

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias



Estudio de lubricación aplicada a biopolímeros utilizados para la
fabricación de prótesis durante el proceso de conformado incremental
monopunto

Tesis presentada por

JOSÉ ANTONIO SANDOVAL ASIMBAYA

sometida a la

Escuela de Ingeniería y Ciencias

como un requisito parcial para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias

en

Con especialidad en sistemas de manufactura

Monterrey Nuevo León, Diciembre de 2017

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo:

- A Dios por hacer realidad el sueño que un día tuve.
- A mis padres por su amor y consejos.
- A mi hermano que siempre me ha dado ánimos en todo momento.
- A mi sobrino Esteban Daniel, del cual espero mucho como persona y profesional.

Reconocimientos

Quiero agradecer a:

- Al doctor José Manuel Diabb, por sus consejos y opiniones de gran valor durante el desarrollo de este estudio
- Al doctor Oscar Martínez por su guía y consejos
- Al doctor Alex Elías por sus ideas y propuestas para el desarrollo correcto de este proyecto
- A la Maestra Regina Vargas por su ayuda incondicional
- Al doctor Luis Manuel Palacios por ser parte del comité de revisión
- A mi amigo Diego Aguilar por su amistad y opiniones durante el desarrollo del proyecto
- A mi familia por ayudarme en cada momento que lo necesite
- A mi amiga Lucia Ramos por su amistad y ayuda incondicional
- Al Consejo nacional de ciencia y tecnología por la ayuda económica brindada durante mis estudios
- Al Tecnológico de Monterrey por permitirme ser parte de su institución y por la beca otorgada para cursar el programa de maestría

Estudio de lubricación aplicada a biopolímeros utilizados para la fabricación de prótesis durante el proceso de conformado incremental monopunto

por

José Antonio Sandoval Asimbaya

Resumen

Actualmente el uso de lubricantes minerales y sintéticos se ha convertido en un problema debido al tratamiento que deben recibir después de su uso, causando un impacto ambiental por lo que las nuevas tecnologías han permitido desarrollar nuevos materiales, el uso de la nanotecnología en la lubricación permite obtener mejorar el rendimiento de diferentes lubricantes como es el caso de los aceites vegetales y la mezcla agua – glicerina convirtiéndolos en una opción para disminuir el consumo de los lubricantes base petróleo por lo cual es necesario realizar una análisis de su comportamiento en diferentes situaciones.

En el presente proyecto se realizó un estudio de lubricación aplicado al conformado incremental monopunto (SPIF) utilizando como materiales polímeros biocompatibles UHMWPE y HDPE, los lubricantes empleados fueron Mezcla agua – glicerina, aceite de girasol, aceite mineral, de los cuales a la mezcla agua – glicerina y aceite de girasol se añadieron nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2) con una concentración de 25 por ciento en peso, la concentración fue tomada de un trabajo previo realizado por (Diabb et al. 2017).

Se determino los parámetros variables de acuerdo a trabajos previos los cuales mencionan que al incrementarse la temperatura del proceso ayuda la formabilidad, además disminuye la fuerza necesaria para deformar plásticamente el material, es por tal razón que para este estudio se evaluó el desempeño del lubricante a diferentes velocidades de giro de la herramienta, sometiendo al lubricante a diferentes regímenes de lubricación, los cuales son analizados mediante la curva típica Stribeck, la cual relaciona el indicador de fricción y el número de Sommerfeld.

Al usar distintos lubricantes los cuales son usados en un proceso de manufactura se espera tener diferentes rugosidades superficiales lo cual está relacionado directamente con el desgaste, los lubricantes son expuestos a cargas elevadas debido a que el material se lo deforma plásticamente, lo cual produce un cambio en la viscosidad del lubricante, provocando que en cierto momento la película de lubricación sea muy delgada lo que conlleva a que las superficies entren en contacto produciendo una deformación plástica en la superficie del material sin medio de lubricación provocando la formación de partículas de desgaste,

Se observo que el desempeño del aceite de girasol fue similar al del aceite mineral en términos de fricción y rugosidad superficial, esto se debe a la cantidad de ácido esteárico presente en el aceite vegetal el cual está relacionado directamente con la fricción y el desgaste.

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Metodología establecida | 6 |
| Fig. 2.1 Máquina propuesta por Leszak (Leszak 1967)..... | 7 |
| Fig. 2.2 Máquina propuesta por Berghahn (Berghahn and Murray Jr 1967)..... | 8 |
| Fig. 2.3 Principio del conformado incremental mono-punto (SPIF) (Iseki et al. 1989) | 9 |
| Fig. 2.4 Dispositivo para Backward bulge forming y trayectoria de herramienta (Matsubara 1994)..... | 9 |
| Fig. 2.5 Conformado incremental mono punto (Jeswiet et al. 2008)..... | 10 |
| Fig. 2.7 Soporte para SPIF | 11 |
| Fig. 2.8 a) trayectoria de la herramienta. b) traslado entre contornos (Flores et al. 2007)..... | 12 |
| Fig. 2.9 Variables claves del proceso SPIF (Martins et al. 2008)..... | 13 |
| Fig. 2.10 Distribución de temperatura medida durante proceso SPIF aplicado a PVC: a) velocidad de herramienta 2000 rpm, b) Rotación libre (I. Bagudanch et al. 2015)..... | 14 |
| Fig. 2.11 Mecanismo de fricción entre dos materiales de diferente dureza. (Blau 2001)..... | 16 |
| Fig. 2.12 Caracterización de regímenes de fricción según la curva Stribeck (Woydt and Wäsche 2010) | 17 |
| Fig. 2.13 Posibles mecanismos de lubricación mediante la aplicación de un nanolubricante entre las superficies en contacto (Lee et al. 2009)..... | 19 |
| Fig. 2.14 Sedimentación de las nanopartículas de SiO ₂ en parafina líquida (Peng et al. 2010a) | 20 |
| Fig. 2.15 características morfológicas del UHMWPE (Kurtz 2004) | 21 |
| Fig. 3.1 Generatriz empleada | 30 |
| Fig. 3.2 Cono truncado..... | 30 |
| Fig. 3.2 Cono truncado..... | 32 |
| Fig. 3.3 a) cámara termográfica, b) Dinamómetro, c) Registrador de energía, d) Amplificador y tarjeta de adquisición de datos | 33 |
| Fig. 3.4 Centro de mecanizado Kryle 535 VMC..... | 33 |
| Fig. 4.1 Fuerzas ortogonales | 34 |
| Fig. 4.2 a) Fuerzas ortogonales (F _x , F _y y F _z) y b) vista a detalle de las tres componentes para el polímero HDPE | 35 |
| Fig. 4.3 a) Fuerzas ortogonales (F _x , F _y y F _z) y b) vista a detalle de las tres componentes para el polímero UHMWPE | 35 |
| Fig. 4.4 Relación entre las fuerzas planares F _x , F _y y las fuerzas: tangencial (F _t) y radial (F _r). (Aerens et al. 2010)... | 36 |
| Fig. 4.5 Fuerza tangencial y radial para el polímero HDPE | 37 |
| Fig. 4.6 Fuerza tangencial y radial para el polímero UHMWPE..... | 37 |
| Fig. 4.7 Fuerza planar (F _{xy}) HDPE: a) 0 rpm Y b) 2000 rpm..... | 38 |
| Fig. 4.8 Fuerza planar (F _{xy}) UHMWPE: a) 0 rpm Y b) 2000 rpm | 38 |
| Fig. 4.9 Proyección de la fuerza vertical actuando sobre la herramienta, a lo largo de una línea de contacto normal. 39 | |
| Fig. 4.10 Ángulos de pared de la geometría utilizada | 39 |
| Fig. 4.11 Coeficiente de fricción usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm | 40 |
| Fig. 4.12 Coeficiente de fricción usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm | 40 |
| Fig. 4.13 Registro de temperatura usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm | 41 |
| Fig. 4.14 Registro de temperatura usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm..... | 41 |
| Fig. 4.15 Fuerza planar – temperatura usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm..... | 42 |
| Fig. 4.16 Fuerza planar – temperatura usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm | 42 |
| Fig. 4.17 Consumo energético usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE y HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm | 43 |
| Fig. 4.18 Zonas de medición de rugosidad..... | 45 |
| Fig. 4.19 Análisis EDS a muestra inicial de UHMWPE | 45 |
| Fig. 4.20 Análisis EDS a muestra de UHMWPE deformada a 0 RPM | 46 |
| Fig. 4.21 Análisis EDS a muestra de UHMWPE deformada a 2000 RPM | 46 |
| Fig. 4.22 a) Viscosímetro HAAKE 7 Plus b) husillo L1 | 47 |
| Fig. 4.23 a) viscosímetro de ostwald b) Intervalo de medición..... | 48 |
| Fig. 4.24 Viscosidad dinámica de los lubricantes convencionales y nanoestructurados | 49 |
| Fig. 4.25 Intervalo de tiempo para un contorno realizado en el proceso SPIF | 50 |
| Fig. 4.26 Intervalo de tiempo para un contorno realizado en el proceso SPIF | 50 |
| Fig. 4.27 a) Fuerza normal b) Ángulos utilizados para el cálculo de la fuerza normal..... | 51 |

| | |
|--|----|
| Fig. 4.28 Fuerza vertical y normal | 51 |
| Fig. 4.29 Curva Stribeck – SPIF HDPE 0 RPM..... | 52 |
| Fig. 4.30 Curva Stribeck – SPIF HDPE 2000 RPM..... | 52 |
| Fig. 4.31 Curva Stribeck – SPIF UHMWPE 0 RPM..... | 53 |
| Fig. 4.32 Curva Stribeck – SPIF UHMWPE 2000 RPM..... | 53 |
| Fig. 4.33 Proceso manufactura de implante | 55 |
| Fig. 4.34 a) modelación del implante, b) estrategia de la trayectoria de la herramienta, c) manufactura de la prótesis por SPIF, d) prótesis craneal | 56 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Propiedades físicas del HDPE y UHMWPE (Kurtz 2004)..... | 21 |
| Tabla 2.2 Parámetros utilizados para estudios de lubricación en SPIF | 25 |
| Tabla 2.3 Parámetros utilizados para fabricación de prótesis en metales por SPIF | 26 |
| Tabla 2.4 Parámetros utilizados para fabricación de prótesis en polímeros por SPIF | 27 |
| Tabla 3.1 Parámetro variable | 29 |
| Tabla 3.2 Parámetros fijos..... | 29 |
| Tabla 3.3 lubricantes empleados para el estudio | 30 |
| Tabla 3.4 Matriz experimental para polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y de alta densidad (HDPE) | 31 |
| Tabla 4.1 Rugosidades HDPE – 0 RPM..... | 44 |
| Tabla 4.2 Rugosidades HDPE – 2000 RPM..... | 44 |
| Tabla 4.3 Rugosidades UHMWPE – 0 RPM | 44 |
| Tabla 4.4 Rugosidades UHMWPE – 2000 RPM | 44 |
| Tabla 4.5 Viscosidades obtenidas para aceite de girasol y aceite mineral..... | 48 |
| Tabla 4.6 Densidades y tiempos de flujo a diferentes temperaturas para mezcla agua – glicerina..... | 49 |
| Tabla 4.7 Densidades y tiempos de flujo a diferentes temperaturas para mezcla agua - glicerina | 49 |

Índice

| | |
|---|-----|
| Resumen..... | VI |
| Lista de Figuras..... | VII |
| Lista de Tablas..... | IX |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Motivación..... | 3 |
| 1.2. Objetivo general..... | 4 |
| 1.3. Objetivos específicos..... | 4 |
| 1.4. Justificación..... | 5 |
| 1.5. Hipótesis..... | 5 |
| 1.6. Metodología..... | 6 |
| 2. Marco Teórico..... | 7 |
| 2.1. Conformado incremental..... | 7 |
| 2.2. Variantes del conformado incremental..... | 9 |
| 2.2.1. Conformado incremental doble punto (TPIF)..... | 9 |
| 2.2.2. Conformado incremental mono punto (SPIF)..... | 10 |
| 2.3. Conformado incremental mono punto (SPIF)..... | 10 |
| 2.3.1. Trayectoria de la herramienta..... | 11 |
| 2.4. Variables del conformado..... | 12 |
| 2.4.1. Material..... | 13 |
| 2.4.2. Angulo de pared inicial..... | 13 |
| 2.4.3. Tamaño de la herramienta..... | 13 |
| 2.4.4. Paso incremental..... | 13 |
| 2.4.5. Velocidades de conformado..... | 14 |
| 2.4.6. Espesor de placa..... | 14 |
| 2.4.7. Lubricante y geometría..... | 15 |
| 2.5. La fricción en el conformado incremental monopunto..... | 15 |
| 2.6. Lubricación..... | 16 |
| 2.6.1. Regímenes de lubricación..... | 16 |
| 2.6.2. Tipos de lubricantes..... | 17 |
| 2.7. Nanolubricación..... | 18 |
| 2.8. Variables en la nanolubricación..... | 19 |
| 2.8.1. Fracción de masa..... | 19 |
| 2.8.2. Aglomeración..... | 20 |
| 2.8.3. Estabilidad..... | 20 |
| 2.9. Polietileno de ultra alto peso molecular y de alta densidad..... | 20 |
| 2.10. Trabajos de investigación relacionados..... | 22 |
| 3. Experimentación..... | 28 |
| 3.1. Materiales..... | 28 |
| 3.2. Preparación del nanolubricante..... | 28 |
| 3.3. Selección de parámetros para el estudio..... | 29 |
| 3.4. Geometría y generatriz empleada..... | 30 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.5. | Plan experimental | 31 |
| 3.6. | Proceso de conformado incremental monopunto | 32 |
| 4. | Resultados y discusión | 34 |
| 4.1. | Medición de fuerzas..... | 34 |
| 4.2. | Indicador de fricción..... | 38 |
| 4.3. | Influencia de la temperatura en las fuerzas de formado | 41 |
| 4.3.1. | Medición de temperatura del proceso..... | 41 |
| 4.3.2. | Temperatura y fuerzas de formado..... | 42 |
| 4.4. | Consumo energético | 43 |
| 4.5. | Análisis superficial | 44 |
| 4.5.1. | Medición de rugosidades..... | 44 |
| 4.5.2. | Caracterización de la superficie mediante microanálisis por sonda de electrones (EDS)..... | 45 |
| 4.6. | La curva stribeck | 47 |
| 4.6.1. | Viscosidad..... | 47 |
| 4.6.2. | Velocidad..... | 50 |
| 4.6.3. | Fuerza normal | 51 |
| 4.6.4. | Curva Stribeck – SPIF para HDPE 0 RPM | 52 |
| 4.6.5. | Curva Stribeck – SPIF para HDPE 2000 RPM | 52 |
| 4.6.6. | Curva Stribeck – SPIF para UHMWPE 0 RPM..... | 53 |
| 4.6.7. | Curva Stribeck – SPIF para UHMWPE 0 RPM..... | 53 |
| 4.7. | Aplicación caso clínico..... | 55 |
| 5. | Conclusiones | 57 |
| 6. | Contribuciones | 58 |
| 7. | Trabajo futuro..... | 59 |
| | Apéndice | 60 |
| | Referencias..... | 62 |
| | Curriculum vitae | 68 |

1. Introducción

El conformado incremental monopunto (SPIF, Single Point Incremental Forming) ha demostrado ser un proceso de fabricación flexible, ya que puede utilizarse en varios campos como: médico, automotriz, aeronáutico entre otros.

Debido a que es un proceso en el cual no se utilizan herramientas especializadas en comparación con los procesos de conformación tradicionales, es muy rentable para desarrollar dispositivos personalizados. Las herramientas y equipos que se utilizan con frecuencia para este proceso son: una máquina CNC, una herramienta de punta esférica o plana y un soporte en donde se encuentra el material a deformar. Los materiales comúnmente utilizados para este proceso son: aluminio, acero, polímeros termoplásticos.

SPIF es un proceso de fabricación barato y versátil, se debe tener en cuenta que se lo utiliza para volúmenes de producción bajos debido a sus tiempos de fabricación e instalación.

Durante el proceso se presentan distintos efectos como: corte a través del espesor, esfuerzos residuales, recuperación elástica (principalmente en polímeros), mecanismo de deformación entre otros, algunos de ellos contribuyen a una mejor formabilidad del material, sin embargo, un factor importante dentro del proceso es el uso de lubricantes ya que ayudan a disminuir la fricción generada entre la herramienta y el material a deformar con la ayuda de un buen lubricante el desgaste en la superficie es menor, el estudio de desgaste aplicado a este proceso de manufactura en su mayoría ha sido aplicado a metales por lo que, es importante realizar un estudio en el cual se utilicen polímeros como materiales a deformar ya que estos materiales además de ser usados en la parte médica para la fabricación de prótesis de distantes partes del cuerpo, hay una brecha de conocimiento en cuanto el desgaste que se genera en su superficie al exponerlo a un material de mayor dureza en un proceso de manufactura.

En la mayoría de estudios con relación al conformado incremental monopunto, se analiza el mecanismo de deformación, las fuerzas generadas, la precisión geométrica del proceso, dejando a un lado el estudio de lubricación siendo parte importante para la calidad superficial del dispositivo final obtenido

El uso del lubricante correcto ayuda a aumentar la vida útil de la herramienta, disminución en las fuerzas producidas a causa de la deformación, menor consumo energético y disminución del calor generado entre la herramienta y el material por lo que autores como (Azevedo et al. 2015) utilizaron lubricantes sólidos y líquidos para deformar láminas de aluminio 1050 y acero DP780. De acuerdo con sus resultados, mencionan que existe una aparente relación entre la viscosidad del lubricante y la dureza del material a deformar, además bajo un cierto conjunto de parámetros de formación, el lubricante empleado afecta directamente la calidad superficial del prototipo final.

Al usar lubricantes sintéticos durante el conformado incremental mono punto, se generan residuos, los cuales son una combinación de metal y aceite, esta combinación es dañina para el medio ambiente y genera un impacto ambiental, actualmente ha emergido distintos estudios en los cuales se estudia y evalúa el comportamiento de lubricantes de

origen vegetal a cargas extremas, sin embargo dichos estudios no han sido aplicados a un proceso de manufactura sin embargo en el estudio propuesto por (Diabb et al. 2017) utilizaron nanopartículas de óxido de silicio como aditivos en lubricantes del tipo vegetal, las nanopartículas mejoran la viscosidad del lubricante dependiendo de la concentración de las mismas en el aceite, los resultados del estudio mostraron que ciertas composiciones de nanopartículas dentro del lubricante contribuyen a un mejor acabado superficial, reducción de fuerzas generadas por el proceso de fabricación y el consumo de energía de la máquina CNC. Si la concentración de nanopartículas aumenta, aumenta el desgaste del material provocando la falla, por lo que es necesario tener en cuenta el régimen de lubricación idóneo para el lubricante empleado mediante el uso de la curva stribeck, la cual relaciona el coeficiente de fricción teórico con el espesor de la película de lubricante.

Diferentes tipos de nanopartículas se han utilizado como aditivos en diferentes lubricantes, dichos estudios han mencionado varios efectos de las nanopartículas sobre la superficial del material en el cual se experimentó, uno de ellos es el efecto de reparación (mending effect), el cual detalla como las nanopartículas se depositan en las superficies donde existe desgaste. El otro efecto mencionado es el de pulido (polishing effect), el cual habla sobre el comportamiento de las nanopartículas como esferas, las cuales pulen la superficie del material mejorando su rugosidad superficial, los efectos anteriores se han documentado en el estudio de (Liu et al. 2004). El estudio tribológico de los nanolubricantes contribuye a una mejor comprensión de cómo actúan las nanopartículas al momento de lubricar dos superficies en contacto, una de las nanopartículas más utilizadas en diferentes estudios son de óxido de silicio (SiO_2), dichas nanopartículas de óxido de silicio se han utilizado en estudios de: (Peng et al. 2010a), (Peng et al. 2009), (Bao, Y. Y., Sun, J. L., & Kong 2017), (Patil, Chavan, and Pise 2013) los estudios mencionados son del tipo tribológico aplicado a materiales metálicos por lo que existe poca literatura en la cual se estudia la aplicación de nanolubricante a polímeros. Se han propuesto diferentes investigaciones de tribología aplicado a polímeros en los cuales se emplean equipos para realizar ensayos de desgaste mediante rozamiento de los materiales, con lo cual se obtiene cuantificar el desgaste y el coeficiente de fricción empleando como lubricante aceite mineral en su mayoría o realizando el ensayo sin aplicación de lubricante, en el artículo publicado por (Zhang 1998) realiza una revisión de propósitos tribológicos aplicado a elastómeros, plásticos y compuestos poliméricos ya que estos materiales son usados para la fabricación de sellos, engranes, cojinetes, embragues, prótesis médicas, entre otras. En su estudio detalla que la fricción tiene un origen viscoelástico bajo ciertas condiciones de carga aplicada para su deformación, distintos estudios fueron citados en cada uno se especifica el material utilizado entre ellos son: poliamida (PA), polietileno (PE), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), entre otros, las diferentes investigaciones fueron realizados en condiciones de laboratorio mas no en procesos reales como un proceso de manufactura habitual como el proceso de conformado mecánico, por este motivo en el presente proyecto se propone estudiar la influencia de diferentes lubricantes del tipo vegetal, base agua y base petróleo, usando como aditivo nanopartículas de óxido de silicio para mejorar su capacidad de lubricación cuando se expone al lubricante a cargas elevadas durante el proceso de conformado incremental monopunto utilizando como material a deformar polímeros biocompatibles: polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), se espera obtener los regímenes de lubricación de cada lubricante

mediante el uso de las gráficas stribek, la cual relaciona el coeficiente de fricción y el espesor de película, para graficar dichas curvas se realizara el análisis de fuerzas que se producen durante el proceso permitiendo el cálculo del coeficiente de fricción el cual relaciona la fuerza tangencial con la fuerza normal, se evaluara la viscosidad de los diferentes lubricantes a distintas temperaturas, la rugosidad superficial se la obtendrá mediante el uso de un microscopio confocal y se la comparara con el coeficiente de fricción teórico, se verificara la presencia de nanopartículas de óxido de silicio en la superficie de los diferentes polímeros usando espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), con la cual se cuantificara el contenido presente de nanopartículas en la superficie. Se relacionará la temperatura, consumo energético y fuerzas planares que se genera durante el proceso con los diferentes lubricantes usados y su influencia sobre el polímero utilizado, contribuyendo a una mejor comprensión del fenómeno de fricción y desgaste en el proceso de conformado incremental monopunto aplicado a polímeros.

