene un comportamiento casi uniforme que va disminuyendo, conforme incrementa la distancia teniendo un valor máximo cerca de los 1.100, y un valor mínimo de 551, pero existen pequeñas variaciones a la mitad del eje de las “x” y en la parte final se mantiene constante y estable, a diferencia de la línea roja que representa la tubería que no tiene recubrimiento de DLC el cual va aumentando conforme aumenta la distancia y se puede observar un cambio abrupto a la mitad de la longitud de la tubería, la cual representa el incremento en el número de Reynolds, al incrementar el Reynolds aumenta la turbulencia llegando al valor máximo de Reynolds igual a



Gráfica 4. 6 Comparación de Reynolds en tuberías de petróleo con y sin recubrimiento de DLC

6,700, luego empieza a disminuir nuevamente y se estabiliza, el cambio abrupto en la gráfica físicamente representa la vorticidad que existen en esa parte de la tubería.

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos en el programa Fluent se pudo observar que en la tubería que se simuló sin recubriendo de DLC (Figura 4. 7) en la parte media del tubo marcado con círculo rojo presenta una discontinuidad de las líneas de corriente la cual representa una vorticidad del fluido se obtuvo un valor de esfuerzo cortante máximo de 3.489 Pa. y el tubo con recubrimiento de DLC (Figura 4. 8) presenta un flujo más uniforme por toda la longitud de la tubería y no presento vorticidad lo cual hace tener menos pérdidas, presento un esfuerzo cortante máximo 1.609 Pa. Por lo que representa una disminución de 53.8% del esfuerzo cortante comparado con la tubería sin recubrimiento.

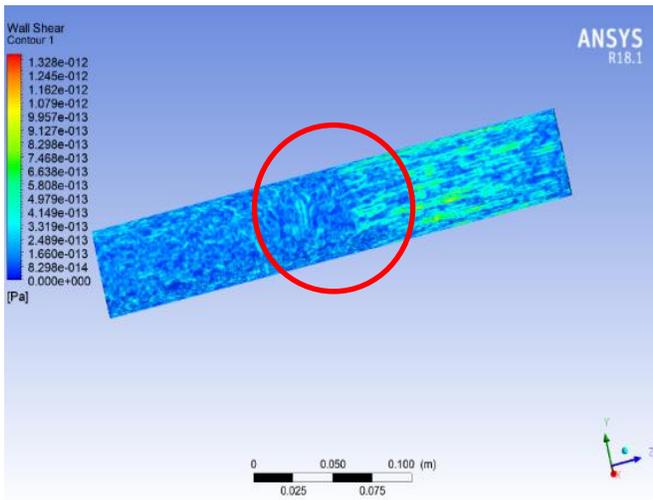


Figura 4. 7 Cortante sin DLC

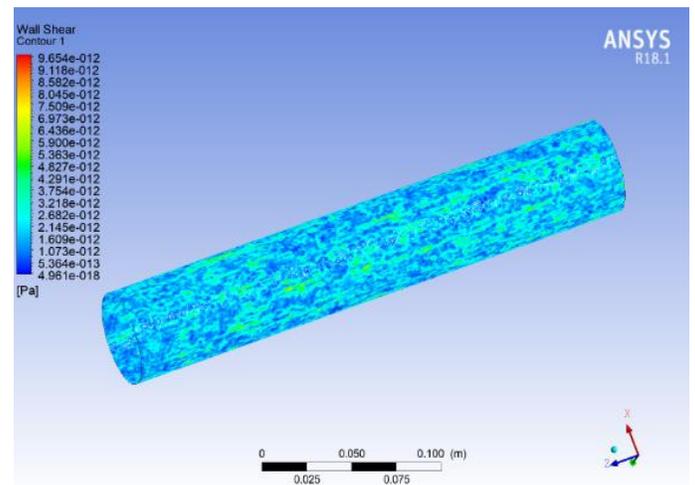


Figura 4. 8 Cortante con DLC

En la Figura 4. 9 se observa las líneas de corriente de los perfiles de velocidades, en la tubería sin recubrimiento en los cuales es más fácil de apreciar la turbulencia que presenta se observa líneas de corriente distorsionadas en la parte media de la tubería y presenta valores elevado de velocidad de hasta 3.4 m/s y la tubería con recubrimiento de DLC (Figura 4. 10) presentó líneas de corriente uniformes y continuas por lo que el fluido tiene menos pérdidas debido a que no existe turbulencia y tiene un mejor deslizamiento sobre la superficie, alcanzando un valor de velocidad promedio de 1.6 m/s.

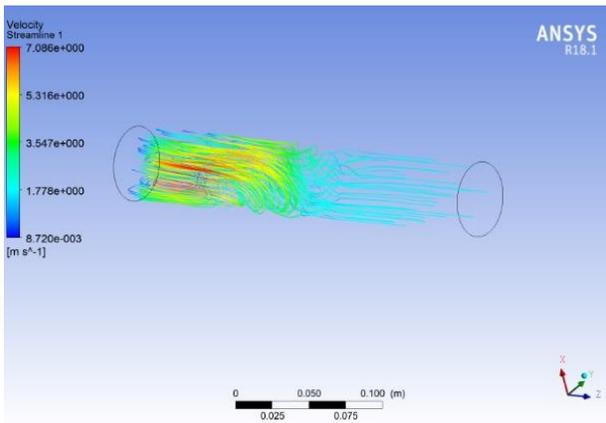


Figura 4. 9 Perfil de velocidad de la tubería sin DLC

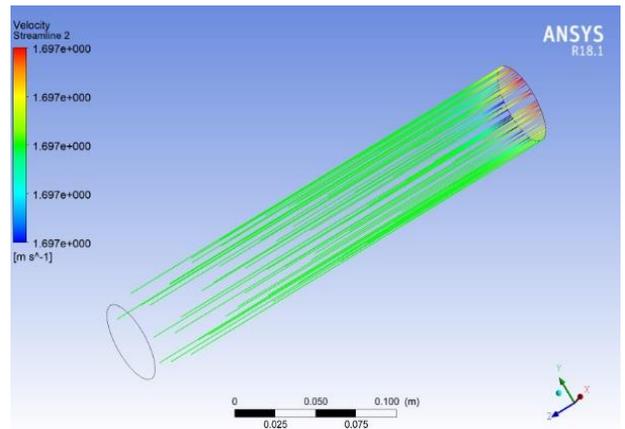


Figura 4. 10 Perfil de velocidad de la tubería con DLC

En la Figura 4. 11 se puede observar la energía de turbulencia generada en la tubería sin recubrimiento de DLC el cual presenta valores altos y una forma desordenada en la primera mitad de la tubería teniendo un valor máximo de $11,620 \text{ m}^2\text{s}^2$ y presenta los valores más altos al inicio de la tubería que es el lugar donde se presenta la vorticidad, la tubería con recubrimiento de DLC Figura 4. 12 presento una distribución de energía turbulenta más ordenada y con un efecto más reducido sobre la tubería alcanzando un valor máximo de $8,499 \text{ m}^2\text{s}^2$ él representa una disminución de un 26.8 % en comparación con la tubería que no tiene recubrimiento.