1.1. Motivación

El conformado incremental monopunto es un proceso en el cual el material está sometido a dos tipos de fuerzas: formabilidad y fricción (Lu et al. 2014), ya que es un proceso de fabricación similar a los procesos convencionales de estampado, rechazo y extrusión.

Debido a la fricción generada por el contacto entre la herramienta y el material, es necesario usar un lubricante que forme una capa entre la interfaz de la herramienta y el material. En los procesos de mecanizado para reducir el calor generado por la fricción producida entre la herramienta y el material a devastar se utilizan refrigerantes, cuyo precio es muy elevado y su uso contamina el medio ambiente; en los procesos de conformado el uso de lubricantes sintéticos genera residuos tóxicos, lo que genera más gastos para su debido tratamiento ya que en su composición química están presente elementos químicos como fósforo, azufre y cloro, los cuales tienen un impacto ambiental debido a su uso a gran escala (Peng et al. 2009).

La formabilidad y la calidad de la superficie son factores muy importantes en SPIF, ya que dependen de los parámetros utilizados durante el proceso, es importante decir que los parámetros en el conformado incremental monopunto son interdependientes y sus efectos no son constantes (McAnulty, Jeswiet, and Doolan 2017). Los parámetros analizados en diferentes estudios son: espesor de lámina, tipo de herramienta, diámetro de la herramienta, velocidad de avance de la mesa de trabajo, velocidad de giro del husillo, paso incremental, ángulo de la pared, material utilizado y lubricante utilizado.

Para la rugosidad superficial existen diferentes criterios con respecto a la elección de los parámetros, en estudios previos se presentan diferentes resultados los cuales mencionan la interacción entre el ángulo de la pared y el paso incremental el cual afecta calidad superficial debido al rastro que deja la herramienta sobre la del material deformado, además se debe considerar la velocidad de alimentación para la mesa de trabajo de la máquina CNC porque a altas velocidades de alimentación, hay un incremento en la fricción generada por el contacto entre la herramienta y el material, la temperatura generada por la fricción entre la herramienta y el material disminuye la

viscosidad del aceite produciendo un adelgazamiento en el espesor de la película de lubricación provocando que las superficies entre en contacto aumentando las fuerzas de conformado y el consumo energético de la máquina, el parámetro de diámetro de la herramienta afecta la superficie de rugosidad porque un menor diámetro causa mayores concentraciones de tensión, causa un incremento en la temperatura evitando que el lubricante funcione eficientemente. La limitación encontrada en los trabajos mencionados es el tipo de lubricante utilizado. Además, que los artículos citados han empleado como material a deformar metal dejando un lado el fenómeno de fricción en polímeros.

En algunas investigaciones importantes como (Hamilton and Jeswiet 2010), (Mugendiran, Gnanavelbabu, and Ramadoss 2014), (Chinnaiyan and Jeevanantham 2014), (Jeswiet and Young 2005), (Hussain et al. 2013), (Cawley, Adams, and Jeswiet 2013), (Bhattacharya et al. 2011), modificaron diferentes parámetros utilizados durante el conformado incremental por lo cual cada uno obtuvo resultados diferentes. Para cada caso de estudio se mantiene constante por al menos un parámetro, el tipo de lubricante utilizado no se menciona en algunos de ellos, mencionan que la rugosidad superficial aumenta en los siguientes casos: cuando el diámetro de la herramienta disminuye, cuando hay un incremento en el paso incremental, al disminuir el ángulo de la pared, al aumentar la rotación de la herramienta y en cuanto a la formabilidad es directamente influenciada por el paso incremental y el diámetro de la herramienta

Debido a lo anterior, se consideró importante implementar el uso de lubricantes de distinta composición: vegetales, base agua y mineral, el aceite mineral es comúnmente usado para procesos de conformado siendo reportado como un excelente lubricante, para mejorar la capacidad de lubricación del aceite vegetal y el lubricante base agua se adiciono nanopartículas de óxido de silicio como aditivos lo cual permitirá obtener una comparación al momento de su uso en el proceso con respecto al aceite mineral, ya que se puede disminuir el costo de la fabricación de la prótesis si se usara un lubricante del tipo vegetal de fácil acceso y amigable con el medio ambiente empleando los siguientes biopolímeros: polietileno de alta densidad y de ultra alto peso molecular, con el cambio del parámetro de velocidad de giro de herramienta se podrá observar si el cambio en el coeficiente de fricción es significativo ya que depende de las fuerzas generadas en el proceso además mediante pruebas de biocompatibilidad se analizara si los lubricantes usados presentan algún riesgo tanto para el operario del proceso como para el paciente que usara la prótesis.

1.2. Objetivo general

Estudiar los regímenes de lubricación durante el conformado incremental monopunto de polímeros biocompatibles: UHMWPE y HDPE, a través de la curva Stribeck-SPIF utilizando lubricantes convencionales y nanoestructurados.

1.3. Objetivos específicos

Del objetivo general, se derivan los siguientes objetivos de este trabajo de investigación:

- Estudiar los regímenes de lubricación mediante las curvas stribeck

- Medir la temperatura generada durante el proceso de conformado
- Relacionar el consumo energético de la maquina con las fuerzas producidas durante el proceso
- Investigar el efecto de dispersión de las nanopartículas de óxido de silicio en los lubricantes usados
- Analizar la superficie de los biopolímeros utilizados (HDPE y UHMWPE) a través del método EDS para determinar la presencia de nanopartículas de óxido de silicio.
- Medir la rugosidad de la superficie de los biopolímeros (HDPE y UHMWPE) después de haberlos deformado.

1.4. Justificación

Para evaluar el desempeño de los diferentes lubricantes usados durante el proceso de conformado incremental monopunto se los pondrá a prueba en diferentes condiciones de velocidad de giro de la herramienta lo cual incrementara o disminuirá la fricción entre las dos superficies en contacto (herramienta-material), de este modo se podrá conocer los diferentes regímenes de lubricación a los cuales están sometidos los lubricantes durante el proceso por lo cual se escogerá el adecuado mediante el criterio de disminución de rugosidad superficial, fuerzas de conformado y temperatura durante el proceso además del costo de adquisición permitiendo disminuir el costo de fabricación de prótesis medicas realizadas en biopolímeros.

1.5. Hipótesis

El cambio de parámetros y el uso de lubricantes convencionales y nanoestructurados modifican los regímenes de lubricación durante el proceso SPIF. Esta modificación se reflejará en las fuerzas de formado, temperatura del proceso, consumo de energía y en la rugosidad de la superficie de los polímeros biocompatibles: polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y de alta densidad (HDPE).

1.6. Metodología

El proyecto fue desarrollado con la metodología definida, que se muestra en varias etapas para cumplir con los diferentes objetivos establecidos:

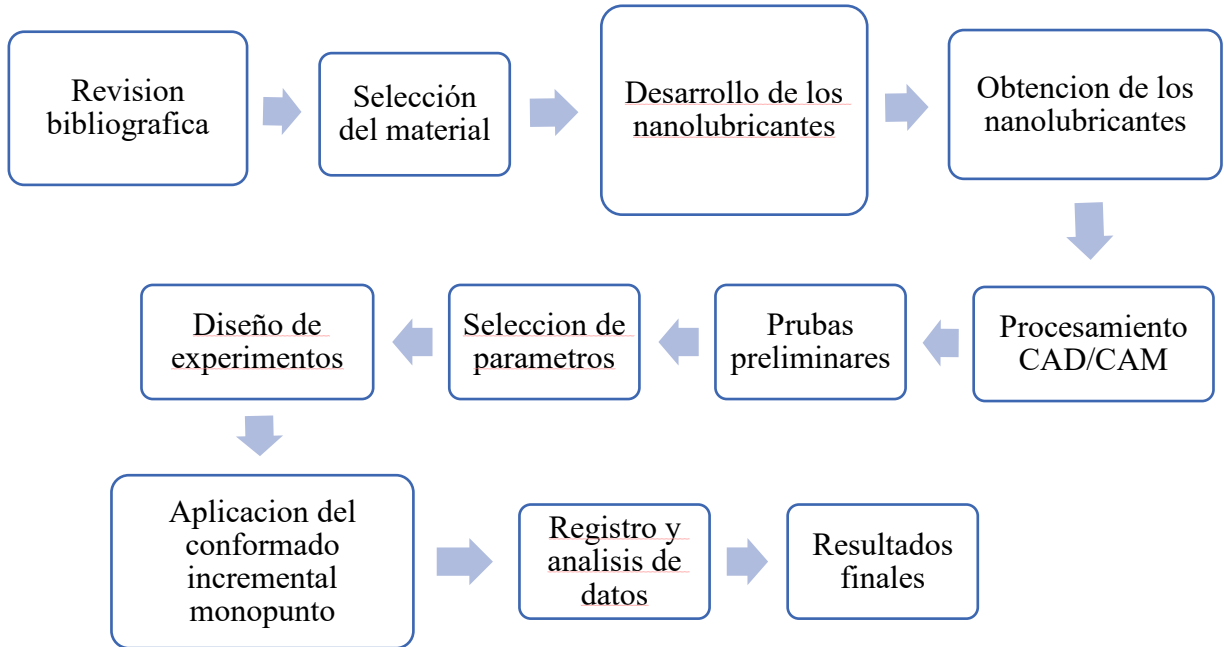


Fig. 1.1 Metodología establecida

2. Marco Teórico

En el presente capítulo, se presentará el marco teórico el cual constará de tres secciones generales, en primer lugar, se revisará los conceptos fundamentales sobre el conformado incremental monopunto para dar una introducción general dando énfasis en su aplicación a polímeros. Posteriormente se analizarán los conceptos de lubricación y nanolubricante que se utilizarán en el presente proyecto y finalmente se presentará una revisión del uso de los polímeros HDPE y UHMWPE en su aplicación a prótesis médicas.

2.1. Conformado incremental

Nuevos procesos de manufactura han emergido, uno de ellos es el conformado incremental el cual consiste en deformar sucesivamente una chapa ya sea metálica o polímero, siendo un proceso atractivo para lotes de piezas personalizadas, ya que su tiempo de instalación y de producción son muy elevados en comparación a los procesos de conformado tradicionales, el proceso es ampliamente utilizado en la industria automotriz, aeroespacial, médica, entre otros.

La primera iniciativa de usar el conformado incremental mediante una maquina sin la utilización de herramientas especiales se registra en la patente de (Leszak 1967) el cual consistía en que una chapa metálica fuera sostenida por dos mordazas, mediante un rodillo se produce la deformación plástica del material, el rodillo tomaba diferentes posiciones desplazándose verticalmente de esta forma se conseguía la forma simétrica deseada.

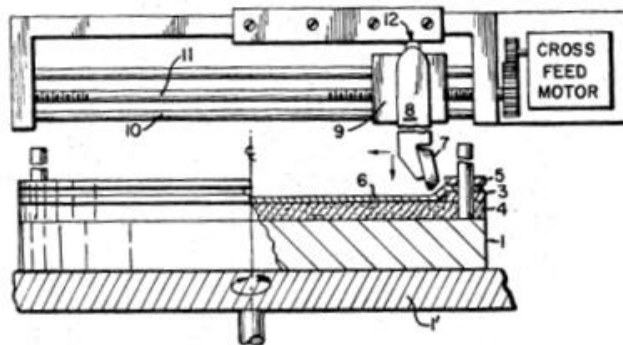


Fig. 2.1 Máquina propuesta por Leszak (Leszak 1967)

(Berghahn and Murray Jr 1967) patentaron una maquina en la cual la lámina se deforma sobre una base giratoria mediante el movimiento de un rodillo sobre el material, el movimiento de la herramienta se produce por el uso de un tornillo sin fin permitiendo que la herramienta se mueva en la dirección radial con la ayuda de una plantilla se conseguía la curvatura deseada de la geometría deseada.

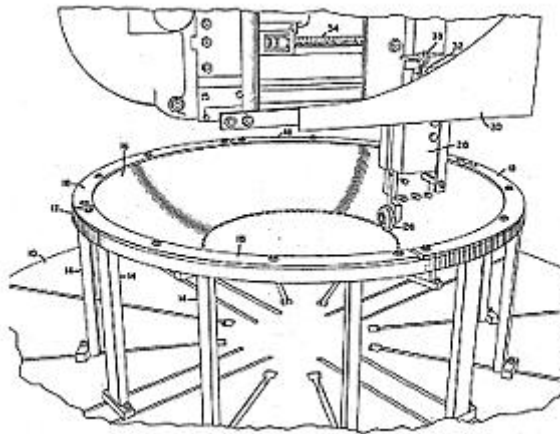


Fig. 3.2 Máquina propuesta por Berghahn (Berghahn and Murray Jr 1967)

A partir de las patentes registradas por Leszak y Berghahn, surgen nuevas técnicas de conformado como son: rechazado, estampado, embutición, hidroconformado, estirado, doblado. Los procesos mencionados están establecidos para una alta productividad con tiempos de producción reducidos, sin embargo, su instalación y mantenimiento tiene un costo elevado, además están restringidos para ciertas formas ya que ocupan herramientas especializadas para el desarrollo de sus productos lo que hace que el proceso se enfoque a un cierto producto lo cual no lo hace viable para manufacturar diferentes dispositivos en corto tiempo.

El conformado incremental es un proceso de manufactura flexible el cual se derivada de procesos de conformado tradicionales, su ventaja principal esta en elaborar dispositivos con geometrías complejas con el uso de herramientas simples disminuyendo el costo del proceso, así como los costos de fabricación, el equipo utilizado para el proceso es una máquina de control numérico computarizado (CNC) la cual mediante coordenadas traslada la herramienta sobre la superficie del material a deformar, cumpliendo con el objetivo principal del proceso el cual es deformar un material sin necesidad de la utilización de una matriz.

El primer artículo científico en reportar el uso una máquina CN para deformar una chapa metálica mediante el proceso de conformado incremental y obtener geometrías no simétricas fue (Iseki, Kato, and Sakamoto 1989) debido a que la maquina no contaba con control computarizado tenía que ser controlada manualmente por lo que se utilizó trayectorias en el plano XY, debido al alto costo de una maquina CNC y la limitación tecnológica en el año que se realizó el estudio, el artículo se vio limitado en su alcance.

El interés por el proceso provoco que distintos investigadores marquen una línea de investigación sobre el conformado incremental ya que su flexibilidad y versatilidad lo hace atractivo para fabricar piezas a bajo costo, por lo que se empezó a realizar diferentes estudios sobre los métodos de conformado surgiendo diferentes variantes como son el conformado incremental doble punto con soporte parcial y completo, conformado incremental mono punto realizado en maquina CNC y con la ayuda de un brazo robótico.

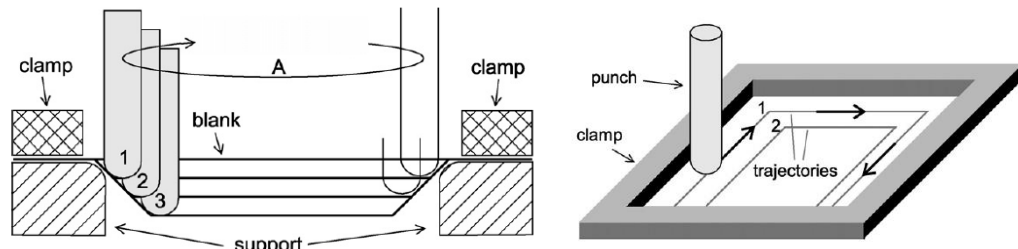


Fig. 4.3 Principio del conformado incremental mono-punto (SPIF) (Iseki et al. 1989)

2.2. Variantes del conformado incremental

Diferentes configuraciones del conformado incremental se han probado como: flujo de agua, rodillos, o por medio de vibración, sin embargo, varios estudios reportan como herramienta más utilizada a la de punta semiesférica, dependiendo de la configuración utilizada se utilizan herramientas adicionales que ayudan a la deformación de la chapa, ya que las piezas obtenidas son simétricas las variantes del proceso son: conformado incremental mono punto y conformado incremental doble punto.

2.2.1. Conformado incremental doble punto (TPIF)

El método fue introducido (Powell and Andrew 1992) en su estudio realizaron diferentes piezas sin herramientas especiales, sin la utilización de una matriz definida, utilizaron como herramienta un rodillo, el cual deformaba plásticamente el material, y un soporte en el cual se apoya la chapa metálica a deformar, sin embargo la aplicación del método fue reportada por (Matsubara 1994), el método utiliza una matriz parcial o total, ya que el soporte que mantiene fijo al material, se mueve en la dirección vertical mientras que la herramienta deforma a la chapa en una serie de contornos o espirales que aumentan conforme el soporte baja.

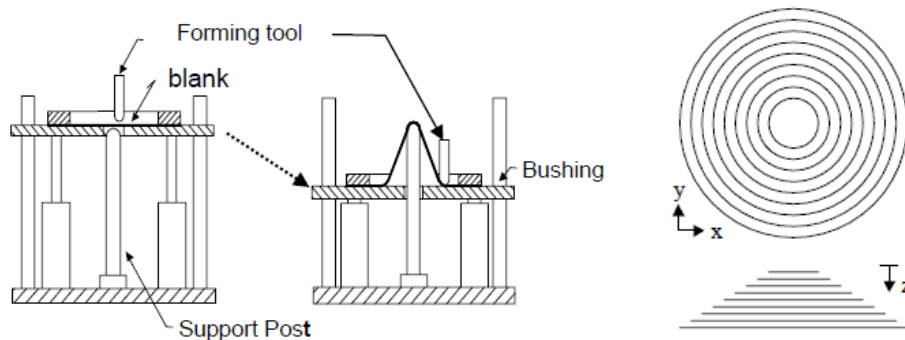


Fig. 5.4 Dispositivo para Backward bulge forming y trayectoria de herramienta (Matsubara 1994)

El método se ve limitado a ciertas formas que tenga el soporte usado y considerando que la herramienta no se puede mover libremente sino solamente en forma de contornos.

2.2.2. Conformado incremental mono punto (SPIF)

El método de conformado incremental monopunto se ha convertido en un proceso de manufactura atractivo debido a su simplicidad en cuanto al herramental requerido y su rendimiento al realizar piezas con geometrías complejas, la trayectoria de la herramienta se lo genera mediante un código G, el cual es interpretado por una maquina CNC como coordenadas. La herramienta deforma plásticamente un punto del material, dicha deformación desliza simultáneamente con la trayectoria de la herramienta, las deformaciones realizadas se repiten sucesivamente con diferente paso incremental hasta obtener la geometría deseada.

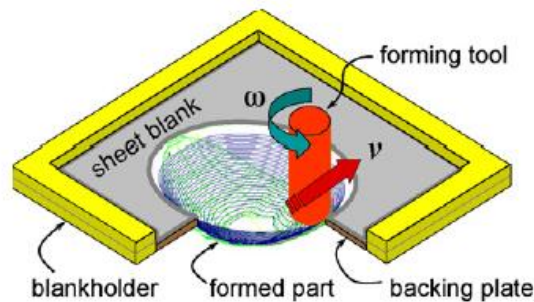


Fig. 6.5 Conformado incremental mono punto (Jeswiet et al. 2008)

2.3. Conformado incremental mono punto (SPIF)

El conformado incremental mono punto se deriva de los procesos de conformado tradicionales, los cuales cuentan con altos costos de herramientas y a su vez están limitados para realizar un cambio en corto tiempo de la geometría ya que usan moldes y matrices, mientras que el proceso SPIF usando herramientas simples puede desarrollar geometrías con detalles complejos, el potencial del proceso ha sido empleado en diferentes industrias como la automotriz, aeroespacial y como mayor tendencia en la parte médica con la fabricación de prótesis. Sin embargo, es un método de producción de bajo volumen debido a sus tiempos de instalación y proceso.

El mecanismo de deformación del proceso se atribuye a tres consideraciones:

- Al momento de entrar en contacto la herramienta con el material, se produce una indentación.
- La herramienta deforma el material mediante deslizamiento.
- Torsión debido a la rotación de la herramienta.

En la indentación actúa la fuerza normal, durante el proceso se presenta el fenómeno de fricción debido al deslizamiento de la herramienta sobre el material, produciéndose dos tipos de fuerzas: radial y tangencial.

Sin rotación de la herramienta el borde de ataque sería la parte delantera de la herramienta, cuando la herramienta rota el borde de ataque cambia constante, si la velocidad de avance de la mesa de trabajo se mantiene constante, el área de contacto de la herramienta hacia el material se mantendrá en un valor estable.

Una configuración típica del soporte para realizar el conformado incremental monopunto se presenta en la figura 2.6 en donde se listan todos los componentes. El soporte es montado en la mesa de trabajo de una máquina CNC. El material a deformar es sujetado por dos placas de sujeción restringiendo al material para que fluya solamente en la zona donde la herramienta aplica el esfuerzo de deformación.

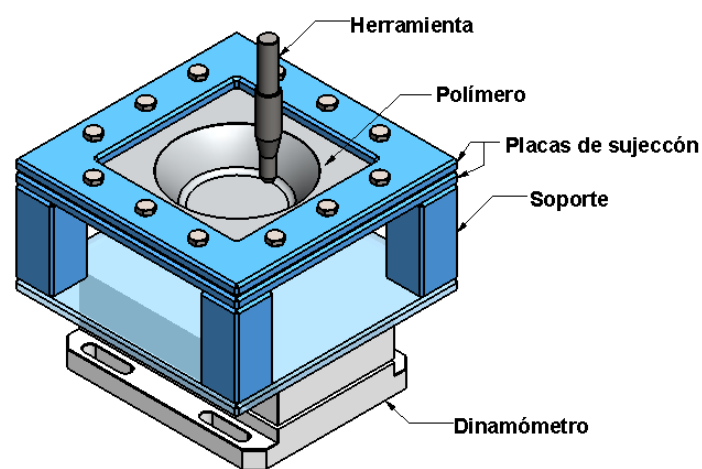


Fig. 7.7 Soporte para SPIF

2.3.1. Trayectoria de la herramienta

Para obtener la geometría deseada es necesario crear los modelos usando softwares de modelación como: SOLIDWORKS®, AUTODESK INVENTOR®, entre otros los cuales permiten obtener el modelo virtual de la parte a manufacturar, una vez generados los sólidos son importados a programas como NX®, CATIA®, MASTERCAM®, los cuales procesan el sólido para obtener el código G, el cual sirve para manufacturar la pieza mediante el uso de una máquina CNC, El paso incremental está relacionado con el traslado de la herramienta entre contornos el cual se lo puede hacer de manera directa o de forma escalonada dependiendo de la estrategia elegida en la trayectoria de la herramienta.

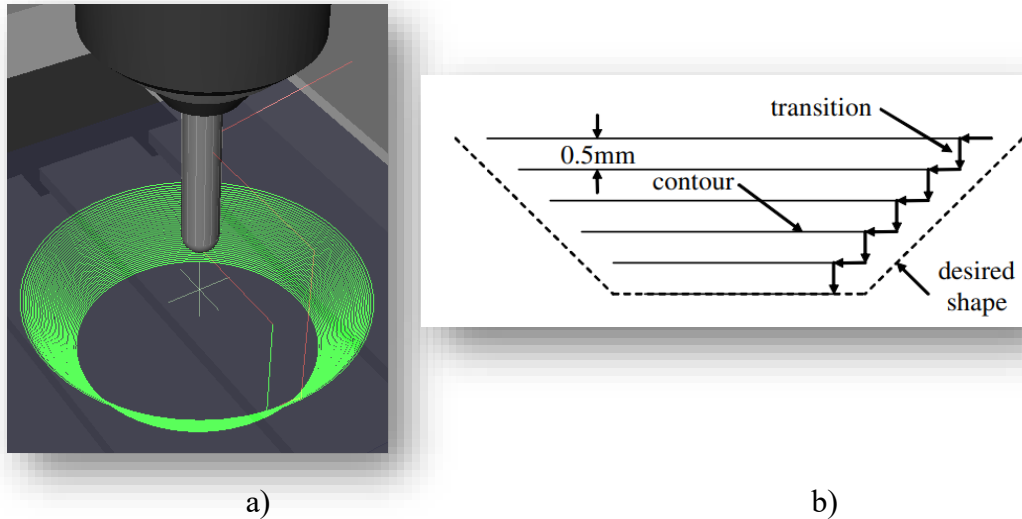


Fig. 8.8 a) trayectoria de la herramienta. b) traslado entre contornos (Flores et al. 2007)

Cuando la herramienta deforma el material realiza los siguientes pasos: realiza el primer contorno, después de este ciclo la herramienta se traslada en dirección horizontal hacia el interior del primer contorno y luego desciende verticalmente hacia el siguiente contorno, estos pasos se repiten de manera continua hasta obtener la geometría deseada. La rugosidad superficial está relacionada con el paso incremental, la transición entre cada contorno, debido a que se produce pequeñas indentaciones al momento que la herramienta deforma el material, a menor paso incremental, la rugosidad superficial disminuye

2.4. Variables del conformado

El presente proyecto emplea como material polímeros, específicamente polietileno de alta densidad (HDPE) y de ultra alto peso molecular (UHMWPE) por lo cual, en esta sección las variables del proceso son enfocadas a los materiales mencionados.

Al momento de realizar una pieza por SPIF se debe tener en cuenta las diferentes variables del proceso, ya que estas afectan a la rugosidad superficial y formabilidad del dispositivo final, las variables a considerar son: diámetro de herramienta, velocidad de giro de la herramienta, paso incremental, ángulo de pared inicial, tipo de generatriz empleada, profundidad máxima de deformación y el tipo de lubricante utilizado. Las variables mencionadas son interdependientes, lo cual causa un efecto en las respuestas del proceso, es decir al mejorar la rugosidad superficial de la pieza a deformar,

la formabilidad del material se verá afectada y viceversa, debido a lo anterior mencionado diferentes publicaciones han abarcado estas consideraciones en diferentes materiales obteniendo diferentes resultados en cuanto a la optimización del proceso.

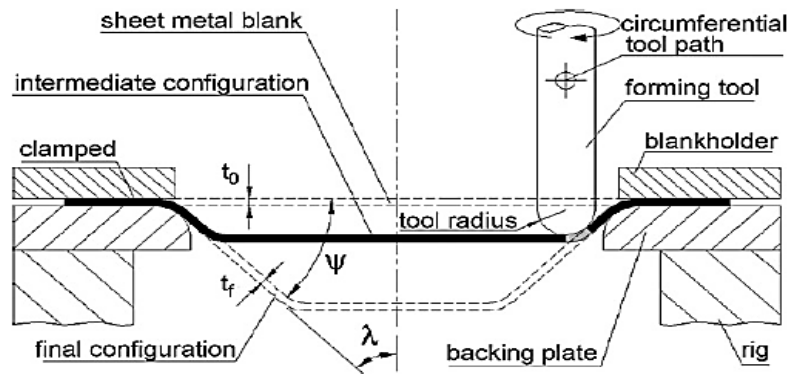


Fig. 9.9 Variables claves del proceso SPIF (Martins et al. 2008)

2.4.1. Material

(Fratini et al. 2004) en su estudio relacionaron las propiedades mecánicas del material empleado con la formabilidad, llegaron a la conclusión que la formabilidad del material está influenciada por el coeficiente de endurecimiento, n , y la resistencia mecánica del material, los materiales empleados tenían diferente coeficiente de endurecimiento marcando una diferencia considerable con respecto a la formabilidad. En resumen, a altos coeficientes de endurecimiento mayor formabilidad tendrá el material.

2.4.2. Angulo de pared inicial

En el conformado incremental de polímeros el ángulo de pared inicial y el ángulo final son importantes para la formabilidad, ya que están en relación con los modos de falla que se presentan en dicho material, de acuerdo con la investigación de (Marques, Silva, and Martins 2012) el rango del ángulo inicial para conformar un polímero esta entre los valores de 30° y 60° , además el ángulo de formabilidad está influenciado por el paso incremental y la velocidad de la mesa de trabajo del maquina ya que si se incrementan la magnitud de estas variables, el ángulo de formabilidad disminuye afectando a la formabilidad del material ya que el excesivo movimiento de la herramienta a lo largo del eje z , provoca que el material se arrugue (Le, Ghiotti, and Lucchetta 2008).

2.4.3. Tamaño de la herramienta

La formabilidad está relacionada con el tamaño de la herramienta, cuando se utilizan herramientas de diámetro reducido, la herramienta ingresa con facilidad en material debido a la indentación que produce la herramienta sobre el material además se debe considerar que la zona de deformación es altamente concentrada por lo que el calentamiento por fricción es muy localizado y de gran magnitud, al momento de deformarlo se produce un desgaste considerable en la superficie de la pieza deformada aumentando la rugosidad y disminuyendo la formabilidad.

2.4.4. Paso incremental

La influencia de este parámetro está relacionado con la rugosidad superficial y la formabilidad, si el paso incremental toma un valor demasiado alto disminuye la

formabilidad del polímero debido a las cargas que deberá soportar el material se presentaría prematuramente la falla ya sea por desgarre o arrugas en la pared de la pieza deformada, además la rugosidad superficial se incrementa debido a las indentaciones que produce la herramienta sobre material dejando muy marcado la trayectoria de la herramienta, por lo cual es adecuado tener valores de paso incremental cortos (0.25 – 0.6 mm).

2.4.5. Velocidades de conformado

(Le et al. 2008) en su trabajo mencionan al incrementar la velocidad de giro de la herramienta, la formabilidad se incrementa considerando que se utilizara una herramienta de diámetro grande, pasos incrementales cortos y la velocidad de la mesa de trabajo es alta, una combinación de altas velocidades con respecto al giro de herramienta y al movimiento de la mesa de trabajo mejora la formabilidad de polímeros termoplásticos. (I. Bagudanch et al. 2015) en su trabajo estudiaron el efecto de la temperatura en la formabilidad del policloruro de vinilo (PVC) durante el proceso SPIF, relacionando la velocidad de giro de la herramienta con el calentamiento producido por la fricción entre la herramienta y la lámina mencionando que la temperatura incrementa la formabilidad y reduce la fuerza axial.

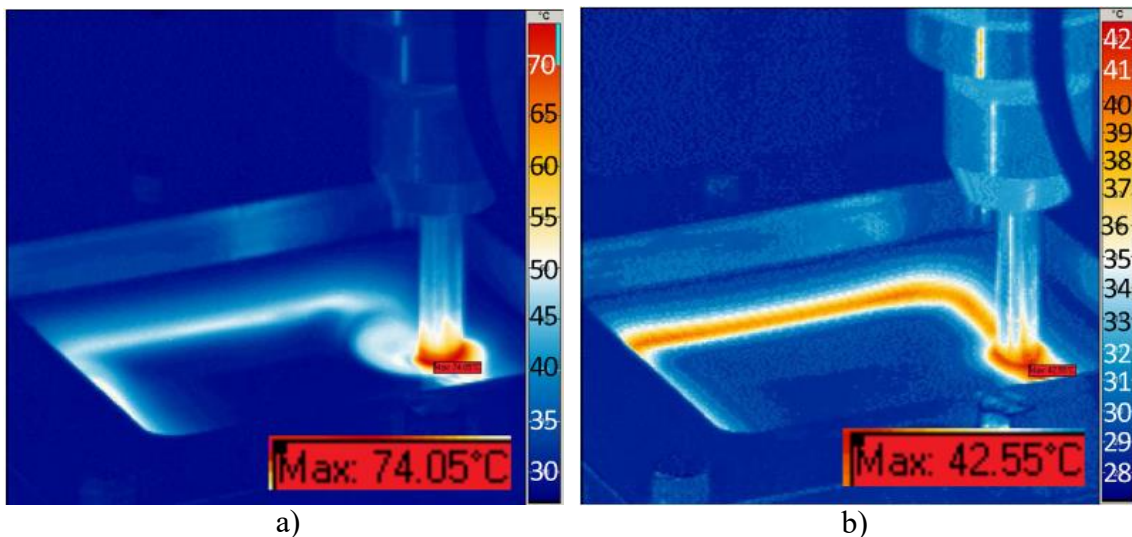


Fig. 10.10 Distribución de temperatura medida durante proceso SPIF aplicado a PVC: a) velocidad de herramienta 2000 rpm, b) Rotación libre (I. Bagudanch et al. 2015)

2.4.6. Espesor de placa

En los trabajos realizados por (Marques et al. 2012) y (Martins et al. 2009) concuerdan que un espesor de placa grande tiene un efecto positivo en la formabilidad ya que el polímero experimentaría valores pequeños de deformación durante el proceso, a diferencia de los metales, la formabilidad en los polímeros es directamente influenciada por el ángulo inicial de pared.

2.4.7. Lubricante y geometría

El estudio de la lubricación durante el proceso SPIF es limitada ya que artículos como (Azevedo et al. 2015), (Jawale et al. 2016), (Hussain 2014) muestran tendencias de reducción del coeficiente de fricción utilizando lubricantes sintéticos en diferentes formas: sólido y líquido, mostrando una relación entre la dureza del material a deformar y la viscosidad del lubricante empleado. Sin embargo (Diabb et al. 2017) utilizaron nanolubricantes a base de aceites vegetales realizando un estudio de lubricación empleando las curvas stribeck, demostrando que la adición de nanopartículas como aditivos contribuyen a la disminución de las fuerzas del proceso. La lubricación durante el proceso es de suma importancia ya que empleado el lubricante adecuado se disminuye el desgaste y se mejora la rugosidad superficial.

Al momento de manufacturar una pieza por el proceso SPIF se debe tener en cuenta su geometría ya que de eso dependerá el tiempo de proceso, el consumo energético de la máquina y las fuerzas generadas, por este proceso no se pueden realizar paredes verticales ya que, según la ley del seno, el espesor final de la lámina tendría un valor de cero. La deformación de la lámina se realiza de forma incremental permitiendo que las tensiones a la que está expuesta el material se apliquen gradualmente, el método permite obtener mejor distribución del espesor.

2.5. La fricción en el conformado incremental monopunto

La fuerza de fricción se produce cuando dos superficies están en contacto, existen dos tipos de fricción: estática y cinemática, en el caso de la fricción estática relaciona la fuerza que impide el movimiento entre las superficies y la fuerza normal, en cambio la fricción cinemática relaciona la fuerza que mantiene el movimiento de las superficies entre sí y la fuerza normal (Blau 2001), la fricción en SPIF se puede atribuir a varios principios como: el deslizamiento de la herramienta sobre el material, la rotación de la herramienta o la combinación de las dos cuando se está realizando un contorno, en la figura 2.11 se puede observar cuando la herramienta produce una indentación en el material debido a la fuerza normal que aplica la herramienta para deformar el material, esta indentación está relacionada con la cantidad de material a arrastrar, a medida que la herramienta arrastra el material de la superficie de la lámina, se produce la fuerza de fricción por deslizamiento, ya que el borde frontal de la herramienta va arrastrando y empujando el material para formar el contorno, dicha fuerza está influenciada por la velocidad de la mesa de trabajo y resistencia del material. La existencia de una película de lubricación entre la herramienta y el material permite que no se adhieran las dos superficies asumiendo que la herramienta se desliza sobre el material, sin embargo a medida que aumenta la profundidad la fuerza tangencial y normal se incrementa provocando que la fricción genere mayor calor disminuyendo la película de lubricación provocando que la superficies entre en contacto por lo cual es necesario estudiar aspectos de lubricación como son los regímenes y lo que sucede en cada uno a través de la curva stribeck relacionándolo con en el proceso SPIF.

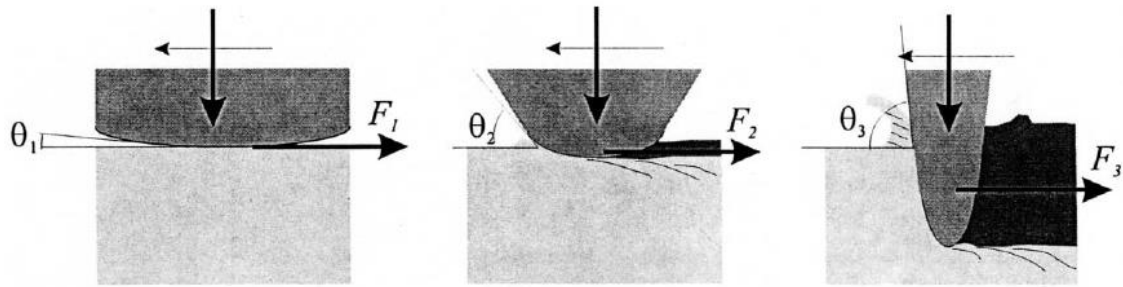


Fig. 11.11 Mecanismo de fricción entre dos materiales de diferente dureza. (Blau 2001)

2.6. Lubricación

Durante el proceso SPIF se presenta diferentes regímenes de lubricación debido a que el lubricante está sometido a diferentes cargas normales y tangenciales debido a la resistencia del material a deformar, sin embargo, la aplicación de un fluido, el cual actúa como lubricante entre las superficies disminuye el esfuerzo cortante que se produce cuando la herramienta se desliza sobre el material, ya que el esfuerzo se produce en el lubricante este tipo de lubricación se conoce como hidrodinámica.

A medida que la herramienta alcanza mayor profundidad, la fuerza normal se eleva y el espesor de la película disminuye produciendo que ciertas zonas entre la herramienta y material entren en contacto produciendo un esfuerzo de deformación, la lubricación bajo estas condiciones es conocida como elastohidrodinámica.

La propiedad más importante de un lubricante es su viscosidad, ya que la viscosidad es la medida que presenta un fluido a ser deformado, depende de dos variables que son presión y temperatura

2.6.1. Regímenes de lubricación

Para obtener una pieza con buen acabado superficial y evitar que exista excesivo desgaste se debe entender las interacciones físicas y químicas que ocurren entre el lubricante y las superficies en contacto, para lo cual se deben distinguir tres tipos de regímenes de lubricación que ocurren a medida que se incrementa la fuerza normal y disminuye la viscosidad del lubricante, dichos regímenes son expresados a través de la curva stribeck la cual relaciona la variación del coeficiente de fricción con el cambio en la velocidad de las superficies en contacto, la viscosidad del fluido y la variación de la carga normal, la relación entre la velocidad, viscosidad y carga se la conoce como el parámetro de Sommerfeld, en la figura 2.12 se pueden observar los distintos regímenes.

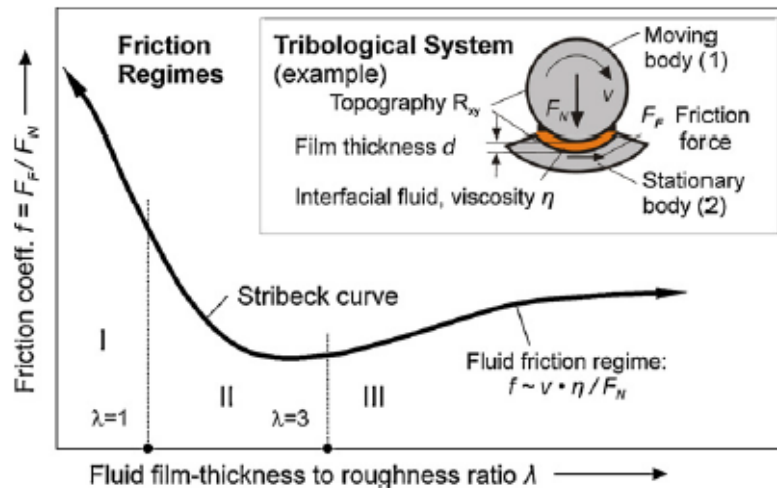


Fig. 12.12 Caracterización de regímenes de fricción según la curva Stribeck (Woydt and Wäsche 2010)

- Régimen hidrodinámico: no existe contacto físico entre las asperezas de las superficies, la variación de la velocidad entre las superficies se produce en la película lubricante por el efecto de cizallamiento que se producen en las capas del lubricante, lo que resulta en disminución del coeficiente de fricción, disminución de fuerzas, disminución de temperatura. En esta zona los coeficientes de fricción están en el orden de 0.001 – 0.05.
- Lubricación mixta: este modo representa un régimen intermedio entre régimen hidrodinámico y lubricación límite, en donde una parte de la carga normal aplicada es soportada por el modo hidrodinámico mientras la otra parte sucede en las asperezas de mayor altura de las superficies en contacto, los coeficientes de fricción en esta zona están en el orden de 0.02 – 0.1.
- Lubricación límite: en este modo se produce un contacto físico entre las asperezas de las superficies a lubricar, la carga normal es aplicada directamente a las superficies deslizantes, incrementándose la fricción por lo cual se produce desgaste en el material, aumento en las fuerzas, incremento en la temperatura lo cual disminuye la viscosidad del lubricante impidiendo que se mantenga entre las superficies. los coeficientes de fricción en esta zona están en el orden de 0.05 – >1.

2.6.2. Tipos de lubricantes

Para obtener un buen acabado superficial y evitar el desgaste durante el proceso es necesario contar con el lubricante adecuado, un lubricante consta de partes la base y sus aditivos, los aditivos son agregados para mejorar sus propiedades, por ejemplo: viscosidad, punto de escurrimiento, estabilidad térmica, oxidación entre otros de acuerdo a su tipo de base pueden ser clasificados en:

- Aceites vegetales: son lubricantes amigables con el medio ambiente, tiene buena lubricación, alto índice de viscosidad, a bajas temperaturas exhiben poco fluidez debido al exceso de ácidos grasos saturados, su punto de inflamación es alto, lo cual se lo relaciona con una presión de vapor y

volatilidad muy baja haciéndolo seguro para su uso durante el proceso de manufactura, sin embargo su estabilidad oxidativa es deficiente en comparación con un aceite mineral, lo que lo hace incapaz de soportar temperatura mayores a 80°C afectando directamente a su viscosidad y capacidad de lubricación (Nagendramma and Kaul 2012).