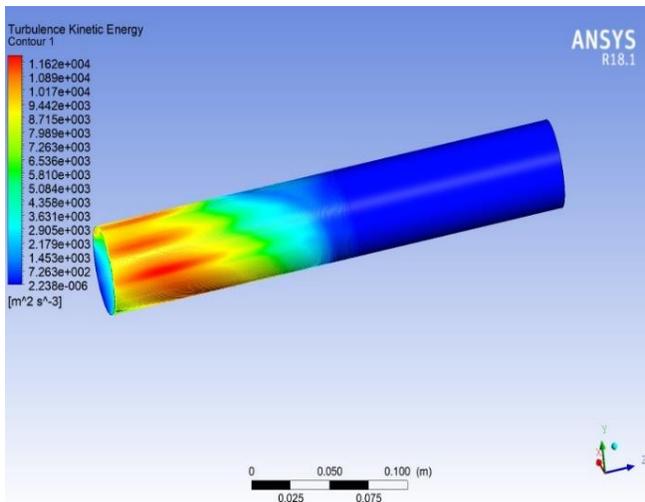


Figura 4. 11 Turbulencia en tubería sin recubrimiento de DLC

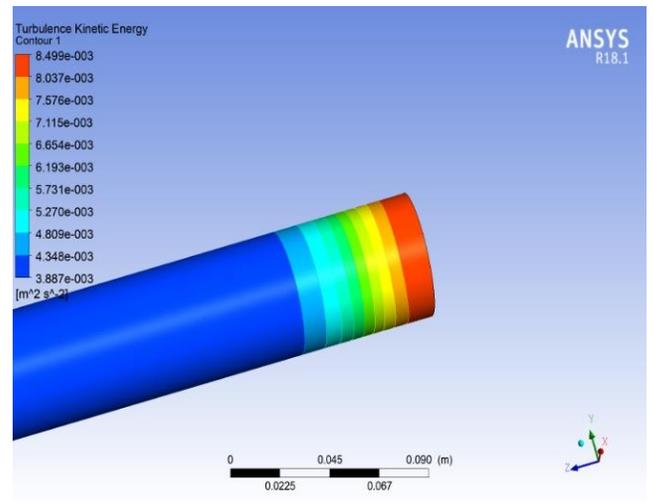


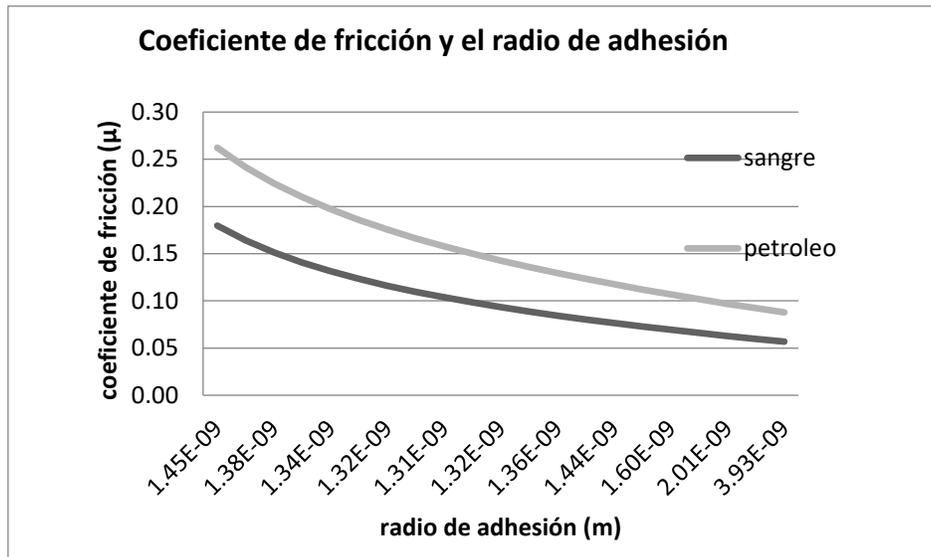
Figura 4. 12 Turbulencia en tubería con recubrimiento de DLC

En la Tabla 4. 2 se observa la comparación de los datos obtenidos de esfuerzo cortante, velocidad, turbulencia y Reynolds de la tubería de acero X52 sin recubrimiento y con recubrimiento de DLC, en los cuales se puede observar que los valores obtenidos del tubo con recubrimiento son menores a los que se obtuvieron con la tubería sin recubrimiento.

Tabla 4. 2 Comparación de datos obtenidos de la simulación de tubería y petróleo

Parámetros	Sin DLC	Con DLC
Fricción	0.262	0.0878
Cortante	3.48 Pa	1.60 Pa
Velocidad	3.4 m/s	1.6 m/s
Turbulencia	11620 m ² /s ²	8499 m ² /s ²
Reynols	6700	1000

La Gráfica 4. 7 muestra la comparación del coeficiente de fricción en función del radio de adhesión del stent y la tubería de petróleo ambos presentan una curva decreciente se observa que entre menor es el radio de adhesión el coeficiente de fricción va disminuyendo, existe una pequeña diferencia entre los dos materiales y se ve una menor disminución en el ducto que en el stent.



Gráfica 4. 7 Relación de coeficiente de fricción y el radio de adhesión en el stent y la tubería

4.5 RESULTADO EXPERIMENTAL.

Una vez realizado el recubrimiento con DLC se procedió a realizar una prueba en un plano inclinado para ver de manera experimental si los esfuerzos cortantes y la fuerza de adhesión disminuyeron.

El experimento consistió en realizar un base en el cual se pudiera dar una inclinación y sobre ella colocar los tubos de acrílico, una con recubrimiento de DLC y otra sin recubriendo de DLC, se coloca una gota de agua con una jeringa de 1 ml en cada una de las probetas y se va alzando el plano hasta que la gota comienza a deslizarse y observó que la probeta con recubrimiento de DLC tiene menor resistencia a fluir y se desliza con mayor rapidez la gota Figura 4. 13, Figura 4. 14.



Figura 4. 13 Banco para pruebas de plano inclinado

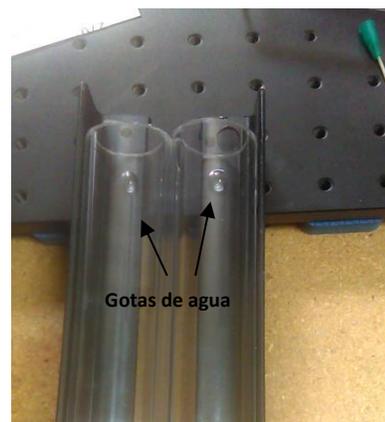


Figura 4. 14 Gota de agua colocada para realizar la prueba

La gota que se colocó en el tubo recubierto con DLC empezó a presentar deslizamiento a los 30° de inclinación tardo 12.3 segundos en recorrer toda la longitud del tubo (30 cm) teniendo una velocidad promedio de 0.024 m/s, mientras que el tubo sin recubrimiento comenzó a deslizarse a los 48° y tardo 23.7 segundos en recorrer los 30 cm de longitud de la tubería alcanzando una velocidad promedio de 0.012 m/s, por lo que la gota se desliza dos veces más rápido sobre el tubo con recubrimiento en comparación con el tubo sin recubrimiento, como se puede observar en Figura 4. 15 donde la gota que esta sobre el tubo con recubrimiento, tiene una mayor distancia recorrida.

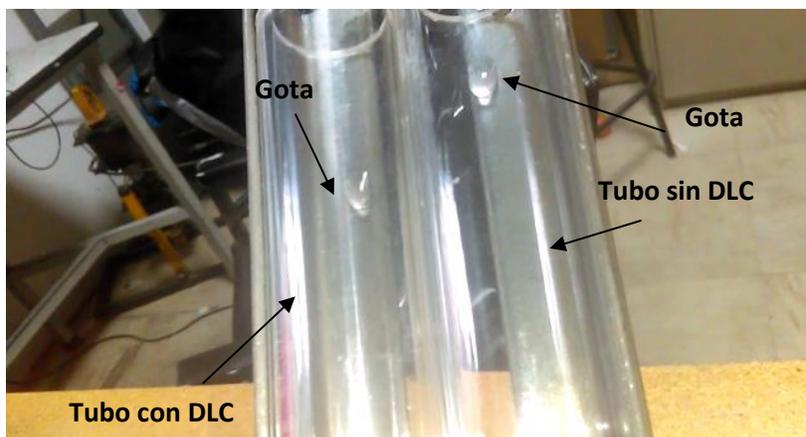


Figura 4. 15 Deslizamiento de la gota en el tubo con DLC

Con esta prueba se logra comprobar que la tubería con recubrimiento de DLC presenta menos resistencia al flujo lo cual significa que los esfuerzos cortantes y las fuerzas de adhesión son menores y por ello el flujo es más rápido.

Para corroborar que la deposición del DLC se realizó de manera correcta sobre el acrílico, se realizó una prueba de ángulo de contacto, el ángulo de contacto es un parámetro que se usa en materiales para caracterizar las propiedades de humectabilidad de estos.

La medida del ángulo de contacto es por ello importante, en especial en biomateriales. También sirve para observar el efecto de modificaciones en las superficies, bien sea por tratamientos o por deposición de películas de otros materiales o capas moleculares [108], por lo que es un buen parámetro para demostrar la deposición de DLC sobre el acrílico. Las pruebas hechas por Torrent demuestran que el acrílico y agua poseen un ángulo de contacto de entre 65° y 73° [108], en la Figura 4. 16 se puede observar la foto tomada a una gota sobre acrílico el cual se obtuvo un ángulo de 64.5° y DLC con agua, posee un ángulo de contacto de hasta 110° [109], en la Figura 4. 17 se puede observar el ángulo de contacto de una gota de agua sobre el acrílico recubierto con DLC el cual se obtuvo un ángulo de 109.2° por lo que de esta manera se puede comprobar la correcta deposición de DLC sobre el acrílico.



Figura 4. 16 Ángulo de contacto del acrílico y agua

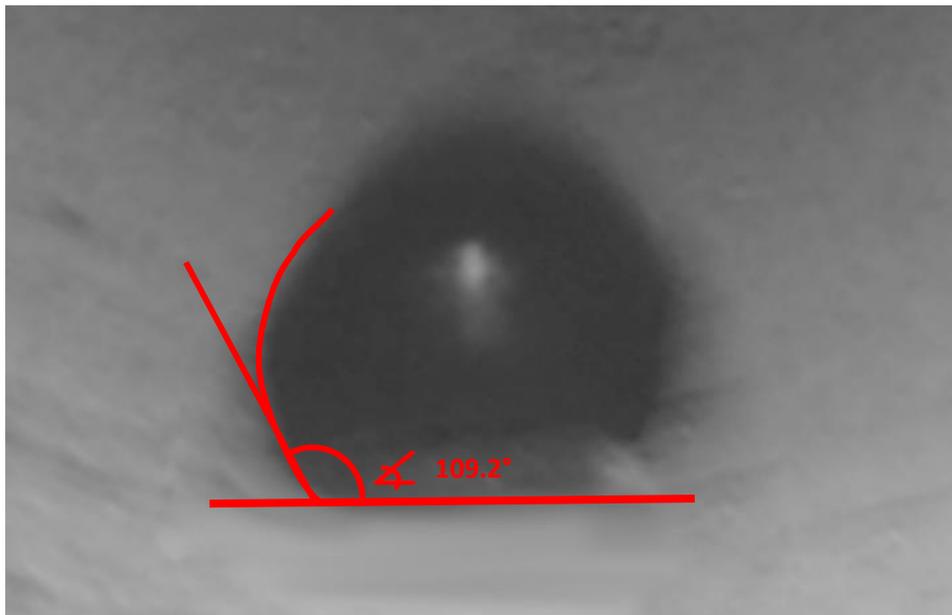


Figura 4. 17 Ángulo de contacto de acrílico recubierto con DLC y agua

Tabla 4. 3 Pérdida de longitud, presión y energía con y sin DLC

pérdidas en	Longitud Sin DLC	Longitud Con DLC	Δp sin DLC	Δp con DLC	Watts sin DLC	Watts con DLC
Stent	1.51X10 ⁻⁴ m	4.7695x10 ⁻⁵ m	1.556Pa	0.49Pa	-	-
Ducto 1m	0.0736 m	0.0238 m	7.003Kpa	2.236Kpa	38.6 kW	36.8 kW