- Aceites minerales: su composición química es a base de diferentes hidrocarburos, provienen de la destilación del crudo de petróleo, dependiendo de sus estructuras químicas se dividen en tres grupos: parafínicos, nafténicos y aromáticos, presentan alta resistencia a la oxidación, alta viscosidad, baja volatilidad, alto punto de inflamación, es uno de los lubricantes más usados en procesos de manufactura, sin embargo, su extracción y uso representan un impacto ambiental.
- Aceites sintéticos: son producidos mediante síntesis química, los tipos más comunes son polialfaolefinas, poliisobutilenos, esterés sintéticos entre otros, tienen altos índices de viscosidad, excelente estabilidad de oxidación, punto bajo de fluidez en comparación a los aceites minerales, su costo es elevado en comparación a los aceites minerales y su fabricación utiliza productos tóxicos los cuales afectarían a la salud de quien los manipula siendo un riesgo tanto para el factor humano como para el medioambiente.
- Lubricantes base agua: generalmente son emulsiones de cierta composición en peso, es un lubricante que se compone de bajas cantidades de aceite, dichas gotas están suspendidas en agua, son utilizados debido a su bajo costo y tiene aplicaciones en diferentes procesos de manufactura como en la laminación de acero, debido a su alta capacidad para disipar el calor y sobre su bajo impacto ambiental.
- Nanolubricantes: es una sustancia que está compuesta por un medio líquido o sólido, en el cual se añaden partículas sólidas de tamaño nanométrico (generalmente con un diámetro entre 1nm a 20 nm), las cuales promueven disminución en la fricción y desgaste durante su uso como película lubricante para dos superficies que se encuentran en contacto. Las nanopartículas generalmente tienen forma esférica o forma cilíndrica. Una de las propiedades más importantes del nanolubricante es su compatibilidad con el medio ambiente

2.7. Nanolubricación

La Nanolubricación ha tomado el siguiente concepto: es la ciencia que sirve para controlar la adhesión, fricción, y desgaste entre dos superficies que entren en contacto a nivel micro, el principio de este modo de lubricación se basa en la existencia de una película de lubricación tenaz y duradera entre dos superficies en contacto, la película debe ser resistente a los cambios de presión y temperatura que se generen entre las superficies, la adición de nanopartículas permite que el nanolubricante disminuya su volatilidad,

tenga mejor resistencia a la oxidación y descomposición térmica, produzca un efecto reparador y disminuya la rugosidad superficial (Hsu 2004).

Un nanolubricante es utilizado para superar las desventajas que se presenta en un lubricante normal ya que utilizan aditivos convencionales los cuales en ciertos casos no brindan un buen rendimiento a momento de lubricar, este efecto se lo puede apreciar claramente en el coeficiente de fricción, en la figura 2.12 se puede observar a las nanopartículas actuando como rodamientos permitiendo que las superficies se deslicen entre si con mayor facilidad además forman una película protectora con el fin de disminuir el contacto, se depositan en las zonas en donde exista mayor desgaste compensando la pérdida de masa, Las principales ventajas de las nanopartículas son sus tamaños, en el rango de nanómetros, el cual está bien adaptado para su funcionamiento de interfaz deslizante.

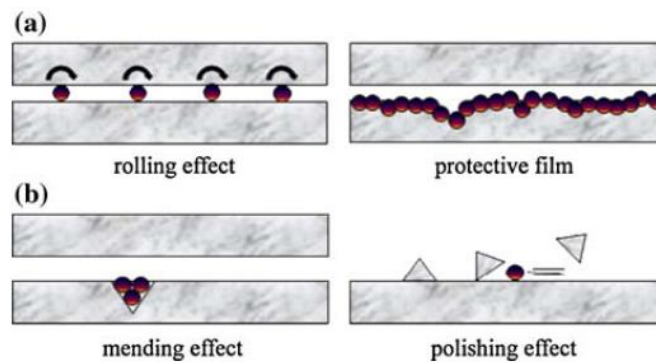


Fig. 13.13 Posibles mecanismos de lubricación mediante la aplicación de un nanolubricante entre las superficies en contacto (Lee et al. 2009)

2.8. Variables en la nanolubricación

Para obtener un buen rendimiento de un nanolubricante existen varios aspectos a considerar, por ejemplo: la dispersión de las nanopartículas, efecto de aglomeración, suspensión de las nanopartículas a largo plazo, método de funcionalización, aumento en el costo, tipo de material a emplear y probar su rendimiento en condiciones reales a nivel industrial a continuación, se presentan se presentan detalladamente las variables mencionadas.

2.8.1. Fracción de masa

Es una de las variable importante la cual está indicada en porcentaje en peso o de volumen, indica que cantidad de nanopartículas han sido empleadas como aditivos, hay que tener en cuenta que a medida que se incrementa el porcentaje en peso, el rendimiento del nanolubricante mejora, sin embargo si se sobrepasa la cantidad adecuada, se puede asumir que las nanopartículas ya no están adecuadamente dispersas y las partículas tenderían a chocar entre si generando asperezas en las superficies lo que provocaría que se incremente la fricción (Sia, Bassyony, and Sarhan 2014).

2.8.2. Aglomeración

A medida que se incrementa la concentración de las nanopartículas en el medio tienden a aglomerarse debido a las interacciones intermoleculares, al encontrarse muy cerca entre si se produce una alta atracción de Van der Waals provocando que se produzcan aglomerados provocando que las nanopartículas se sedimenten, la aglomeración tiene relación directa con método de dispersión empleado y el surfactante utilizado durante la funcionalización de las nanopartículas.

2.8.3. Estabilidad

La estabilidad está relacionada con el tamaño de la nanopartícula, ya que, a mayor área superficial, la masa de la nanopartícula se incrementa aumentando la posibilidad que se produzca el efecto de sedimentación, una forma de mejorar la estabilidad es utilizar surfactantes los cuales encapsulan a la nanopartícula en un medio con el cual se produzcan enlaces químicos con la base del nanolubricante, sin embargo, es un reto encontrar el surfactante adecuado para cada tipo de nanopartícula.



Fig. 14.14 Sedimentación de las nanopartículas de SiO₂ en parafina líquida (Peng et al. 2010a)

2.9. Polietileno de ultra alto peso molecular y de alta densidad

El polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y de alta densidad (HDPE) son polímeros perteneciente al grupo de los polietilenos formado de etileno (C₂H₄), los cuales cuentan con propiedades mecánicas y físicas excelentes, presentan inercia química, lubricidad, resistencia al impacto y resistencia a la abrasión, una molécula del polímero cuenta con varias unidades que se repiten, dichas unidades se denominan monómeros, en el caso del UHMWPE el monómero que se repite es de etileno, sus cadenas son extremadamente largas y altamente enredadas, lo que permite que tenga mayor resistencia al desgaste. En el estado sólido las moléculas de UHMWPE se ordenan en regiones ordenadas (cristalinas) y desordenadas (amorfas), su cadena molecular puede consistir en 200,000 unidades de etileno repetidas.

Por otro lado, la cadena molecular del UHMWPE contiene arriba de 400,000 átomos de carbono, El HDPE es un polímero lineal con un peso molecular de hasta 200.000 g/mol, en comparación, UHMWPE tiene un peso molecular de hasta 6 millones

g/mol. De hecho, el peso molecular es demasiado alto que no puede ser medido directamente por medios convencionales y debe ser deducido por su viscosidad intrínseca. (Kurtz 2004)

En la siguiente tabla se especifican las propiedades físicas y mecánicas del HDPE y UHMWPE

Tabla 1.1 Propiedades físicas del HDPE y UHMWPE (Kurtz 2004)

| Propiedad | HDPE | UHMWPE |
|------------------------------------|-------------|-------------|
| Peso molecular (10^6 g/mol) | 0.05-0.25 | 2-6 |
| Temperatura de fusión (°C) | 130-137 | 125-138 |
| Relación de Poisson | 0.40 | 0.46 |
| Gravedad específica | 0.952-0.965 | 0.932-0.945 |
| Módulo de Elasticidad (GPa) | 0.4-4 | 0.8-1.6 |
| Esfuerzo de cedencia (GPa) | 26-33 | 21-28 |
| Esfuerzo a la fractura (GPa) | 22-31 | 39-48 |
| Resistencia al Impacto, Izod (J/m) | 21-214 | >1070 |
| Grado de Cristalinidad (%) | 60-80 | 39-75 |

La cristalinidad del UHMWPE se caracteriza debido a que la cadena molecular del polietileno tiende a rotar alrededor de los enlaces C-C, formándose cadenas dobladas, esta cadena doblada permite un orden entre las moléculas, regiones laminares conocidas como laminillas cristalinas. Estas laminillas están incrustadas en la región amorfa, las lamillas posiblemente se comunican entre sí mediante un lazo de moléculas. En la figura 2.15 se muestra las características morfológicas del UHMWPE.

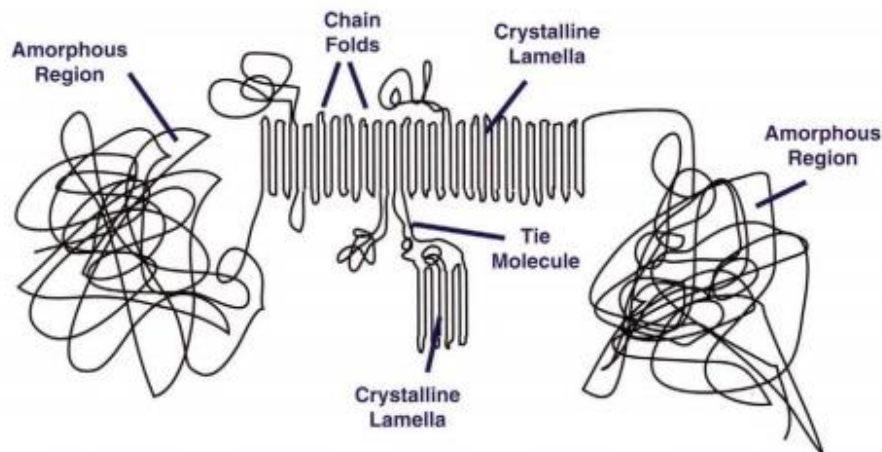


Fig. 15.15 características morfológicas del UHMWPE (Kurtz 2004)

Desde el punto de vista clínico el UHMWPE es más resistente que el HDPE con respecto al desgaste y abrasión, se debe tener en cuenta que algunos polímeros se someten a tres transiciones térmicas: temperatura de transición vítrea (T_g), temperatura de fusión (T_m) y temperatura de flujo (T_f), En el UHMWPE, la transición vítrea ocurre alrededor de $120\text{ }^\circ\text{C}$, Al aumentar la temperatura por encima de T_g , la región amorfa dentro del

polímero gana movilidad, cuando la temperatura del UHMWPE se eleva entre 60-90 °C, los pequeños cristales en el polímero comienzan a fusionarse. (Kurtz 2004).

Las características mecánicas de UHMWPE son determinadas por:

- el equilibrio entre las regiones cristalinas y amorfas, es decir el grado de cristalinidad presente.
- el número de conexiones entre las regiones cristalinas, es decir, el número de lazos entre moléculas.
- el número y la naturaleza de las conexiones dentro de las regiones amorfas, es decir, el grado de enredos mecánicos y reticulados
- la presencia o ausencia de orientación cristalina

El módulo elástico y el esfuerzo fluencia del UHMWPE son mucho más sensibles a los cambios en la orientación cristalinidad y al cambio en la orientación cristalina que cualquier otra propiedad. El módulo elástico es particularmente sensible a la cristalinidad, aumentando casi de forma lineal con la cristalinidad. Si el módulo elástico no aumenta de forma proporcional con el esfuerzo de fluencia, aumenta la probabilidad de deformación plástica en el UHMWPE, lo cual puede aumentar el índice de desgaste (Wang et al. 1998).

2.10. Trabajos de investigación relacionados

El principal antecedente del estudio de lubricación y desgaste en el conformado incremental es la investigación realizada por (Diabb et al. 2017), en la cual por primera vez se empleó la curvas stribeck para indicar los diferentes regímenes de lubricación que se presentan durante el proceso SPIF utilizando nanolubricantes, el autor menciona que la concentración adecuada de nanopartículas de óxido de silicio (SiO_2) en el lubricante del tipo vegetal disminuye la deformación elástica en la superficie del material y el desgaste producido concordando con los resultados de (Peng et al. 2010b) el cual mediante estudios tribológicos comprobó que la reducción del coeficiente de fricción está relacionado con el porcentaje en peso de nanopartículas de SiO_2 en el lubricante mencionando que si se excede la contracción óptima, las nanopartículas tienden a comportarse de manera abrasiva, son varios autores que se encuentran investigando en esta área y además se debe considerar los problemas ambientales ya que el uso de lubricantes y materiales que no contaminen el medio ambiente provee una gran área de oportunidad en temas de investigación

El proceso de conformado incremental se lo ha empleado en diferentes temas de investigación relacionados al sector automotriz, aeronáutico, medio ambiental, tribológico, biomédico entre otros, empleando metales y polímeros como materiales. En la parte biomédico el proceso ha sido empleado para la manufactura de prótesis medicas utilizando metales biocompatibles como es el caso de: (Castelan, Schaeffer, Daleffe, Fritzen, Salvaro, and Pinto 2014), (Martins et al. 2016), (Ambrogio et al. 2017), (Potran

and Skakun 2014), (Vanhove et al. 2017), (Araújo et al. 2014), en las investigaciones citadas se utilizan como materiales titanio y acero, los trabajos se enfocan en el diseño y manufactura de la prótesis teniendo en cuenta las desviaciones geométricas en el dispositivo final, dicha desviación es compensada en la trayectoria de la herramienta, asegurando que el error geométrico disminuya. Durante su procesamiento se utilizan lubricantes base petróleo y sintéticos, además no se menciona cual fue la rugosidad superficial alcanzada, solo se tienen en cuenta las variables del proceso, los parámetros de los estudios citados se especifican en la tabla 2.3.

En el caso de biopolímeros, estudios realizados por: (Isabel Bagudanch et al. 2015), (Centeno, Morales-Palma, et al. 2017), (Fiorentino et al. 2012), (Centeno, Bagudanch, et al. 2017) se propone la metodología para realizar un implante craneal mediante el proceso SPIF, acotando que el polímero presenta el efecto de recuperación elástica, el cual provoca desviaciones en las medidas de la geometría final de la prótesis manufacturada mencionando que para futuros trabajos se debe tener en cuenta la estrategia con la cual la herramienta irá deformando el material y el uso del proceso TPIF, no se toma en cuenta la lubricación, ni la rugosidad final en la superficie del implante final, lo cual es importante en una prótesis de rodilla ya que si el coeficiente de fricción alcanza un valor elevado durante la fabricación del implante, la superficie presentará un desgaste lo cual al momento de estar en contacto con el hueso producirá residuos, los cuales afectarían a tejidos cercanos produciendo una inflamación severa en los tejidos aledaños a la prótesis, los parámetros de los estudios citados se especifican en la tabla 2.4.

En cuanto a los diferentes estudios de lubricación durante el conformado incremental: (Azevedo et al. 2015) utilizó lubricantes sólidos y líquidos del tipo base petróleo y sintéticos, estudió el compartimento de dichos lubricantes evaluando su rendimiento al deformar láminas de aluminio, haciendo una observación en la cual menciona que la viscosidad del lubricante tiene relación directa como la dureza del material a conformar (Fahime 2016) concuerda con los resultados de Azevedo, ya que utilizó lubricantes de distinta viscosidad brindando mejores resultados el aceite con mayor viscosidad, (Sornsuwit and Sittisakuljaroen 2014) en su estudio utilizaron disulfuro de molibdeno y aire como lubricante para deformar láminas de acero y titanio, la combinación brindó buenos resultados durante el proceso en cuanto a la formalidad y la rugosidad superficial, además menciona que los materiales con menos elongación tienen menos profundidad en la conformabilidad relacionando lo anterior con la rugosidad superficial, (Kim and Park 2002) menciona que una herramienta con forma esférica es una buena opción para deformar una lámina de aluminio 1050 sin lubricación, sin embargo si el coeficiente de fricción se incrementa demasiado, la lámina presentaría el tipo de falla por grieta, (Hussain et al. 2008) en su estudio utilizó dos herramientas de diferente dureza y cinco tipos de lubricantes hechos a base de disulfuro de molibdeno y grafito, el resultado de su investigación fue que una herramienta de menor dureza junto con el lubricante a base de disulfuro de molibdeno disminuye el coeficiente de fricción, una de sus conclusiones menciona que los lubricantes orgánicos no son adecuados para su uso en la deformación de láminas de titanio. (Petek et al. 2008) y (Hussain and Al-Ghamdi 2014) realizaron estudios tribológicos empleando recubrimientos en la herramienta para evitar el uso de lubricantes, mencionando las ventajas y desventajas de los recubrimientos en el conformado incremental, los resultados mencionan disminución del coeficiente de fricción y temperatura al utilizar el recubrimiento directamente en la herramienta, en el

caso de (Zhang et al. 2010) el recubrimiento fue aplicado directamente al material, (Jawale et al. 2016) realizó un estudio de lubricación aplicado al cobre empleando diferentes lubricantes del tipo mineral y sintéticos durante SPIF, en sus resultados menciona que el efecto del lubricante no tiene relación alguna con la formabilidad, el efecto del lubricante es apreciable en la rugosidad superficial, los parámetros de los estudios citados se especifican en la tabla 2.2.

Los estudios mencionados anteriormente fueron realizados en solo materiales metálicos, utilizando lubricantes sintéticos para el desarrollo de sus investigaciones, se observa que fueron enfocados a observar el rendimiento de los lubricantes con respecto a la disminución: del coeficiente de fricción, temperatura y tasa de desgaste, cabe acotar que en ninguno de ellos se menciona la utilización de las curvas stribeck, ni el uso de nanopartículas como aditivos en los lubricantes.

El artículo realizado por (Namer, Mazhir, and Naáma 2015) analizan la correlación que existe entre los diferentes parámetros del proceso como son: diámetro y velocidad de la herramienta, velocidad de avance de la mesa de trabajo y viscosidad del aceite, utilizando como materiales HDPE y PVC, su estudio carece de explicación con respecto al mecanismo de desgaste que se presenta en la superficie, al coeficiente de fricción máximo alcanzado en cada material, no consideran el cálculo de fuerzas: tangenciales y de formabilidad durante el proceso y los lubricantes usados son del tipo sintético.

Respecto al uso de lubricantes vegetales: aceites vegetales han sido empleados en procesos de mecanizado por arranque de viruta en publicaciones como (Sharma and Sidhu 2014), (Kuram et al. 2010), (Khan and Dhar 2006) mediante el uso de sistemas de mínima cantidad de lubricación, el uso de los aceites vegetales contribuyen a disminuir la fricción entre la herramienta de corte y el material, lo cual contribuye a disminuir la temperatura obteniendo una viruta uniforme durante el corte, además disminuyendo el impacto ambiental ya que se evita usar fluidos de corte los cuales contiene agentes químicos tóxicos y representan un peligro a la salud de quien opera la máquina.

El estudio de la resistencia al desgaste del polietileno de alta densidad (HDPE) y de ultra alto peso molecular (UHMWPE), ha sido motivo de estudio por varios autores debido a su aplicación como material para la fabricación de implantes, el material debe presentar buena resistencia a la abrasión y adhesión, ya que no debe desprender partículas una vez en funcionamiento. (Baena and Peng 2017) en su estudio utilizó UHMWPE el cual estuvo sometido a un estudio tribológico a diferentes temperaturas, se determinó que el cambio en la temperatura influye en la dureza del material contribuyendo a que se aumente el desgaste, (Guezmil, Bensalah, and Mezlini 2016) durante su estudio empleó un pin de acero inoxidable el cual lo hizo rodar sobre el polímero UHMWPE utilizando condiciones en seco y con lubricante, en condiciones secas se determinó que el mecanismo de desgaste es adhesivo – abrasivo, mientras que utilizando un lubricante del tipo vegetal redujo siete veces en comparación a las condiciones sin lubricante además menciona que la fricción depende del tipo de movimiento que ejercen las superficies entre sí concordando con (Anderson 1982) el cual realizó un estudio de desgaste en condiciones secas y con lubricante donde utilizó HDPE y UHMWPE en su estudio.