La pérdida en las tuberías se da en longitud, pero se ve refleja en la caída de presión, la cual se puede calcular con la ecuación (66), utilizando los datos obtenidos de la simulación, los valores de pérdida se calculan y se presentan en la Tabla 4. 3. en donde se puede observar que ambos casos las pérdidas son menores cuando se tiene el recubrimiento de DLC en el caso del stent la pérdida de longitud paso de 0.151 mm a 0.047695 mm disminuyó 68.4% las pérdidas y para el caso de los ductos de petróleo sin recubrimiento de DLC tiene una pérdida de 7.36 cm por cada metro de tubería mientras que con DLC tiene una pérdida de 2.38 cm por cada metro de tubería, por lo que se tuvo una reducción de 67.6% de pérdidas los cual en términos de energía representa un ahorro de 64.8 kW, esto es considerando una tubería sin accesorios y sin variación del diámetro, esto representa un ahorro económico de \$181,569.60 por cada bomba para recorrer 10 km de ducto, en México se tiene un aproximado de 4,441 km de ductos por lo que se podría tener un ahorro en energía de hasta \$80,635,059.36.

Existen varios parámetros que determinan el coeficiente de fricción para que este sea menor cuando se usan diferentes materiales para el contacto en una superficie, para el caso de los recubrimientos con DLC su capacidad de disminuir los esfuerzos cortantes y la fuerza de adhesión del fluido con la superficie hacen que sean aplicable a las tuberías para disminuir las pérdidas.

El stent con recubrimiento de DLC redujo la fricción, los esfuerzos cortantes y la turbulencia y se vio reflejado al disminuir un 68.5% las pérdidas de presión, y en el caso de los ductos de acero X52 con el petróleo las pérdidas de energía por bombeo disminuyeron un 67.6%, esto representa un ahorro económico y se pudo observar físicamente al observar que la gota se desliza más rápido en el tubo con recubrimiento de DLC.

CAPÍTULO V

CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIÓN.

Se corrobora la viabilidad de utilizar diamante tipo carbón como material de aporte en la superficie del sustrato, ya que estos materiales reducen el coeficiente de fricción un 68.4% en el caso del stent y un 66.48% en las tuberías de petróleo cuando el fluido está en contacto con la superficie.

En la simulación numérica el stent con recubrimiento de DLC presento una disminución del 95% de esfuerzo cortante y de turbulencia, además de obtener un fluido más uniforme y con menos vorticidad, todo esto se ve reflejado en las pérdidas de energía del fluido, el cual se representa como una pérdida de presión el cual también disminuyo 68.5%. Con el recubrimiento de DLC los stent aumentan su vida útil, ya que existirá una menor adhesión de partículas en la superficie y evita así la restenosis, lo que representa un ahorro económico, ya que cada intervención quirúrgica tiene un costo que oscila entre los \$150,000.00 y \$200,000.00.

En el caso de las tuberías de acero X52 recubiertos con DLC también presento una disminución del esfuerzo cortante de 53.8% y un 26.8 % en la turbulencia, y al comparar las líneas de corriente se observó un desorden, turbulencia y vorticidad en el fluido con la tubería que no tenía recubrimiento, además de que las pérdidas de presión se redujeron 68.07%, y al reducir las pérdidas las potencia de bombeo también es menor por lo que da como resultado un ahorro de energía de bombas para realizar el mismo trabajo, reduciendo así los costos de operación, ya que se tiene un ahorro de 64.8 kW en 10 km de tubería, por lo que se tiene un ahorro por bomba de \$181,569.60, además de que se evita la adhesión de partículas en la superficie aumentando la vida útil de los ductos

5.2 TRABAJOS FUTUROS.

- En el caso de los stent se observó que otro factor que influye es la geometría por lo que se puede realizar un análisis para determinar un mejor diseño de los strut, para aumentar su eficiencia.
- Validar el modelo desarrollado con información clínica o ensayos de laboratorio.
- Realizar pruebas con ducto y accesorios recubiertos con DLC para analizar un circuito real.
- Realizar el diseño y construcción de una máquina extrusora de stent particulados con DLC.
- Realizar el diseño y construcción de una máquina extrusora de ductos particulados con DLC.

REFERENCIAS

- [1] W. P. Castillo Herrera y O. G. Toapanta Cunalata, PRINCIPIOS DE TRIBOLOGÍA APLICADOS EN LA INGENIERÍA MECÁNICA, Editorial Área de Innovación y Desarrollo,S.L., 2019.
- [2] M. Carretero Colomer, «Cardiopatía Coronaria,» *Offfarm*, vol. 24, nº 2, pp. 110-111, 2005.
- [3] J. Rodriguez, «Proceso para recubrir placas metálicas con óxidos metálicos por fricción seca,» CENIDET, CUERNAVACA, 1997.
- [4] L. Saldas Paumier, «Determinación de las propiedades de transporte del petróleo mesa-30 destilado en la refinería Níco López,» INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA, 2008.
- [5] R. Feliz, «El nacimiento de la Hidrodinámica Teórica,» *RIHA*, vol. 32, nº 2, 2014.
- [6] F. Manning y R. Thompson, «Oilfield Processing of Petroleum,» *Natural Gas*, vol. 1, p. 293, 1991.
- [7] H. Laurencio, «Método de cálculo para el transporte de emulsiones de petróleo pesado por tuberías,» Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba, 2007.
- [8] A. I. Carmona , Aerodinámica y actuaciones del avión, Paraninfo, 1980.
- [9] T. Nakayama, E. Niwa y I. Hamada, «Pipe transportation of minced fish paste,» *Journal of*, pp. 844-847, 1980.
- [10] F. Garcia y J. Steffe, «Comparison of friction factor equations for non-newtonian fluids in pipe flow,» *Journal of Food Process Engineering*, pp. 93-120, 1987.
- [11] S. Liu y H. MASliyah, «On non-newtonian fluid flow in ducts and porous media,» *Chemical Engineering Science*, pp. 175-201, 1998.
- [12] R. Manssur y T. Rajie, «Generalized Explicit Equation for the Friction Factor for Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Both Circular and Non-Circular Ducts,» *Chemical*, pp. 89-103, 1988.
- [13] K. Wojs, «Laminar and turbulent flow of dilute polymer solutions in smooth and rough pipes,» *Journal of non Newtonian fluid mechanise*, pp. 337-355, 1993.