Tabla 2.2 Parámetros utilizados para estudios de lubricación en SPIF

| Autores | Parámetros | | | | | | | | | | |
|---------------------|------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|---------------------|--------------------|---|
| | Material | Velocidad de avance (mm/min) | Velocidad de giro (rpm) | Diámetro herramienta (mm) | Material Herramienta | Tipo de herramienta | Geometría | Paso incremental (mm) | Angulo de pared (°) | Tipo de generatriz | Lubricantes empleados |
| Azevedo et al. 2015 | Aluminio | N/E | N/E | 6 | Acero endurecido | Esférica | Cónica | 0.3 | 45 | Constante | Sintéticos (sólidos y líquidos) |
| Diabb et al. 2017 | Aluminio | 3000 | 0 | 10 | Acero rápido | Semiesférica | Pirámide | 0.5 | 45 | variable | Nanolubricantes |
| Fahime et al. 2016 | Aluminio | 50 | 1000 | 10 | Acero Z160 | Esférica | Pirámide | 0.5 | N/E | Constante | Sintéticos |
| | | 300 | 3000 | | | | | 1 | | | |
| | | 500 | 6000 | | | | | 2 | | | |
| Hussain et al. 2008 | Titanio | 300 | N/E | 8 | Acero rápido - endurecido | Semiesférica | Pirámide | 0.2 | 45 | Constante | Sintético |
| | | | | | Cr12MoV | | | | | | |
| | | | | | Cr12MoV - endurecido | | | | | | |
| Hussain et al. 2014 | Titanio | 1500 | N/E | N/E | Acero rápido | Semiesférica | Pirámide | 0.2 | 45 | Constante | Recubrimiento aplicado a la herramienta |
| Jawale et al. 2016 | Cobre | N/E | N/E | 12 | N/E | Esférica | Cónica | N/E | 30 | Variable | Sintéticos |
| Kim et al. 2002 | Aluminio | N/E | N/E | 5 | N/E | Esférica | Pirámide | N/E | N/E | Constante | Mineral |
| | | | | 10 | | Semiesférica | | | | | |
| | | | | 15 | | | | | | | |
| Petek et al. 2008 | Acero | 1700 | 60 | 10 | N/E | Esférica | Pirámide | 0.5 | 60 | Constante | Recubrimiento aplicado a la herramienta |

| Autor | Parámetros | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-----------|-----------------------|---------------------|--------------------|--|
| | Material | Velocidad de avance (mm/min) | Velocidad de giro (rpm) | Diámetro herramienta (mm) | Material Herramienta | Tipo de herramienta | Geometría | Paso incremental (mm) | Angulo de pared (°) | Tipo de generatriz | Lubricantes empleados |
| Sornsuwit et al. 2014 | Acero | 3140 | 100 | 10 | N/E | Semiesférica | Cónica | 1 | N/E | Constante | Recubrimiento aplicado a la herramienta) |
| | Titanio | | | | | | | | | | |
| Zhang et al 2010 | Magnesio | 2000 | N/E | 12 | Acero rápido | Semiesférica | Pirámide | 0.2 | 55 | Constante | MoS ₂ Grafito |
| Namer et al. 2015 | HDPE | 600 | 300 | 14 | Acero al carbono | Esférica | Cónica | N/E | 79 | Constante | Sintéticos |
| | | 800 | 450 | 16 | | | | | 45 | | |
| | PVC | 1000 | 600 | 18 | | | | | | | |
| | | 1200 | 750 | 200 | | | | | | | |

Tabla 3.3 Parámetros utilizados para fabricación de prótesis en metales por SPIF

| Autor | Parámetros | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-----------|------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | Material | Velocidad de avance (mm/min) | Velocidad de giro (rpm) | Diámetro herramienta (mm) | Material Herramienta | Tipo de herramienta | Geometría | Tipo de prótesis | Paso incremental (mm) | Angulo de pared (°) | Tipo de generatriz | Lubricantes empleados |
| Ambrogio et al. 2017 | Titanio | 2500 | 0 | 12 | Acero rápido | Semiesférica | N/E | Cráneo | 0.5 | N/E | N/E | N/E |
| Araújo et al. 2014 | Titanio | 1000 | libre | 12 | Acero 120WV4-DIN | Semiesférica | Cónica | Facial | 0.2 | 67 | variable | Grasa sintética |
| | | | | | | | Pirámide | | | 61.5 | | |

| Autor | Parámetros | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-----------|------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | Material | Velocidad de avance (mm/min) | Velocidad de giro (rpm) | Diámetro herramienta (mm) | Material Herramienta | Tipo de herramienta | Geometría | Tipo de prótesis | Paso incremental (mm) | Angulo de pared (°) | Tipo de generatriz | Lubricantes empleados |
| Piccininni et al. 2016 | Titanio | 2000 | N/E | N/E | N/E | N/E | N/E | Cráneo | 0.1 | N/E | N/E | N/E |
| Potran et al. 2014 | Acero | 3000 | 100 | 10 | Acero EN X210Cr12 | Esférica | N/E | Dental | 0.02 | N/E | N/E | Sintético |
| Vanhove et al. 2014 | Titanio | N/E | 0 | 10 | N/E | Semiesférica | N/E | Clavícula | N/E | 45 | N/E | hidráulico |
| Castelan et al. 2014 | Titanio | 1500 | 50 | 10 | Titanio grado 2 | Semiesférica | N/E | Cráneo | 0.1 | N/E | N/E | Mineral |

Tabla 4.4 Parámetros utilizados para fabricación de prótesis en polímeros por SPIF

| Autor | Parámetros | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-----------|------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | Material | Velocidad de avance (mm/min) | Velocidad de giro (rpm) | Diámetro herramienta (mm) | Material Herramienta | Tipo de herramienta | Geometría | Tipo de prótesis | Paso incremental (mm) | Angulo de pared (°) | Tipo de generatriz | Lubricantes empleados |
| Bagudanch et al. 2015 | PCL | 3000 | libre | 6 | Acero Vanadis 23 | Semiesférica | N/E | Cráneo | 0.2 | N/E | N/E | Mineral |
| Centeno et al. 2017 | PVC | 1000 | 0 | 10 | N/E | N/E | Pirámide | Cráneo | 0.2 | 45 | Variable | Mineral |
| | PC | | | | | | | | | | | |
| Centeno Bagudanch et al. 2017 | PC | 1000 | 0 | 10 | N/E | N/E | Pirámide | Cráneo | 0.2 | 45 | Variable | Mineral |

N/E: No especifica

3. Experimentación

En el presente capítulo, se describe la instrumentación y parámetros utilizados para el desarrollo del estudio.

3.1. Materiales

Láminas de polietileno de ultra alto peso molecular y de alta densidad fueron utilizadas para probar los efectos de lubricantes reforzados sin y con nanopartículas de SiO₂ durante el proceso SPIF. Estas láminas fueron cortadas con las siguientes dimensiones: 150 mm x 150 mm. Se analizaron los siguientes tipos de lubricantes: aceite de girasol, emulsión agua – glicerina y aceite mineral, el aceite vegetal fue adquirido de la empresa BR PROQUIM. Las propiedades de los lubricantes se resumen en la Table 3.3. Durante el proceso SPIF se usó la cantidad de 16 ml de cada lubricante. Las nanopartículas de SiO₂ (10 – 20 nm), suministradas por Sigma-Aldrich, se agregaron en el aceite vegetal y la emulsión agua - glicerina en el porcentaje de composición de 0,025 wt%. Esta concentración fue seleccionada del trabajo de investigación de (Diabb et al. 2017) ya que fue la concentración óptima para disminución de fuerzas y consumo energético durante su investigación.

3.2. Preparación del nanolubricante.

Las nanopartículas de óxido de silicio (SiO₂), fueron añadidas en los lubricantes del tipo vegetal y base agua mediante el siguiente proceso utilizado en el estudio de (Diabb et al. 2017):

- Pesar la cantidad de nanopartículas de óxido de silicio a usar para añadirlo al lubricante.
- Añadir las nanopartículas al lubricante
- Se Disperso las nanopartículas en los lubricantes base agua y vegetal mediante punta ultrasónica marca cole-parmer® de 500 vatios, por un tiempo de 20 min en el aceite de girasol y 5 minutos en la emulsión agua – glicerina, evitando que se evapore el agua presente en la emulsión, el proceso ayuda a la dispersión de los aglomerados presentes, el método se lo repitió 4 veces para cada lubricante empleando el 40% de amplitud del equipo.
- Se utilizo un baño ultrasónico marca cole-parmer® con una frecuencia de 40 KHz durante para dispersar homogéneamente las nanopartículas en los lubricantes durante 60 minutos, repitiendo el proceso 4 veces en cada nanolubricante, se cambió el fluido que utiliza el equipo en cada prueba para evitar que la temperatura afecta a las propiedades físicas del lubricante

3.3. Selección de parámetros para el estudio

Los biopolímeros: UHMWPE y HDPE estarán expuestos a diferentes condiciones de lubricación ya que se usaron diferentes tipos de lubricantes, al ser un proceso relativamente nuevo el conformado incremental no se encuentra estandarizado, por lo que los parámetros del proceso pueden tomar diferentes valores, obteniendo diferentes resultados, los parámetros a controlar en este estudio son: velocidad de giro de la herramienta y tipo de lubricante a usar.

En la tabla 2.2, se listan los parámetros utilizados durante los estudios de lubricación y fabricación de prótesis en SPIF respectivamente, durante los estudios de lubricación los parámetros más utilizados son: velocidad de avance de la mesa de trabajo, diámetro y velocidad de giro de la herramienta, dichos parámetros están relacionados directamente con el coeficiente de fricción y el desgaste generado en la superficie de los materiales empleados en cada investigación, en casi todos los trabajos se emplean lubricantes sintéticos.

La generatriz más empleada fue del tipo constante con una geometría piramidal truncada, la cual limita el cálculo de las fuerzas: tangencial y de formabilidad mediante las ecuaciones planteadas por (Aerens et al. 2010) las cuales se emplean para el cálculo del coeficiente de fricción teórico.

En los estudios de realización de prótesis mediante SPIF utilizando polímeros, se observa que el uso de un lubricante no tóxico y amigable con el medio ambiente no es empleado en los parámetros listados en la Tabla 2.4, (Castelan, Schaeffer, Daleffe, Fritzen, Salvaro, and Da Silva 2014) en su estudio mencionan los lubricantes industriales a base de minerales tienen características de lubricidad excelentes. Sin embargo, sus componentes químicos (Zn, Pb, ni, Cu) son nocivos para la salud, por lo cual es necesario utilizar lubricantes inertes alternativos, tales como vaselina, glicerina, propilenglicol, o a base de grasa animal.

De acuerdo con lo anterior, los parámetros definidos para la fase experimental son:

Tabla 5.1 Parámetro variable

| Parámetros | Unidades | Valores |
|--------------------------------|----------|---------|
| Velocidad husillo (ω) | rpm | 0 |
| | | 2000 |

Tabla 6.2 Parámetros fijos

| Parámetros | Unidades | Valores |
|---------------------------------|----------|---------|
| Espesor de placa (t) | mm | 3 |
| Angulo inicial (φ_i) | grados | 45 |
| Radio generatriz (R_g) | mm | 115 |
| Velocidad de avance (f) | mm/min | 3000 |
| Diámetro herramienta (ϕ) | mm | 10 |

Los materiales usados fueron placas de HDPE y UHMWPE los cuales fueron adquiridos con un distribuidor local, las propiedades mecánicas de los materiales se encuentran listados en la tabla 2.1.

Tabla 7.3 lubricantes empleados para el estudio

| Lubricante | Aditivo | Viscosidad (cP) a T=22 °C |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Aceite de girasol | - | 68 |
| Aceite de girasol 0.025 wt.% | SiO ₂ | 71 |
| Emulsión agua - glicerina | - | 1.41 |
| Emulsión agua - glicerina 0.025 wt.% | SiO ₂ | 1.51 |
| Aceite mineral | - | 53 |

3.4. Geometría y generatriz empleada

La forma básica empleada para la experimentación es un cono truncado utilizando una generatriz de ángulo variable, la profundidad máxima es de 45 mm con un ángulo inicial de 50°, en la figura 3.1 se pueden observar todas las dimensiones detalladamente.

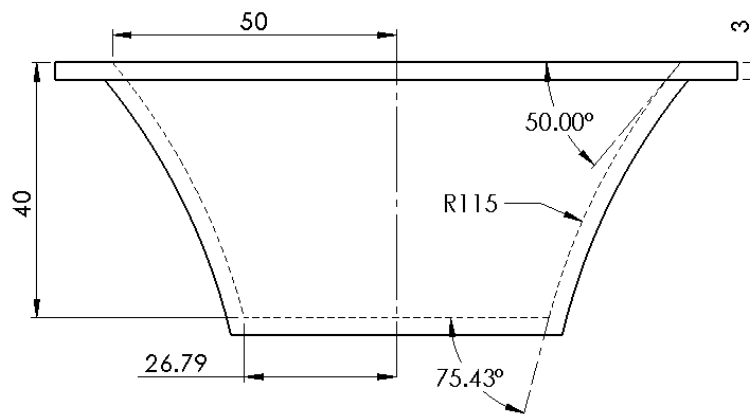


Fig. 16.1 Generatriz empleada

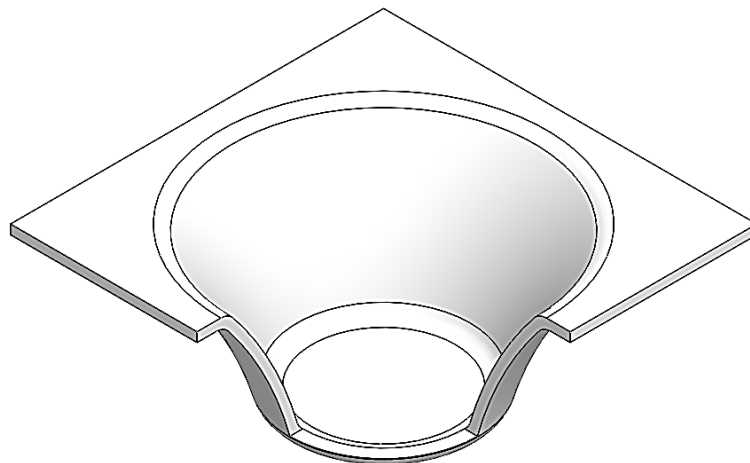


Fig. 17.2 Cono truncado

3.5. Plan experimental

De acuerdo con las tablas 3.1, y 3.2, se define una matriz experimental para cada material (UHMWPE y HDPE), la matriz se enfoca en evaluar el rendimiento de los lubricantes citados en la tabla 3.3 y demostrar los fenómenos que reportan varios autores en distintos estudios que se mencionan en los siguientes párrafos, por lo cual se realizaron 2 lotes con las mismas condiciones para cada lubricante con el fin de obtener datos comparativos.

Para el estudio, se consideró la medición de fuerzas: F_x , F_y y F_z , las cuales se utilizan para el cálculo de las fuerzas: tangencial y de formabilidad mediante las ecuaciones planteadas por (Aerens et al. 2010), debido al uso de diferentes lubricantes con y sin nanopartículas, se tendrá diferentes coeficientes de fricción (COF) teóricos, los cuales están relacionados con cambios en la temperatura y consumo energético durante el proceso, por lo cual se registró dichos cambios en cada prueba realizada.

según (Baena and Peng 2017) al aumentar la temperatura se incrementara el desgaste en los polímeros utilizados sin embargo el uso de los nanolubricantes ayuda a compensar el desgaste en la superficie debido al efecto de reparación de las nanopartículas mencionado por (Lee et al. 2009) por lo cual se analizó la superficie de cada material para verificar si hay presencia de nanopartículas en zonas de desgaste.

Se presentan distintos efectos sobre los lubricantes a medida que las fuerzas se incrementan durante el proceso afectando a su rendimiento, por lo cual se evaluó la propiedad más importante, su viscosidad a distintas temperaturas, ya que los lubricantes son empleados para la manufactura de prótesis medicas es necesario evaluar su biocompatibilidad, por ultimo (Anderson 1982) menciona que una prótesis medica no debe presentar desgaste en su superficie después de su manufactura para que no se generen partículas, las cuales pueden dañar los tejidos aledaños al implante por lo cual se midió la rugosidad superficial por cada lubricante empleado en cada material. En los incisos siguientes se detallará como se realizó cada caracterización mencionada.

Tabla 8.4 Matriz experimental para polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) y de alta densidad (HDPE)

| Diámetro herramienta (\varnothing) (mm) | Lubricante | ω (rpm) |
|--|--------------------------------------|----------------|
| 10 | Aceite de girasol | 0 |
| | | 2000 |
| | Aceite de girasol 0.025 wt.% | 0 |
| | | 2000 |
| | Emulsión agua - glicerina | 0 |
| | | 2000 |
| | Emulsión agua - glicerina 0.025 wt.% | 0 |
| | | 2000 |
| | Aceite mineral | 0 |
| | | 2000 |

3.6. Proceso de conformado incremental monopunto

Para generar un cono truncado, indicado en la figura 3.3, las láminas de polímero fueron sujetadas con la configuración que aparece en la figura 3.3, la lámina se colocó entre dos placas una de soporte y otra de anclaje. se consideró un soporte con las siguientes dimensiones: 150 x 150 mm, con un área eficaz de 120 x 120 mm. Las pruebas fueron realizadas en un centro de mecanizado Kryle 535 VMC de tres ejes equipada con un dinamómetro piezoeléctrico marca Kistler® modelo 9257B, y un amplificador de carga conectado a un sistema de adquisición de datos. Las fuerzas de formación se midieron en los tres ejes F_x , F_y y F_z . El registro de la temperatura se realizó con una cámara termográfica ImageIR® modelo 9300 y para la medición de la potencia eléctrica se empleó el registrador de energía marca Fluke® modelo 1730, Las pruebas consistieron en la conformación gradual del cono truncado con una generatriz de ángulo de pared variable utilizando los lubricantes especificados en la tabla 3.3.

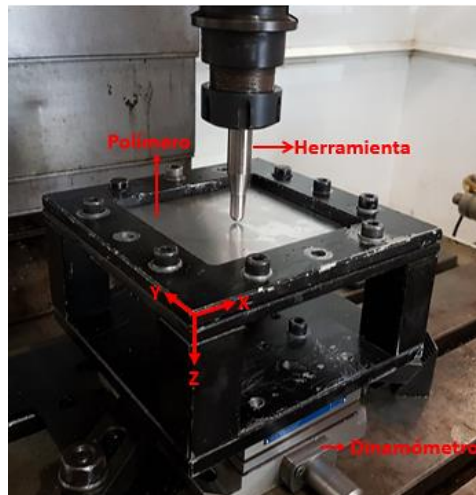


Fig. 18.2 Cono truncado

En la figura 3.3 se observan los equipos de medición utilizados.



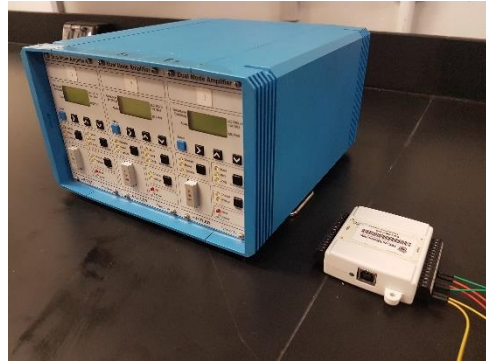
a)



b)



c)



d)

Fig. 19.3 a) cámara termográfica, b) Dinamómetro, c) Registrador de energía, d) Amplificador y tarjeta de adquisición de datos



Fig. 20.4 Centro de mecanizado Kryle 535 VMC

4. Resultados y discusión

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos y el análisis sobre cómo afectan los parámetros seleccionados del proceso SPIF a los regímenes de lubricación de los lubricantes comunes y nano estructurados empleados para el presente proyecto.

4.1. Medición de fuerzas

Las fuerzas fueron registradas mediante el uso de un dinamómetro Kistler 9257b, el cual mediante sensores de cuarzo permite obtener las fuerzas que se desarrollan durante el proceso SPIF en los ejes X, Y, y Z, en la figura 4.1 se observa el esquema donde se representan las fuerzas en los tres ejes.

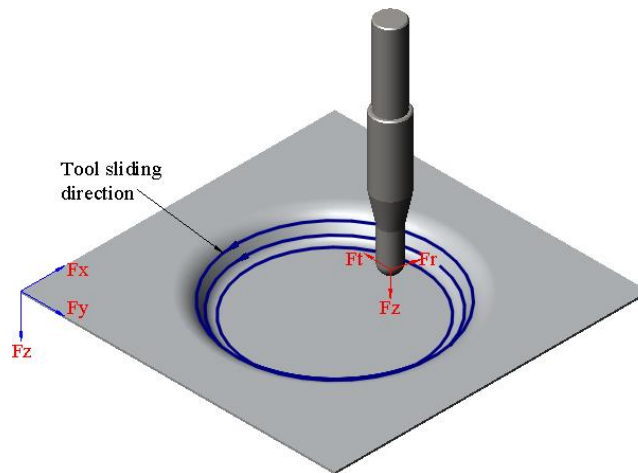
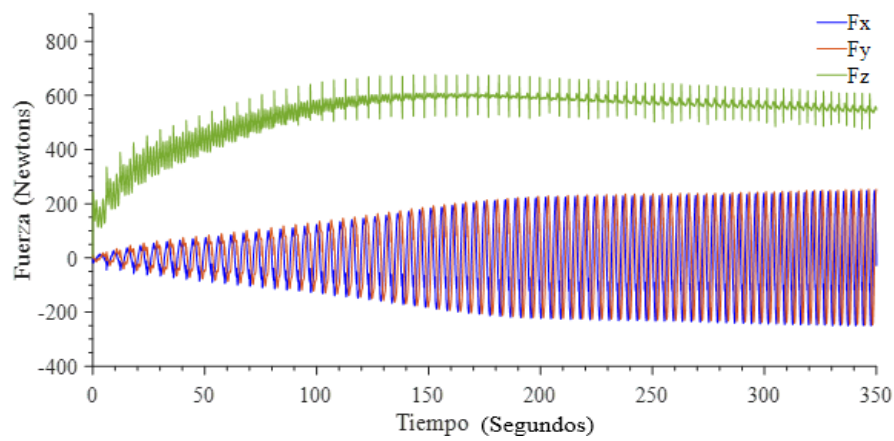
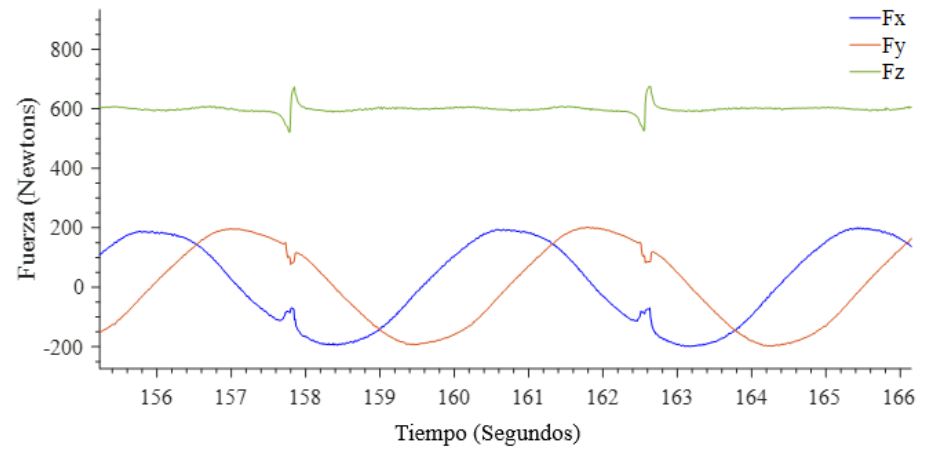


Fig. 21.1 Fuerzas ortogonales

Los resultados de la medición de fuerza son mostrados en la figuras 4.2 y 4.3 para los polímeros HDPE y UHMWPE respectivamente, la curva mostrada de color verde es la fuerza axial o en el eje Z, la cual está relacionada con el paso incremental y la deformación vertical, las fuerzas planares o Fx y FY, en color azul y rojo respectivamente están relacionadas con la fuerza de formabilidad, la fuerza de fricción y ciertos modos de falla (arrugas y grietas) (Davarpanah et al. 2015), las fuerzas fueron registradas para los dos materiales empleando los lubricantes mencionados en la tabla 3.3, siguiendo el plan experimental propuesto en la tabla 3.4.