- [14] I. Pedroso, I. Turiño, S. Jáuregui y G. Gonzalez, «Gradiente de velocidad para la transportación de mieles y meladuras en conductos circulares,» *Centroazucar*, pp. 53-68, 2000.
- [15] G. Sánchez, «Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos,» *Revista de la Facultad de Ingeniería de Chile*, pp. 23-34, 2002.
- [16] B. Adhikari y V. Jindal, «Artificial neural; a new tool for prediction of pressure drops of non-newtonian fluid foods through tubes,» *Journal of Food Engineering*, pp. 43-51, 2000.
- [17] N. De la Paz, «Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida,» *Revista Cubana de Farmacia*, p. 2127, 2002.
- [18] V. Caldiño y M. Salgado, «Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris,» de *7mo Congreso Internacional de Ingeniería*, Jiutepec, Morelos, 2004.
- [19] M. Haoulo y F. García, «Efecto de la viscosidad y de la densidad de mezcla en el gradiente de Presión de flujo de gas-líquido en tuberías horizontales,» de *Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Mérida, Venezuela, 2004.
- [20] M. Khatib, «The development of poiseuille flow of a pseudoplastic fluid,» *The Arabian Journal for Science and Engineering.*, pp. 102-107, 2006.
- [21] A. Japper, P. Escudier y J. Poole, «Laminar and turbulent pipe flow of a polymer solution,» *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, pp. 43-55, 2009.
- [22] S. Balagui, M. Mohammafifar y A. Zargaraan, «Physicochemical and rheological characterization of gum tragacanth exudates from six species of iranian astragalus,» pp. 59-71, 2010.
- [23] A. Nikolaev, «Opinión de experto,» Instituto de Minas de San Petersburgo, 2011.
- [24] A. A. ESTUPIÑAN ROJAS, E. JIMENEZ SUANCHA, E. J. PINEDA LARA y O. F. PRIETO NARANJO, «Transporte por ducto,» UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, Tunja, 2012.
- [25] PEMEX, «PEMEX,» PEMEX, 16 08 2019. [En línea]. Available: <https://www.pemex.com/nuestro-negocio/logistica/ductos/Paginas/Tarifas.aspx>.
- [26] P. Maruska y B. Rao, «The Role Of Polar Species In The Aggregation Of Asphaltenes,» *Fuel Science and Technology*, vol. 5, nº 2, pp. 119-168, 1987.

-
-
- [27] J. M. Silos Rodriguez, Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos, vol. 1, España: Universidad de Cadiz, 2008, pp. 235-236.
- [28] L. Schramm, «Emulsions, fundamentals and applications in the petroleum industry in Chemistry,» *American Chemical Society*, nº 231, p. 139, 1992.
- [29] H. Herms, «Oil tool and method for controlling paraffin deposits in flow lines and downhole strings». Patente 2032005, 1991.
- [30] L. Garcell, «Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos,» 1993.
- [31] B. Wang y L. Dong, «Paraffin characteristics of waxy crude oils in China and the methods of paraffin removal and inhibition». Patente 29954, 1995.
- [32] C. Liang, «Experimental study of the effect of magnetic treatment on crude oil in a pipeline,» *Oil & Gas Storage Transport*, pp. 152-178, 1999.
- [33] F. Garcia, «Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento,» Facultad de Ingeniería, 2003.
- [34] G. Mansoori, «Modeling and prevention of asphaltene and other heavy organic deposition in oil-spe». Patente 27 070, 2005.
- [35] M. Haoulo, F. Garcia y J. Soto, «Gradiente de presión de flujo de gas y líquido en tuberías horizontales considerando el efecto de las propiedades de mezcla,» *Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela*, pp. 102-113, 2005.
- [36] C. Balan, D. Broboana, E. Gheorghiu y L. Vékás, «Rheological characterization of crude oils and complex fluids in electro-magnetic fields,» *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, pp. 92-103, 2008.
- [37] J. Tang y L. Li, «Magnetic field parafin control technique,» *Oil Drilling Product*, pp. 206-215, 1986.
- [38] A. E. Lichtin, «Manual Merck,» Introducción a la sangre, 2014. [En línea]. Available: <https://www.merckmanuals.com/es-us/hogar/trastornos-de-la-sangre/biolog%C3%ADa-de-la-sangre/introducci%C3%B3n-a-la-sangre>.
- [39] D. Echeverri, «Endotelio y restenosis coronaria,» *acta medica, colombia*, 2001.

- [40] E. p. e. p. d. M. Clinic, «Estenosis de la válvula aórtica,» mayoclinic, 21 sep 2018. [En línea]. Available: https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/aortic-stenosis/symptoms-causes/syc-20353139?utm_source=Google&utm_medium=abstract&utm_content=Aortic-stenosis&utm_campaign=Knowledge-panel.
- [41] radiologyinfo, «Angioplastía y stent vascular,» radiologyinfo, 26 feb 2019. [En línea]. Available: <https://www.radiologyinfo.org/sp/info.cfm?pg=angioplasty>.
- [42] S. Bellver, «Historia y evolución de la angioplastia y el stent,» Cope onda narnaja, 26 junio 2005. [En línea].
- [43] D. Maas, C. Zollkoffer, F. Largiader y A. Senning, «Radiological follow-up of transluminally inserted vascular endoprostheses: an experimental study using expanding spirals,» *Radiology*, 1984.
- [44] J. C. Palmaz, R. R. Sibbit , S. R. Reuter y W. J. Rice, «Expandable intraluminal graft: a preliminary study.,» *Radiology*, vol. 156, pp. 3-7, 1985.
- [45] B. Tomberli, A. Mattesini, G. I. Baldereschi y C. Di Mario, «Brebe historia de los stent coronarios,» *Cardiol*, vol. 71, nº 5, pp. 312-319, 2018.
- [46] K. Gutensohn, C. Beythien, J. Bau, T. Fenner , P. Grewe, R. Koester, K. Padmanaban y P. Kuehnl, «In Vitro Analyses of Diamond-like Carbon Coated Stents,» *Elsevier BV*, vol. 99, nº 6, pp. 577-585, 2000.
- [47] J. Sousa, M. A. Costa y A. abizaid, «Four-Year Angiographic and Intravascular Ultrasound Follow-Up of Patients Treated With Sirolimus-Eluting Stents,» *interventional cardiology*, 2005.
- [48] B. Rensing, J. Voz y P. C. Smit, «Coronary restenosis elimination with a sirolimus eluting stent: first European human experience with 6-month angiographic and intravascular ultrasonic follow-up,» *Eur Heart Journal*, pp. 22-21, 2001.
- [49] L. D. Llerena y L. R. Llerena , «STENT INTRACORONARIO,» *Revista Cubana de Cardiología y Cirugía cardiovascular*, vol. 14, nº 1, pp. 39-47, 2000.
- [50] F. Migliavacca, L. Petrini, V. Montanari, I. Quagliana, F. Auricchio y G. Dubini, «A predictive study of the mechanical behaviour of coronary stents by computer modelling.,» *Medical engineering & physics*, vol. 27, nº 1, pp. 8-13, 2005.

-
-
- [51] F. Auricchio, M. Di Loreto y E. Sacco, «Finite-element Analysis of a Stenotic Artery Revascularization Through a Stent Insetion,» *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 4, nº 3, pp. 249-263, 2000.
- [52] g. Lixia , S. santra, R. Mericle y A. Kumar, «Finite element analysis of covered microstents,» *Journal of Biomechanics*, vol. 38, nº 6, pp. 1221-1227, 2005.
- [53] M. Ohta, S. Wetzel, P. Dantan, C. Bachelet, K. Lovblad, H. Yilmaz, P. Flaud y D. Rüfenacht, «Rheological Changes After Stenting of a Cerebral Aneurysm: A Finite Element Modeling Approach,» *Cardio Vascular And Interventional Radiology*, vol. 28, nº 6, pp. 768-772, 2005.
- [54] V. Serbezov, N. Reifart y F. Herbst, «DLC Films for Stent Applications,» *2009 3rd ICTON Mediterranean Winter Conference (ICTON-MW)*, pp. 1-6, 2009.
- [55] N. tamonita, S. Tamai y E. Okajima, «Biomaterials lubricated for minimum frictional resistance,» *J Appl Biomater*, pp. p 175-81, 1994.
- [56] A. Aguilar, «Diseño y Construcción de un Dispositivo Utilizado para Recubrir Superficies Metálicas con Óxidos Metálicos por medio de Fricción Seca,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 1999.
- [57] J. Robles, «Diseño y Construcción de un Dispositivo para el recubrimiento de superficies curvas por fricción seca,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2000.
- [58] D. Tolosa Mata, «Caracterización dinámica de prótesis de cadera recubiertas mediante el proceso de Triboadhesión,» Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2005.
- [59] J. M. Rodriguez, J. Colin, J. Pocayo-Calderon y M. López, «Evaluación de Velocidades para la Deposición de FeSi y MoS₂ por Triboadhesión en Aceros SAE 4140 y AISI 304,» *Información Tecnológica*, vol. 16, nº 3, pp. 21-28, 2005.
- [60] J. Rodriguez, W. Sosa G y M. Cienega Ramos, «Evaluación del desgaste de prótesis cerámicas de cadera recubiertas con DLC por Triboadhesión parte II,» *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 22, pp. 31-37, 2006.
- [61] D. Vela, «Diseño de un sistema de lubricación y chumacera hidrodinamica para la evaluación del efecto de la modificación de su superficie.,» Cuernavaca, Morelos, 2006.
- [62] M. Álvarez Vera, «Solución Numérica de la Ecuación de Reynolds del Flujo de Líquido Sinovial en el Espacio entre la Copa Acetabular y Acetábulo de una Prótesis de Cadera.,» Cuernavaca, 2007.

-
- [63] J. I. Pedrero Pérez, «Efecto del Recubrimiento por Triboadhesión del DLC y Bisulfuro de Molibdeno en el Desempeño y Desgaste de Anillos de Motores de Combustión Interna,» Cuernavaca, Morelos, 2009.
- [64] O. Kouya, «Characteristic and Applications of DLC films,» *NTN Technical Review*, nº 77, 2009.
- [65] M. Herrera, «Bases para el Diseño de Catéteres Intravenosos de Material Compuesto Particulado con DLC o Nanotubos de Carbono,» Cuernavaca Morelos, 2013.
- [66] J. Esguerra, «Comportamiento tribológico de hueso contra recubrimiento de titanito de calcio en fluido corporal simulado,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 16, pp. 279-286, 2015.
- [67] F. White, *Fluid mechanics*, 4a edición ed., Mc Graw Hill.
- [68] V. Streeter, *Fluid Mechanics*, 9a Edición ed., Mc Graw Hill, 2001.
- [69] R. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*, vol. Vol. 2, 1965.
- [70] R. Pit, H. Hervet y L. Leger, «Friction and slip of a simple liquid at a solid surface,» *Tribology letters*, nº 7, pp. 147-152, 1999.
- [71] L. ferras, J. Nobrega y F. Pinho, «Analytical solutions for Netonian and inelastic non-Newtonian flow with wall slip,» *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, pp. 76-88, 2012.
- [72] u. Yilmazer y D. Kalyon, «Slip Effects in capillary and parallel Disk Torsional Flows of highly filled suspensions,» *Journal of rheology*, vol. 33, nº 8, pp. 1197-1212, 1989.
- [73] C. Meinhart y D. Tretheway, «Inhomogeneous boundary conditions of hydrophobic microchannel surfaces,» de *Joint Fluids Engineering Conference*, Honolulu, 2003.
- [74] Z. Ren, X. Huang y H. Liu, «Wall slip velocity measurement of molten polypropylene in capillary flow based on length-corrected mooney technique,» *Applied Polymer Science*, vol. 134, nº 8, pp. 1-14, 2016.
- [75] V. Girault y P.-a. Raviart, *Finite Element Approximation of the Navier-stokes Equations*, New York: Springer-Verlag, 1979.
- [76] Ecuaciones de Navier-Stokes. Fenomenos Turbulentos.
- [77] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang y J. Zhu, «A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows,» *Computers & Fluids*, vol. 24, nº 3, pp. 227-238, 1995.