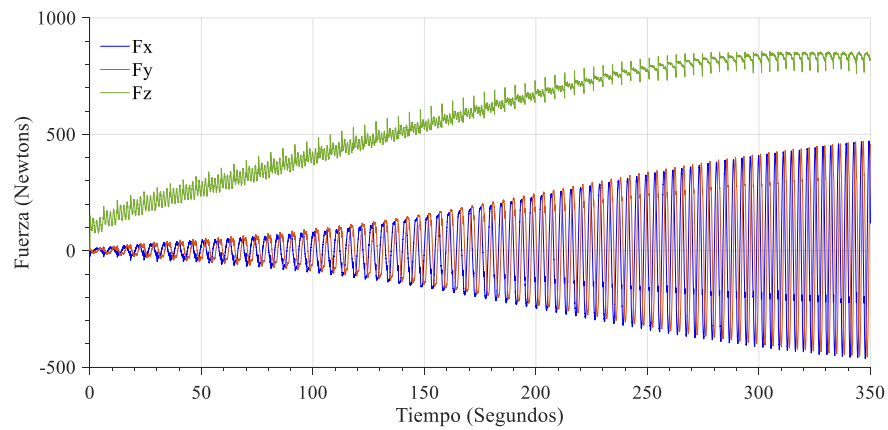


a)

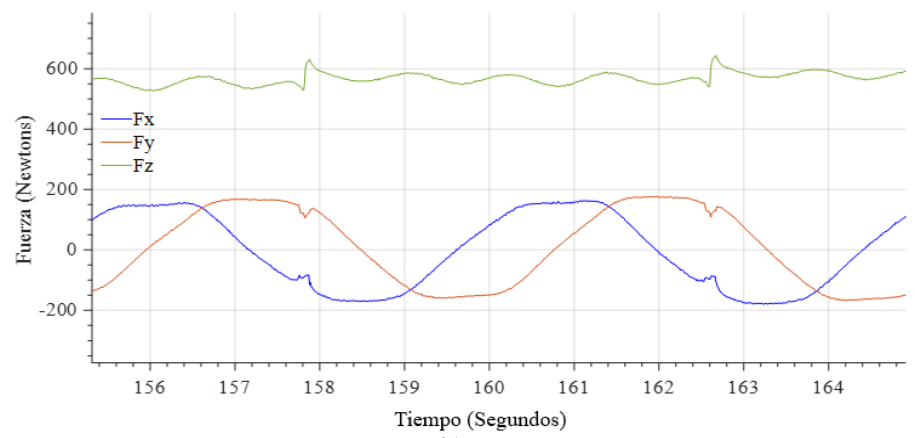


b)

Fig. 22.2 a) Fuerzas ortogonales (Fx, Fy y Fz) y b) vista a detalle de las tres componentes para el polímero HDPE



a)



b)

Fig. 23.3 a) Fuerzas ortogonales (Fx, Fy y Fz) y b) vista a detalle de las tres componentes para el polímero UHMWPE

Mediante las ecuaciones propuestas por (Aerens et al. 2010), se pueden calcular las fuerzas: tangenciales y radiales las cuales son componentes de la fuerza planar resultante, se debe tener en cuenta que estas ecuaciones son válidas para una geometría de cono truncado.

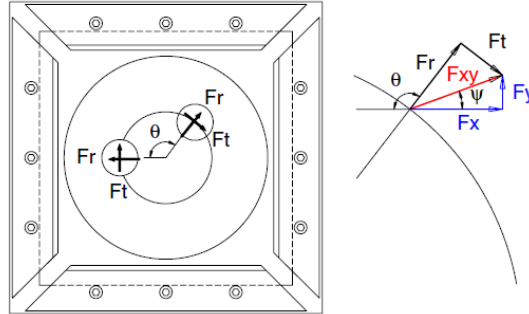


Fig. 24.4 Relación entre las fuerzas planares F_x , F_y y las fuerzas: tangencial (F_t) y radial (F_r). (Aerens et al. 2010)

$$F_{xy} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4.1)$$

$$\psi = \tan^{-1} \frac{F_y}{F_x} \quad (4.2)$$

$$\theta = \frac{t}{T} * 2\pi \quad (4.3)$$

El ángulo teta está relacionado con la posición de la herramienta en cada contorno realizado, su valor está en el rango de 0 a 360 grados, el tiempo t es la posición actual de la herramienta en el contorno y T es el tiempo total en realizar el contorno. La ecuación 4.1 es la fuerza planar resultante.

Con las anteriores relaciones matemáticas se planteó las ecuaciones para encontrar las fuerzas: tangencial y radial.

$$F_t = \text{sign}(F_x) \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \sin(\theta + \psi) \quad (4.4)$$

$$F_r = -\text{sign}(F_x) \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \cos(\theta + \psi) \quad (4.5)$$

Con las ecuaciones 4.4 y 4.5 se obtuvieron el comportamiento de la fuerza tangencial y radial utilizando diferentes lubricantes durante el proceso SPIF aplicado a los polímeros UHMWPE y HDPE.

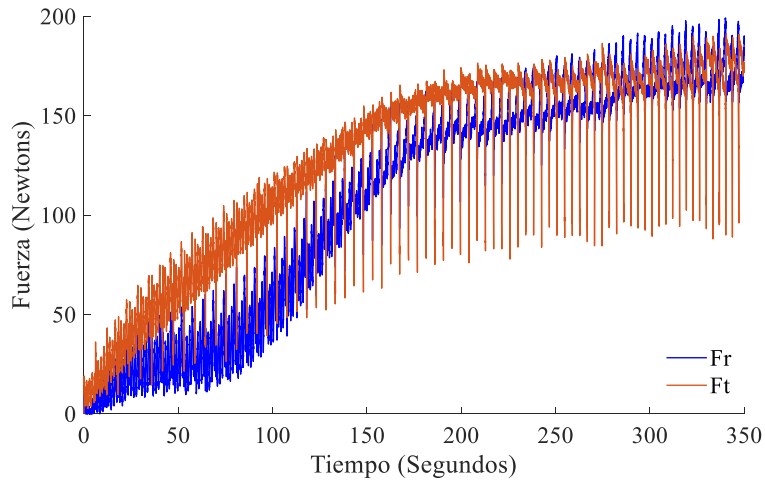


Fig. 25.5 Fuerza tangencial y radial para el polímero HDPE

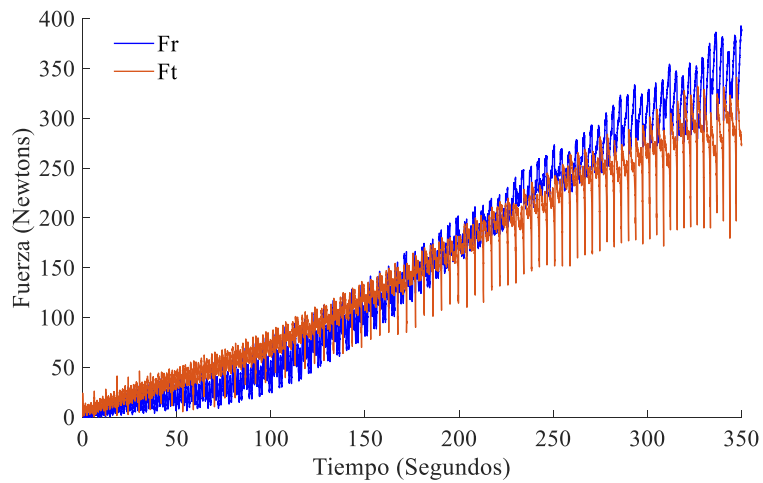


Fig. 26.6 Fuerza tangencial y radial para el polímero UHMWPE

Las fuerzas: ortogonales (F_x , F_y y F_z), tangenciales y radiales presentadas anteriormente fueron obtenidas para las condiciones de: $\Delta z=0.5$ y velocidad de giro de herramienta 0 rpm utilizando como lubricante aceite de girasol.

A continuación, se presentan las fuerzas planares obtenidas los polímeros empleados para el desarrollo del estudio con a diferentes velocidades de giro de herramienta empleando lubricantes nanoestructurados y convencionales

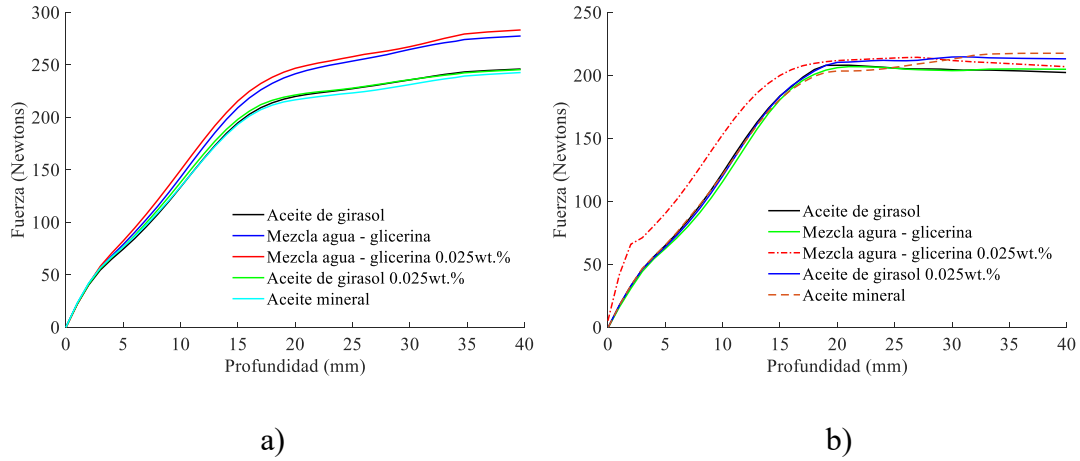


Fig. 27.7 Fuerza planar (F_{xy}) HDPE: a) 0 rpm Y b) 2000 rpm

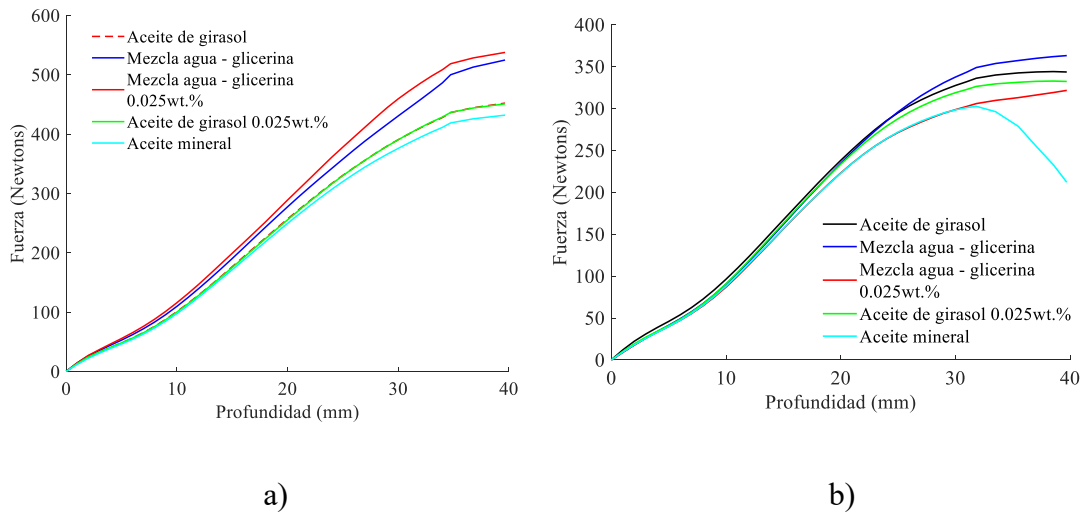


Fig. 28.8 Fuerza planar (F_{xy}) UHMWPE: a) 0 rpm Y b) 2000 rpm

En las figuras 4.7 y 4.8 se observan las tendencias de las fuerzas planares al usar los lubricantes propuestos en las tabla 3.3, hay un claro aumento en la fuerza al usar lubricantes base agua con la condición de 0 RPM en ambos polímeros, lo cual se atribuye al espesor de la capa de lubricación, la cual no soporta la carga y permite que entren en contacto las superficies (herramienta-polímero), hay que acotar que al momento de utilizar aceite mineral con la condición de 2000 rpm en el polímero UHMWPE, se nota una disminución en las fuerza planar lo cual se atribuye al efecto de la temperatura del proceso.

4.2. Indicador de fricción

Es usado para investigar los efectos de la fricción en la conformabilidad con velocidades de giro de herramienta de 0 y 2000 rpm. Este indicador es una relación entre la fuerza promedio tangencial y la fuerza normal promedio de cada contorno. como se indica en la figura 4.1, la ecuación se la expresa de la siguiente manera.

$$\mu_i = \frac{F_{tangencial}}{F_{normal}} \quad (4.6)$$

La fuerza normal fue calculada para cada contorno mediante la siguiente ecuación, la cual se detalla en la figura 4.9.

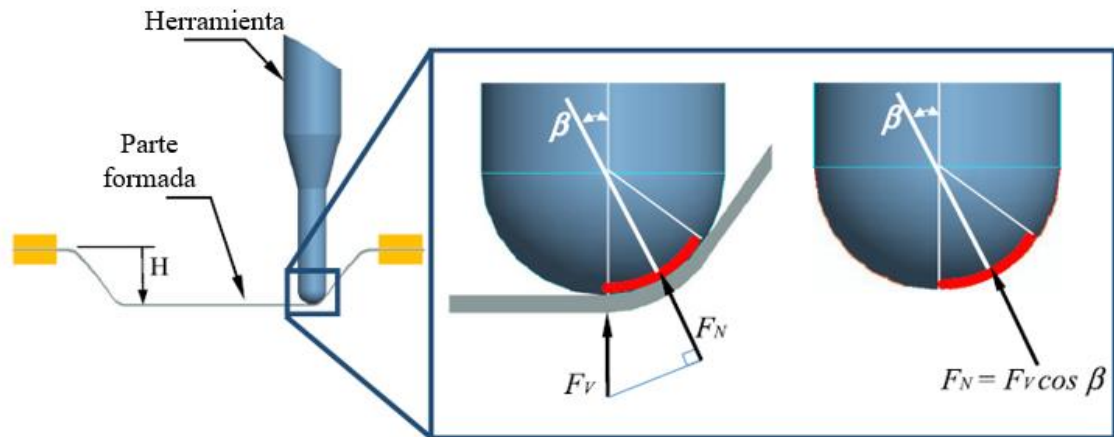


Fig. 29.9 Proyección de la fuerza vertical actuando sobre la herramienta, a lo largo de una línea de contacto normal.

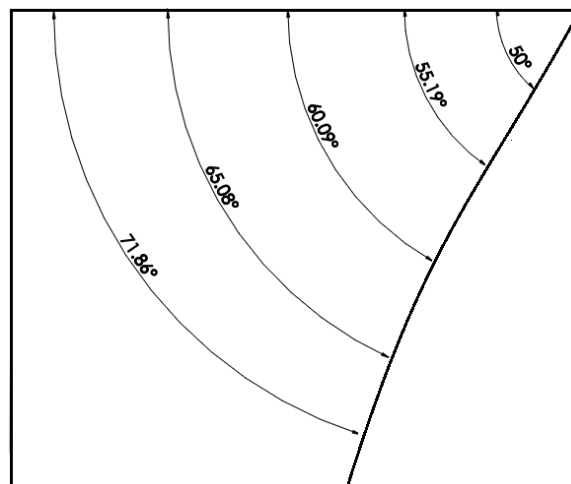


Fig. 30.10 Ángulos de pared de la geometría utilizada

Donde:

$$\beta = \text{angulo de pared del contorno actual} - 90^\circ \quad (4.7)$$

Para obtener información más detallada sobre los efectos de lubricación, las curvas de coeficiente de fricción (μ_i) de las partes formadas, se trazaron usando la ecuación (4.6). Las curvas de fricción correspondientes obtenidas para los lubricantes de la tabla 3.3, se muestran en las figuras 4.11 y 4.12.

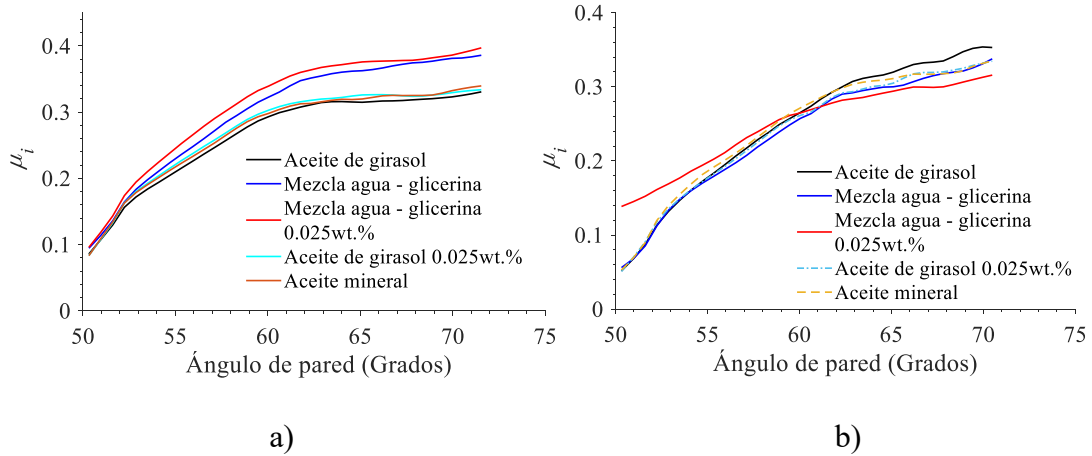


Fig. 31.11 Coeficiente de fricción usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm

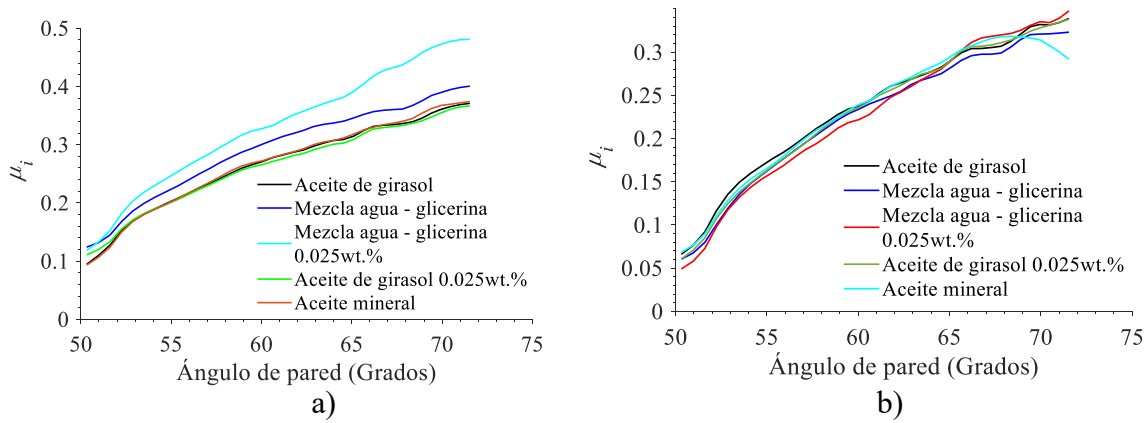


Fig. 32.12 Coeficiente de fricción usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm

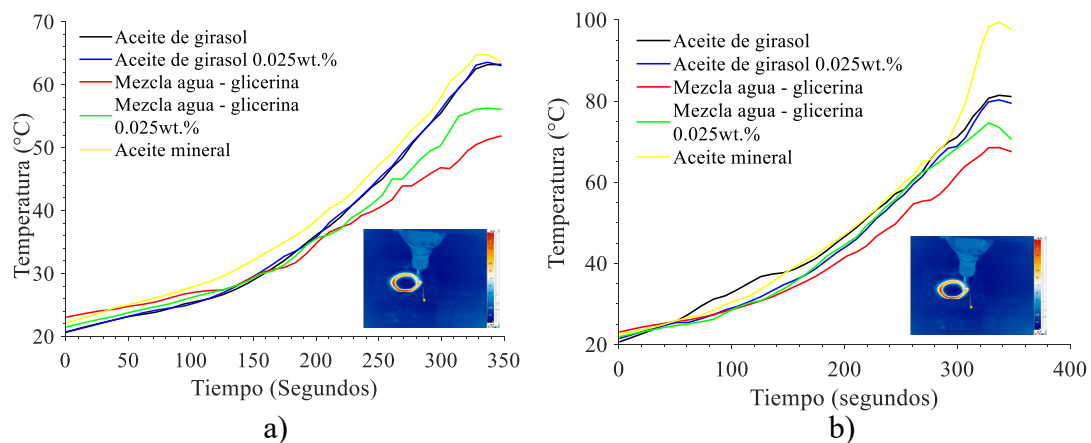
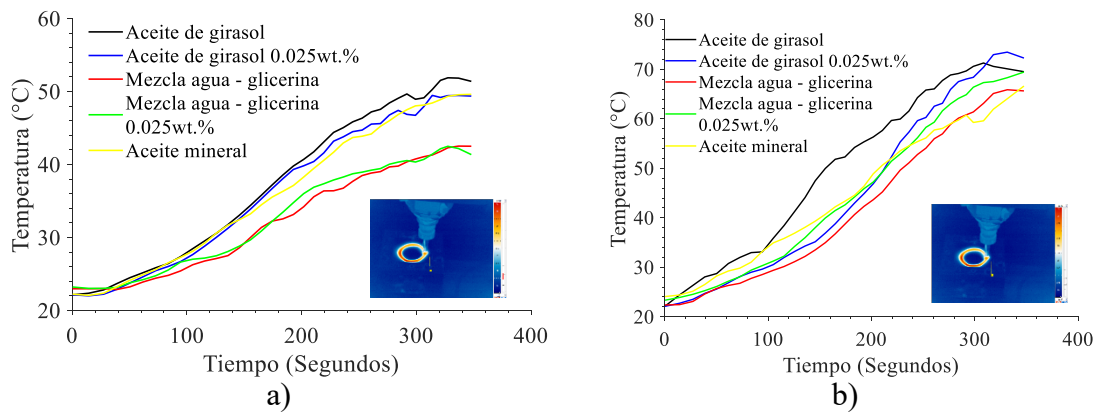
En las gráficas se puede observar un incremento en el indicador de fricción al momento de utilizar la mezcla agua – glicerina como medio lubricante durante el proceso para ambos polímeros, además se puede notar que los indicadores de fricción para el aceite mineral y el aceite de girasol con y sin nanopartículas presentan valores similares, esto es debido a la cantidad de ácido estérico presente en el aceite de girasol lo cual tiene una influencia significativa en la reducción de desgaste y fricción (Siniawski et al. 2008), la similitud entre el aceite vegetal y mineral es constante en ambas condiciones

4.3. Influencia de la temperatura en las fuerzas de formado

4.3.1. Medición de temperatura del proceso

Al usar diferentes lubricantes, parámetros y polímeros durante el proceso, se obtendrán diferentes coeficientes de fricción los cuales están relacionados con la temperatura, debido al aumento en el contacto de la interfaz (herramienta-material), se debe tener en cuenta la capacidad del lubricante para disipar el calor, el cual está determinado por su coeficiente de convección. Además, el espesor de la película lubricante es muy importante ya que, si disminuye, la fricción aumenta este fenómeno es mejor explicado utilizando las curvas stribeck.