-
- [78] C. K. Batchelor, *An introduction to fluid dynamics.*, Cambridge university press., 2000.
- [79] N. Rolander, J. Rambo , Y. Joshi, J. Allen y F. Mistree, *An approach to robust design of turbulent convective*, 2006.
- [80] A. FLUENT, «ANSYS FLUENT user guide manual.,» 2006.
- [81] C. A. Oyarzún Suárez, «Análisis de Dinámica de Fluidos en un Perfil Aerodinámico,» 2005.
- [82] M. I. Lopez , «DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA DEPOSICIÓN UNIFORME DE MoS₂ Y Fe-75Si, POR EL PROCESO DE TRIBOADHESIÓN, EN LOS ACEROS SAE 4140 Y AISI 304,» Cuernavaca, 2001.
- [83] B. Bhushan, *Principles and Applications of Tribology*, 2a edición ed., Wiley, 2013.
- [84] A. Richard, *Thermodynamics of solids*, wiley, 1962.
- [85] P. Prokopovich y S. Perni, «Prediction od the frictional behavior od mammalian tissues against biomaterials,» *Elsevier*, 2010.
- [86] D. Tabor, «Friction the present statefor ours undertandong,» *ASME Journal of lubrication*, vol. 103, pp. 169-179, 1981.
- [87] D. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3a edición ed., Thomson, 1998.
- [88] G. Soriano, «DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN LAMINAS DE ACERO, SUJETAS AL PROCESO DE TRIBOADHESION,» Cuernavaca, Morelos, 2001.
- [89] Shirley Seireg, *Friction and lubrication in mechanics desing*, vol. 118, New York: CRC press, 2019.
- [90] E. Rabinowicz, *Friction and wear of materials*, New York: John Wiley & Sons, 1965.
- [91] J. M. Rodriguez, D. Vela, A. Abundez, S. Reyes, J. Navarro y M. Vargas, «EFFECT ON THE FILM PRESSURE DISTRIBUTION ON A HYDRODYNAMIC TILTING PAD BEARING CAUSED BY THE COATING OF THE JOURNAL WITH DLC BY TRIBOADHESION,» *ASME*, 2007.
- [92] J. Agüera Soriano, «Universidad de Córdoba,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.uco.es/termodinamica/ppt/pdf/fluidos%204.pdf>.
- [93] A. Grill y B. Meyerson, *Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology*, Wiley, 1994, p. 91.

- [94] H. Ronkainen, Tribological properties of hydrogenated and hydrogen-free diamond-like carbon coatings, Technical Research Center Of Finland, Espoo 2001.
- [95] J. Shachelford, Introduccion a la ciencia de materiales para ingenieros., 6a edicion ed., Pearson.
- [96] O. Lavige, A. Kotousov y V. Luzin, «Microstructural, Mechanical, Texture and Residual Stress Characterizations of X52 Pipeline Steel,» *MEtals* , vol. 7, nº 8, pp. 306-316, 2017.
- [97] T. M. I. GMBH, «Material data sheet X52,» THYSSENKRUPP MATERIALS INTERNATIONAL.
- [98] P. Ghosh, K. DasGupta, D. Nag y A. Chanda, «NUMERICAL STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF STENTS WITH DIFFERENT MATERIALS DURING STENT DEPLOYMENT WITH BALLOON EXPANSION,» de *Jadavpur University - School of Bio-Science and Engineering*, Bangalore, 2001.
- [99] «Petroleo,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.pemex.com/comercializacion/productos/Paginas/petroleo.aspx>. [Último acceso: 12 06 2018].
- [100] A. Sandoval, «Los Crudos mexicanos, sus características,» 1998.
- [101] H. Mobarak, H. Masjuki, E. Niza Mohamad, M. Kalam y H. Rashedul, «Tribological properties of amorphous hydrogenated (a-C:H) and hydrogen-free tetrahedral (ta-C) diamond-like carbon coatings underjatropa biodegradable lubricating oil at different temperatures,» *Applied Surface Science*, pp. 581-592, 2014.
- [102] P. Jokuty, S. Whiticar, K. McRoberts y J. Mullin, «Oil Adhesion Testing - Recent Result,» de *Proceedings of the Nineteenth Arctic MARine Oil Spill Program*, Ottawa, Canada, 1996.
- [103] J. leiva, G. Buscaglia, E. Dari y F. Basombrío, «INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO NO NEWTONIANO DE LA SANGRE EN LAS TENSIONES CORTANTES SANGRE-ENDOTELIO EN UNA ARTERIA CAROTIDA,» *Mecánica Computacional*, vol. XXIII, pp. 1521-1544, Noviembre 2004.
- [104] J. Leiva, F. Basombrio, G. Buscaglia y E. Dari, «Influencia del comportamiento no newtoniano de la sangre en las tensiones cortantes sangre-endotelio en una arteria carotida.,» *Mecánica Computacional*, vol. XXII, pp. 1521-1544, 2004.
- [105] J. Lawewnce y L. Li, «Carbon Steel Wettability Characteristics Enhancement for Improved Enamelling Using a 1.2 kW High Power Diode Laser,» *Optics and Laser in Engineering*, vol. 32, nº 4, pp. 353-365, 1999.

- [106] J. E. Palomares Ruiz, M. Suzuki Valenzuela , J. O´connor Blanco , M. Rodriguez Madrigal y A. Zandoval Figueroa , «Análisis y simulación de una vena como tejido biológico isotrópico,» *SONIM*, 2010.
- [107] J. Navarro, «Diseño de un dispositivo para deposicion en piezas mecanicas pequeñas por triboadhesion,» Cuernavaca, Morelos, 2004.
- [108] J. Torrent Burgués, «Medida del ángulo de contacto,» FOOT-UPC, terrassa.
- [109] B. Barbee y D. Duff, «Cómo resolver el desafío de la adherencia de las piezas al molde,» *Plastics }technology*, 12 02 2018. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/c%C3%B3mo-resolver-el-desaf%C3%ADo-de-la-adherencia-de-las-piezas-al-molde>.

ANEXO A.

Cálculo de coeficiente de fricción stent-sangre.

$\gamma=$	-1.98×10^{-6}		COT ²	0.58192	
Wadh=	40.2	J/m ²	radh =	6.60×10^{-9}	m
R*=	7.89×10^{-9}	m	rugosidad	2.40×10^{-6}	micra
Fadh=	1.48×10^{-6}	N	Esfuerzo cortante	5412	Pa
E*=	2.1209×10^{11}	Pa			
Radio de contacto (m)	6.2123×10^{-9}	m	Coeficiente de fricción	0.018	

Material	Conductividad térmica	Calor específico	Densidad	Dureza indentación	M. Young	Esf. Fluenc.	Fusión	Cte.red	Energía Sup.	Poisson	radio	viscosidad dinámica	ángulo de contacto	tensión superficial	ángulo en radianes
	W/mK	J/kgK	Kg/m ³	Pa	Pa	Pa	K	m	J/m ²		m	pas.s	°c	N/m	
Stent	16.3	502	7850	3×10^{11}	1.93×10^{11}	5.50×10^8	1643.15	1.25×10^{-10}	8	0.3	9.70×10^{-7}		52.7		0.919
sangre			1051						50.5		7.9×10^{-10}	44		0.056	

ANEXO B.

Cálculo de coeficiente de fricción sangre-DLC.

$\gamma=$	-3.2174×10^{-7}		COT ²	0.32118	
Wadh=	64.82	J/m ²	radh =	3.9281×10^{-9}	m
R*=	7.8988×10^{-10}	m	rugosidad	1.3750×10^{-6}	micra
Fadh=	2.4131×10^{-7}	N	Esfuerzo cortante	541	Pa
E*=	8.333×10^{11}	Pa			
Radio de contacto (m)	9.9999×10^{-10}	m	Coeficiente de fricción	0.0568	

Material	Densidad	Dureza indentación	M. Young	Esf. Fluenc.	Energía Sup.	Poisson	radio molecular	viscosidad dinámica	ángulo de contacto	tensión superficial	ángulo en radianes
	Kg/m ³	Pa	Pa	Pa	J/m ²		m	pas.s	°c	N/m	
DLC	2200	2×10^{10}	8×10^{11}	4.5×10^9	20.8	0.2	5×10^{-5}	3.56×10^{-13}	60.4584		1.05519
Sangre	1051				50.5		7.9×10^{-9}	44		0.0056	

ANEXO C

Cálculo de coeficiente de fricción petróleo-acero x52

$\gamma=$	-1.6×10^{-8}		COT ²	0.9051	
Wadh=	16.551	J/m ²	radh =	4.26×10^{-10}	m
R*=	1.5398×10^{-10}	m	rugosidad	2.4×10^{-6}	micra
Fadh=	1.2009×10^{-8}	N	Esfuerzo cortante	2.63×10^8	Pa
E*=	2.3077×10^{11}	Pa	Coeficiente de fricción 0.262		
Radio de contacto (m)	3.2719×10^{-10}	m			

Material	Densidad	Dureza indentación	M. Young	Esf. Fluenc.	Energía Sup.	Poisson	radio molecular	viscosidad dinámica	ángulo de contacto	tensión superficial	ángulo en radianes
	Kg/m ³	Pa	Pa	Pa	J/m ²		m	pas.s	°c	N/m	
Petróleo	927.09				8.56		1.54×10^{-10}	86.7		0.0309	
Acero X52	7850	2×10^{11}	2.1×10^{11}	4.55×10^8	8	0.3	9.7×10^7		46.43		0.81

ANEXO D.**Cálculo de coeficiente de fricción petróleo-DLC.**

$\gamma=$	-2.5822×10^{-8}		COT ²	0.5287	
Wadh=	26.687	J/m ²	radh =	1.9722×10^{-9}	m
R*=	1.54×10^{-10}	m	rugosidad	1.3750×10^{-6}	micra
Fadh=	1.9367×10^{-8}	N	Esfuerzo cortante	2798.138	Pa
E*=	2.5011×10^{11}	Pa			
Radio de contacto (m)	2.5011×10^{-10}	m	Coeficiente de fricción	0.0878	

Material	Densidad	Dureza indentación	M. Young	Esf. Fluenc.	Energía Sup.	Poisson	radio molecular	viscosidad dinámica	ángulo de contacto	tensión superficial	ángulo en radianes
	Kg/m ³	Pa	Pa	Pa	J/m ²		m	pas.s	°c	N/m	
DLC	2200.000	2×10^{10}	8×10^{11}	4.5×10^9	20.8	0.2	5×10^{-5}		54		0.942
petróleo	927.1				8.560		1.54×10^{-10}	86.7		0.0309×10^{-2}	

ANEXO E

Cálculo de modelo y prototipo

Basados en la teoría de semejanza del capítulo 2 el parámetro adimensional a utilizar es el Reynolds

Datos de modelo

$$v_m = 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_m = 0.05251 \text{ m}$$

$$v_m = 1.697 \text{ m/s}$$

Datos prototipo

$$v_p = 1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_p = 0.0254 \text{ m}$$

$$v_p = ?$$

$$Re_p = Re_m$$

$$Re_p = \frac{v_p D_p}{\nu_p} = Re_m = \frac{v_m D_m}{\nu_m}$$

$$\frac{v_p(0.0254)}{1.003 \times 10^{-6}} = \frac{(1.697)(0.05251)}{1.4 \times 10^{-4}}$$

$$v_p = \frac{(1.697)(0.05251)(1.003 \times 10^{-6})}{(1.4 \times 10^{-4})(0.0254)}$$

$$v_p = \frac{8.93867 \times 10^{-8}}{3.556 \times 10^{-6}}$$

$$v_p = 0.0251 \text{ m/s}$$