Las mediciones de la distribución de la temperatura registradas para cada caso se muestran en la figura 3. Como puede verse desde esta figura, la magnitud de la temperatura varía en la punta de la herramienta en función de la fricción y la velocidad del husillo (I. Bagudanch et al. 2015)



La temperatura del material aumenta cuando la herramienta no gira. Esto se debe principalmente a efectos de fricción entre la herramienta y los materiales utilizados. En este caso, se necesita un aumento de la magnitud de la fuerza vertical para deformar el polímero, sin embargo, se observa una disminución de temperatura al usar lubricantes base agua debido a su coeficiente de convección logrando disipar con mayor facilidad el calor. Al utilizar aceite mineral como medio lubricante para la condición de 2000 rpm en el polímero UHMWPE se observa un incremento en la temperatura de 100 °C lo que cuestiona el uso de este lubricante al querer manufacturar un dispositivo con exactitud geométrica.

4.3.2. Temperatura y fuerzas de formado

La temperatura generada durante el proceso tiene un efecto directo en las fuerzas de formado, ya que al producir un aumento en la velocidad de giro se incrementa la fricción, desde el punto de vista de formabilidad la temperatura contribuye a una mejora sin embargo al acceder cierto rango de temperatura se provocaría que el material se ablande y pierda sus propiedades mecánicas iniciales. En las figuras se muestra la influencia de la temperatura de en las fuerzas planares.

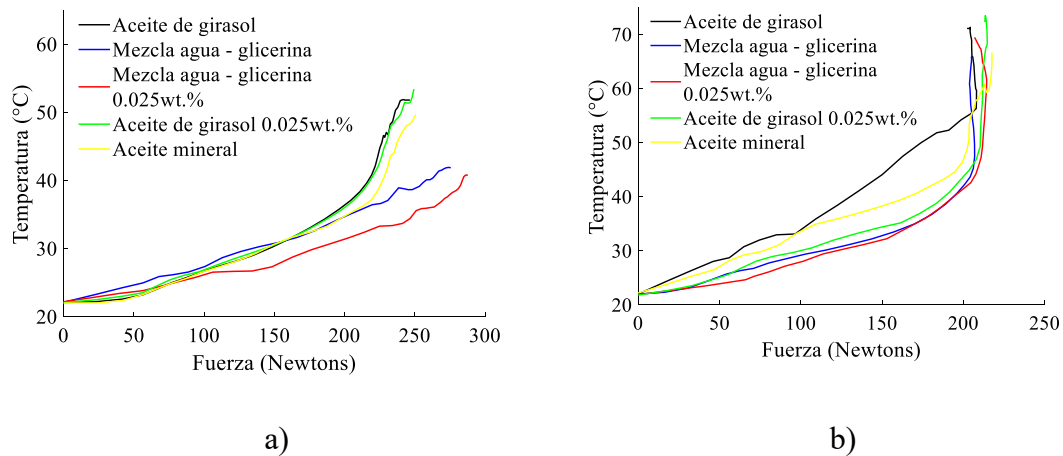


Fig. 35.15 Fuerza planar – temperatura usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm

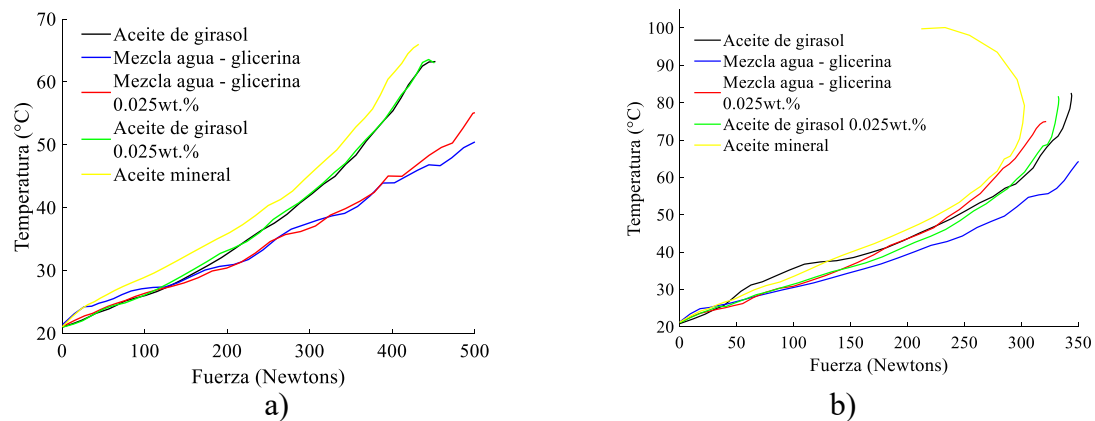


Fig. 36.16 Fuerza planar – temperatura usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm

Al usar aceite mineral con la condición de 2000 rpm en el polímero UHMWPE se observa un fenómeno interesante, al alcanzar altas temperaturas se observa que el aceite mineral provoca un ablandamiento en el polímero, el cual se ve reflejado en la disminución de la fuerza planar, (Kurtz 2004) menciona que el incrementarse la temperatura en el polímero UHMWPE sobre los 60 °C se promueve el desgaste de la superficie, aumentando el coeficiente de fricción lo cual está relacionado con la capacidad del lubricante para soportar la carga de deformación que ejerce la herramienta sobre el material.

4.4. Consumo energético

Dado que el consumo de energía se determina por la potencia suministrada multiplicada por la duración de una operación, se midió la energía eléctrica consumida para todos los lubricantes empleados durante el proceso de conformado para los polímeros UHMWPE Y HDPE. Las mediciones se repitieron para todas las pruebas enumeradas en la tabla 3.4. Una vez recolectada la potencia y los valores de tiempo, se determinó el consumo de energía correspondiente.

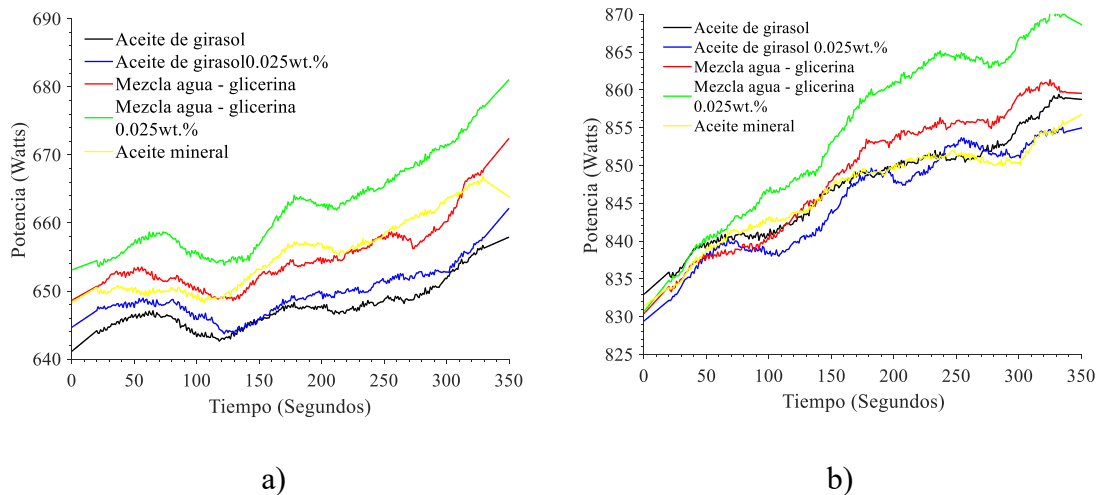


Fig. 37.17 Consumo energético usando lubricantes convencionales y nanoestructurados en UHMWPE y HDPE: a) 0 rpm y b) 2000 rpm

El consumo energético está directamente influenciado por el tiempo de formado del dispositivo, sin embargo, al usar lubricantes con distinta viscosidad se pudo observar un cambio en las fuerzas de formabilidad, las cuales se ven reflejadas en el consumo energético de la maquina

A través de todos los resultados expuestos se observa el rendimiento de cada uno de los lubricantes utilizados en la disminución de fuerzas, temperatura del proceso, y consumo energético, estos cambios se deben a la capacidad de la película de lubricación para soportar la carga que ejerce la herramienta al deformar el material, debido a los parámetros escogidos para el estudio y la evolución de las fuerzas a medida que se conforma la generatriz empleada, el lubricante experimenta distintos regímenes de lubricación los cuales será mejor explicados mediante la curva Stribeck – SPIF.

4.5. Análisis superficial

4.5.1. Medición de rugosidades

Las mediciones de rugosidad superficial fueron realizadas mediante el uso del microscopio confocal axio csm700 de la marca Carl Zeiss®, para la medición se dividió a la probeta en tres zonas: inicial, media y final, en las cuales se realizaron cuatro mediciones obteniendo un valor promedio de rugosidad de cada zona, en la tabla 4.1 se registran los resultados de las mediciones.

Tabla 9.1 Rugosidades HDPE – 0 RPM

| Rugosidad promedio (μm) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|
| Zona | Aceite de girasol | Mezcla agua - glicerina | Mezcla agua - glicerina 0.025 wt.% | Aceite de girasol 0.025 wt.% | Aceite mineral |
| 1 | 0.295 | 0.602 | 0.81 | 0.417 | 0.35 |
| 2 | 0.342 | 0.714 | 0.882 | 0.514 | 0.456 |
| 3 | 0.47 | 0.828 | 1.383 | 1.127 | 0.558 |

Tabla 10.2 Rugosidades HDPE – 2000 RPM

| Rugosidad promedio (μm) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|
| Zona | Aceite de girasol | Mezcla agua - glicerina | Mezcla agua - glicerina 0.025 wt.% | Aceite de girasol 0.025 wt.% | Aceite mineral |
| 1 | 0.32 | 0.65 | 0.69 | 0.4 | 0.38 |
| 2 | 0.44 | 0.74 | 0.78 | 0.55 | 0.45 |
| 3 | 0.67 | 0.84 | 1.88 | 0.78 | 0.54 |

Tabla 11.3 Rugosidades UHMWPE – 0 RPM

| Rugosidad promedio (μm) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|
| Zona | Aceite de girasol | Mezcla agua - glicerina | Mezcla agua - glicerina 0.025 wt.% | Aceite de girasol 0.025 wt.% | Aceite mineral |
| 1 | 0.59 | 0.70 | 0.82 | 0.78 | 0.35 |
| 2 | 0.95 | 1.48 | 1.28 | 0.94 | 0.81 |
| 3 | 1.5 | 1.92 | 1.64 | 1.51 | 1.0 |

Tabla 12.4 Rugosidades UHMWPE – 2000 RPM

| Rugosidad promedio (μm) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|
| Zona | Aceite de girasol | Mezcla agua - glicerina | Mezcla agua - glicerina 0.025 wt.% | Aceite de girasol 0.025 wt.% | Aceite mineral |
| 1 | 0.71 | 0.8 | 0.78 | 0.8 | 0.38 |
| 2 | 0.87 | 1.05 | 1.32 | 1.02 | 1.31 |
| 3 | 1.26 | 1.63 | 2.18 | 1.17 | 3.37 |

Las zonas donde se realizaron la medición se especifican en la siguiente figura.

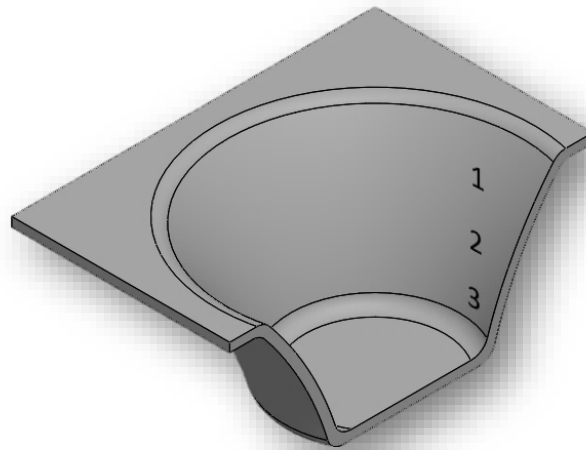


Fig. 38.18 Zonas de medición de rugosidad

4.5.2. Caracterización de la superficie mediante microanálisis por sonda de electrones (EDS)

El análisis de la superficie por EDS, se lo realizo para comprobar los elementos químicos presentes por el uso de los nanolubricantes, las condiciones para realizar esta caracterización fueron: Voltaje 5 Kvs, recubrimiento usado: oro y alto vacío. La caracterización solo se la realizo en el polímero UHMWPE. En las siguientes graficas su pueden observar los resultados

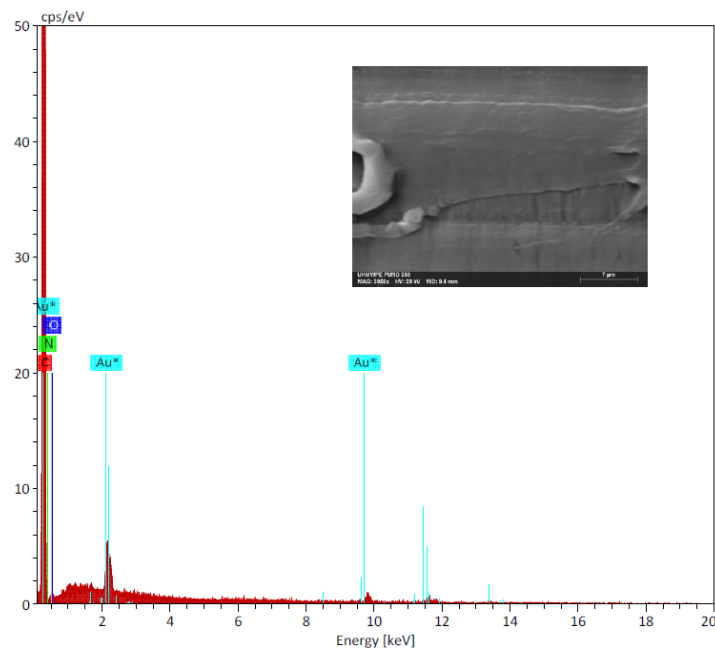


Fig. 39.19 Análisis EDS a muestra inicial de UHMWPE

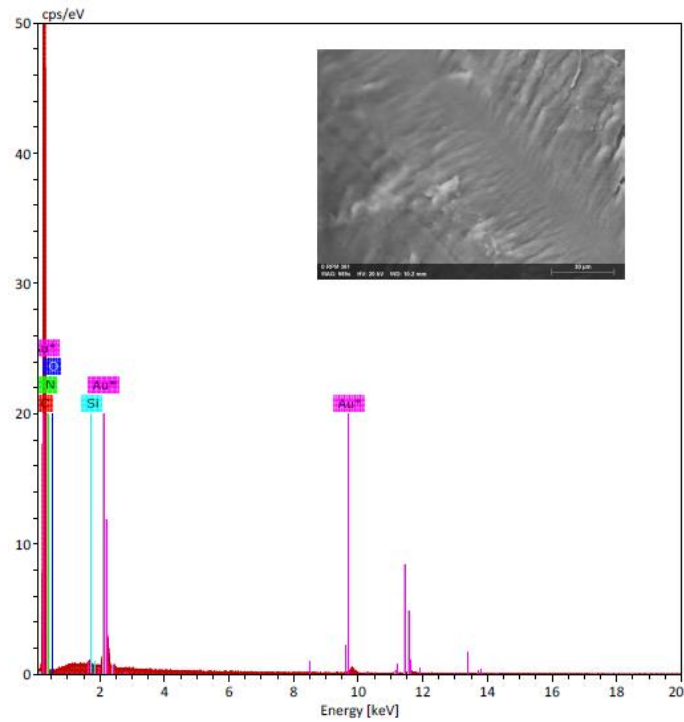


Fig. 40.20 Análisis EDS a muestra de UHMWPE deformada a 0 RPM

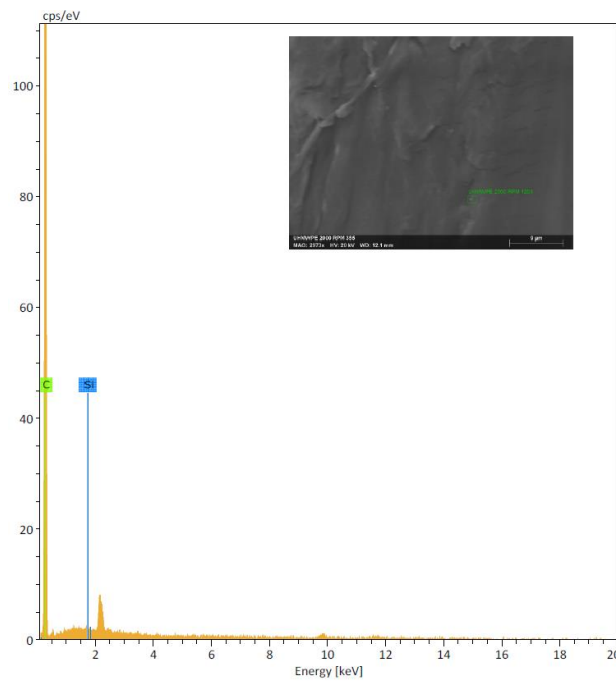


Fig. 41.21 Análisis EDS a muestra de UHMWPE deformada a 2000 RPM

Mediante esta técnica de caracterización se pudo observar que al utilizar nanopartículas como aditivos en un lubricante forman una capa sobre la superficie del material además se podría proponer un método de difusión de las nanopartículas hacia la superficie de los polímeros empleados.

4.6. La curva stribeck

La curva stribeck relaciona el indicador de fricción con el número de Sommerfeld, mediante esta relación se puede analizar los distintos regímenes de lubricación que presenta un lubricante al verse sometido a distintas cargas y velocidades entre las superficies en contacto.

El número de Sommerfeld relaciona la viscosidad del lubricante empleado con la carga normal a la cual se encuentra sometido el lubricante y la velocidad que presentan las superficies en contacto, a continuación, se detallara como se obtuvieron cada uno de los elementos mencionados.

4.6.1. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad física que presentan todos los fluidos, la cual indica la mayor o menor resistencia que ofrecen al movimiento de sus partículas cuando son sometidas a un esfuerzo cortante, para la curva stribeck la viscosidad juega un papel importante en los regímenes de lubricación ya que a medida que disminuye la viscosidad, el espesor de la película lubricante lo que provoca la transición entre los diferentes regímenes.

A continuación, se presenta la medición y los instrumentos utilizados para la obtención de la viscosidad de los lubricantes empleados.

Las condiciones en las que se realizó la medición fueron temperatura ambiente: 24 °C y humedad: 41.3 %, se empleó un viscosímetro HAAKE 7 Plus de thermo scientific®, el husillo usado fue del tipo L1 para viscosidades bajas cuyo rango de viscosidad es (15-20.000) (cP), el incremento en la temperatura fue registrada con la ayuda de un sensor incorporado en el equipo.

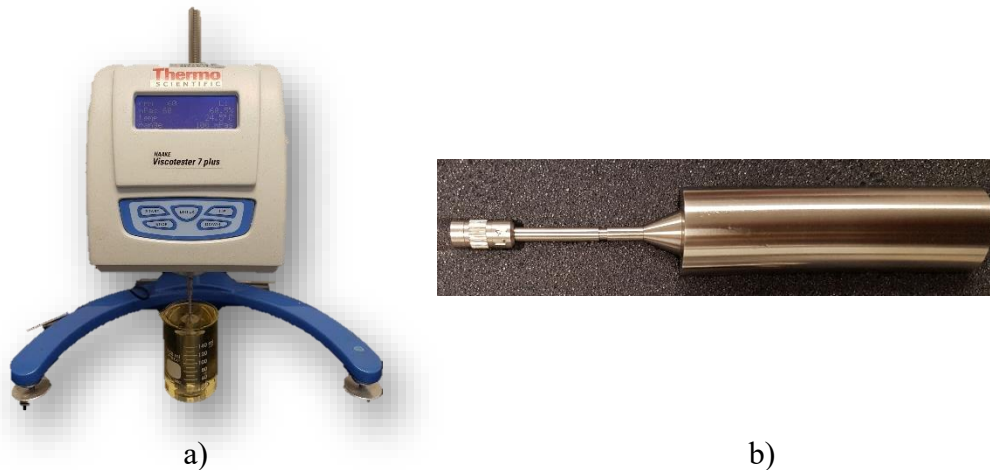


Fig. 42.22 a) Viscosímetro HAAKE 7 Plus **b)** husillo L1

Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 13.5 Viscosidades obtenidas para aceite de girasol y aceite mineral

| Temperatura (°C) | Aceite de girasol | Aceite de girasol 0.025 wt. % SiO ₂ | Aceite mineral |
|------------------|-------------------|---|----------------|
| | Viscosidad (cP) | | |
| 24 | 60 | 64 | 45 |
| 26 | 55 | 58 | 42 |
| 30 | 45 | 48 | 34 |
| 35 | 36 | 42 | 29 |
| 40 | 30 | 34 | 23 |
| 45 | 26 | 31 | 19 |
| 50 | 21 | 26 | 15 |
| 55 | 19 | 22 | 12 |
| 60 | 17 | 20 | 10 |

Debido a que las viscosidades de la mezcla agua-glicerina son muy bajas fue necesario utilizar el viscosímetro de ostwald, el cual cubre un rango de medición de (0.4 -1.6) (cSt), el instrumento utilizado para la medición fue un viscosímetro de tubo Cannon-Fenske con una constante $K=0.002$ cSt/s. El tiempo de fluidez se mide una vez que el fluido pase a través de la marca "c", midiendo el tiempo para que el menisco pase de "C" a "E" como se indica en la figura 4.19.

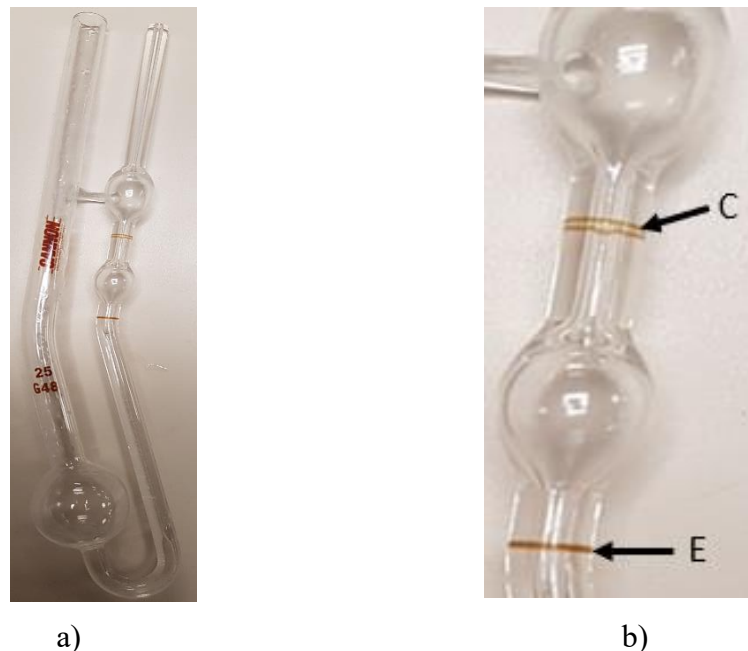


Fig. 43.23 a) viscosímetro de ostwald **b)** Intervalo de medición

Los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 14.6 Densidades y tiempos de flujo a diferentes temperaturas para mezcla agua – glicerina

| Temperatura (°C) | Mezcla agua - glicerina | | Mezcla agua – glicerina 0.025 wt. % SiO ₂ | |
|------------------|-------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| | Densidad (gr/ml) | Tiempo de flujo (segundos) | Densidad (gr/ml) | Tiempo de flujo (segundos) |
| 24 | 1.04 | 655 | 1.09 | 671 |
| 50 | 1.04 | 508 | 1.08 | 544 |
| 70 | 1.03 | 355 | 1.07 | 473 |

Tabla 15.7 Densidades y tiempos de flujo a diferentes temperaturas para mezcla agua - glicerina

| Temperatura (°C) | Mezcla agua - glicerina | Mezcla agua – glicerina 0.025 wt. % SiO ₂ |
|------------------|-------------------------|--|
| | Viscosidad (cP) | Viscosidad (cP) |
| 24 | 1.36 | 1.47 |
| 50 | 1.05 | 1.18 |
| 70 | 0.73 | 1.02 |

Con los datos obtenidos se trazan las curvas de viscosidad con respecto al temperatura para los lubricantes utilizados.

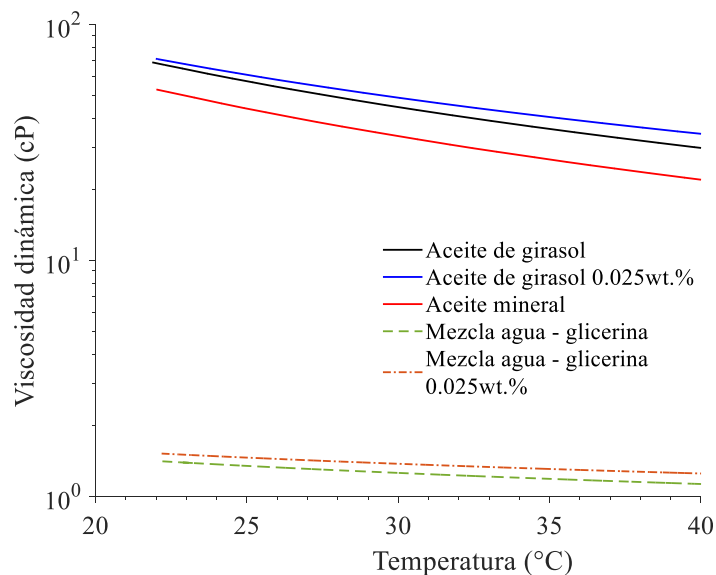


Fig. 44.24 Viscosidad dinámica de los lubricantes convencionales y nanoestructurados

4.6.2. Velocidad

Una vez obtenida la viscosidad se debe obtener la velocidad de la herramienta al realizar un contorno para lo cual se necesita conocer el tiempo de cada contorno realizado y la distancia recorrida por la herramienta, lo cual se obtiene de la siguiente de manera.

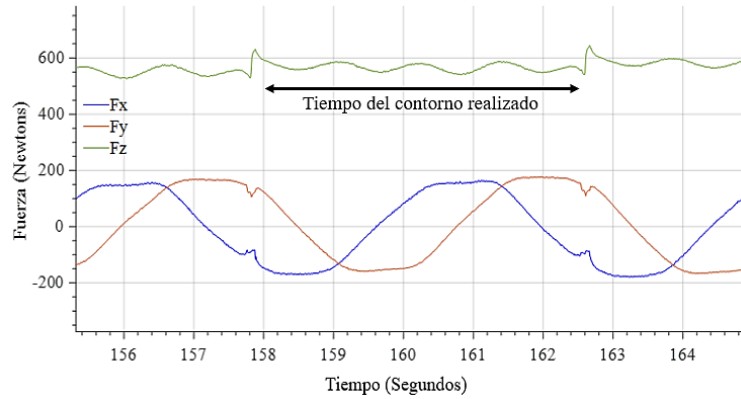


Fig. 45.25 Intervalo de tiempo para un contorno realizado en el proceso SPIF

La distancia recorrida es igual al perímetro del contorno realizado, es decir:

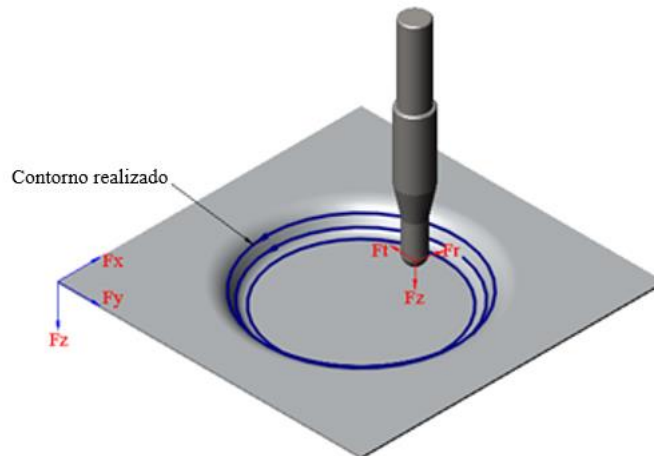


Fig. 46.26 Intervalo de tiempo para un contorno realizado en el proceso SPIF

La velocidad fue calculada con la siguiente expresión

$$V = \frac{2 * \pi * r}{\text{tiempo del contorno realizado}} \quad (4.8)$$

Donde r es el radio del contorno

4.6.3. Fuerza normal

La fuerza normal se la calculo mediante la proyección de la fuerza vertical (Fz) la cual actúa sobre la herramienta, a lo largo de una línea de contacto normal.

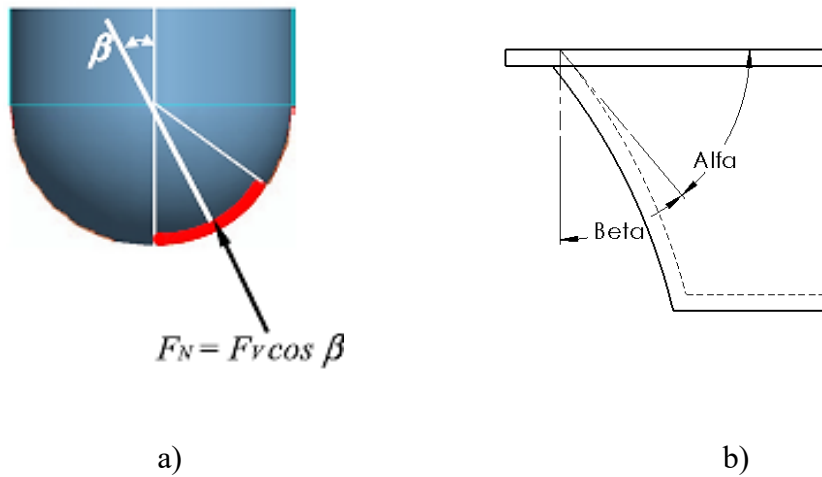


Fig. 47.27 a) Fuerza normal b) Ángulos utilizados para el cálculo de la fuerza normal

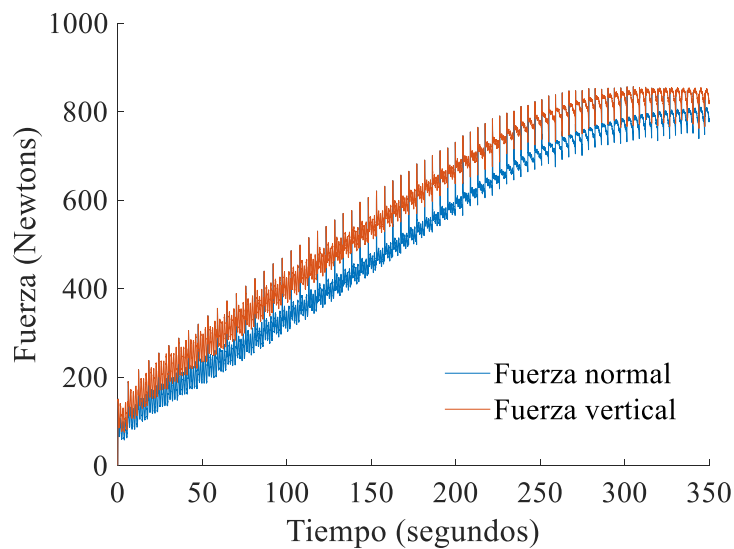


Fig. 48.28 Fuerza vertical y normal

Una vez obtenidos todos los parámetros del número de Sommerfeld, se obtuvo la curva Stribeck-SPIF para cada condición: 0 rpm y 2000 rpm, polímeros: UHMWPE y HDPE utilizando los lubricantes especificados en la tabla 3.3

4.6.4. Curva Stribeck – SPIF para HDPE 0 RPM

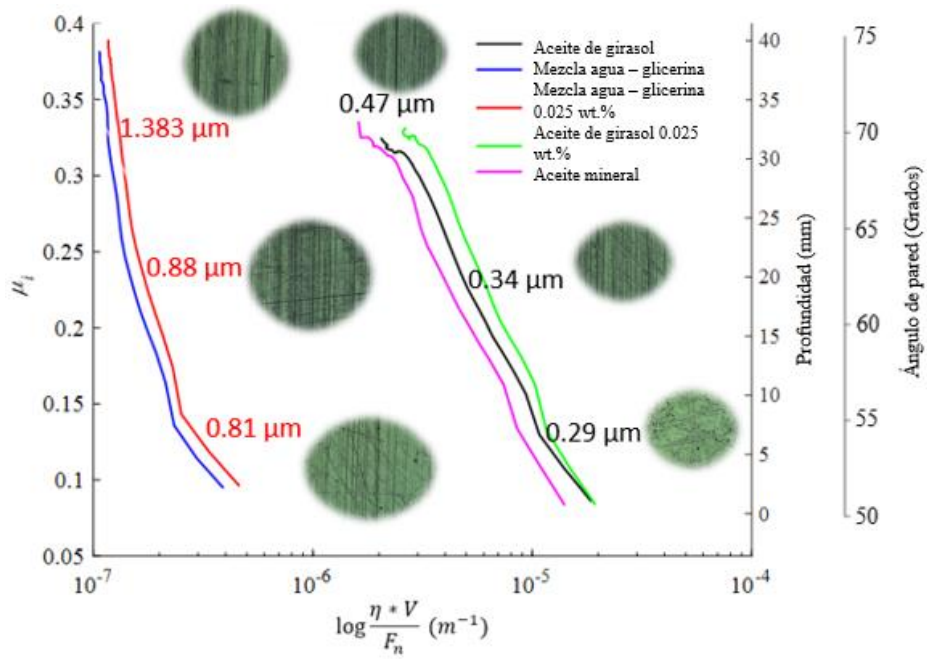


Fig. 49.29 Curva Stribeck – SPIF HDPE 0 RPM

4.6.5. Curva Stribeck – SPIF para HDPE 2000 RPM

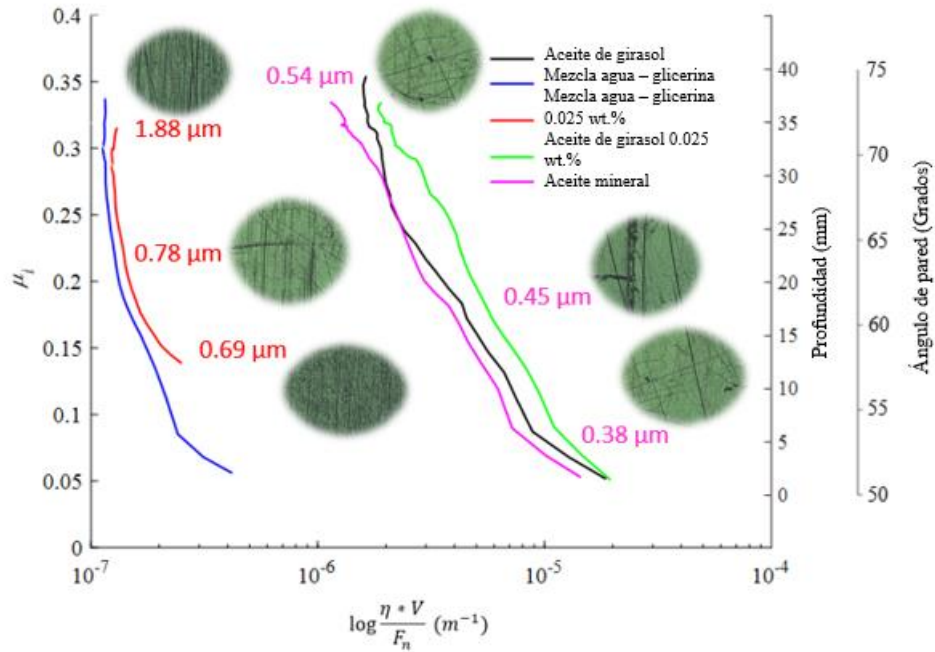


Fig. 50.30 Curva Stribeck – SPIF HDPE 2000 RPM

4.6.6. Curva Stribeck – SPIF para UHMWPE 0 RPM

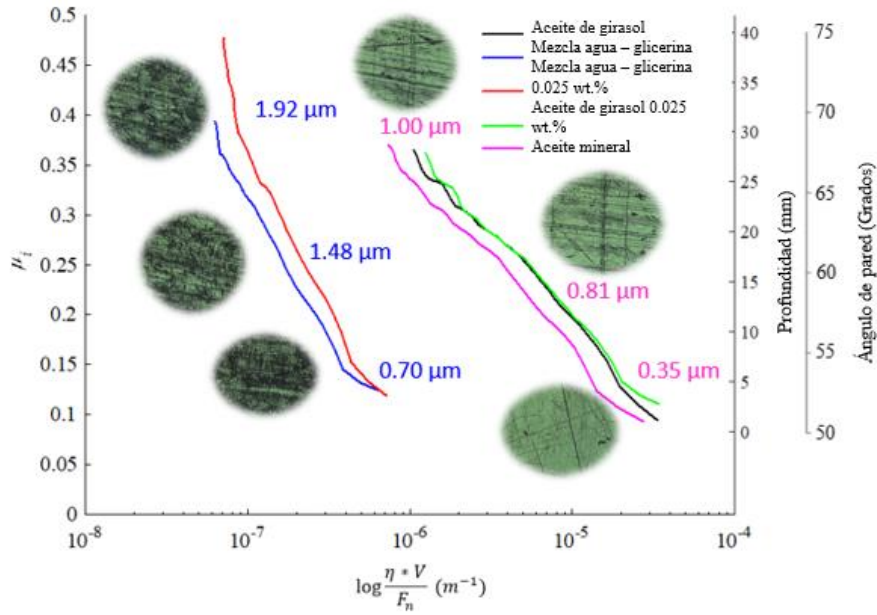


Fig. 51.31 Curva Stribeck – SPIF UHMWPE 0 RPM

4.6.7. Curva Stribeck – SPIF para UHMWPE 0 RPM

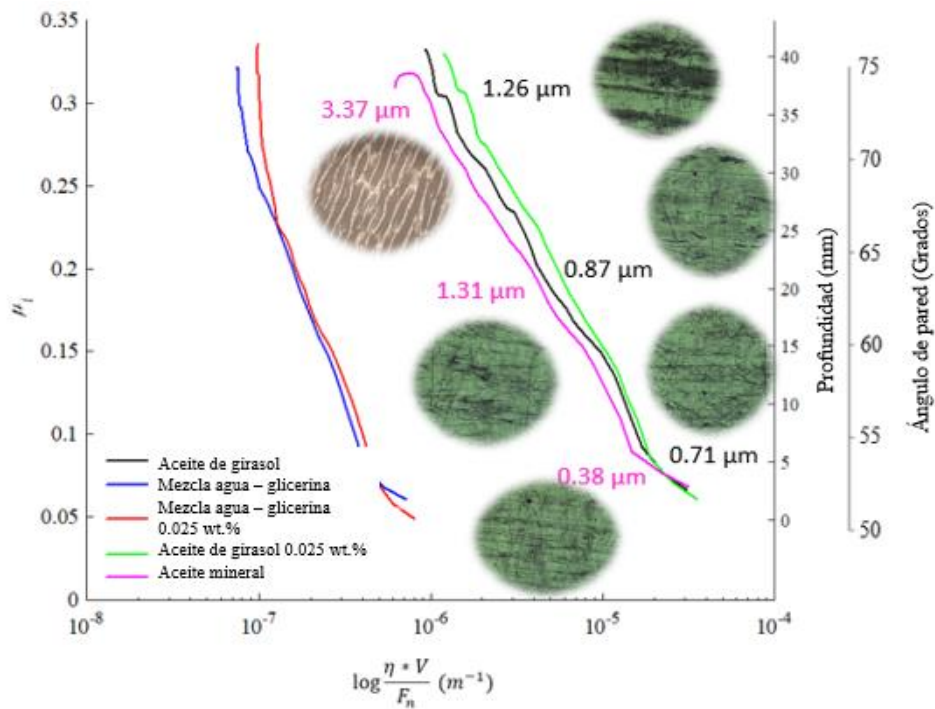


Fig. 52.32 Curva Stribeck – SPIF UHMWPE 2000 RPM

En las gráficas se observan los distintos regímenes de lubricación que se presentan en el proceso SPIF a medida que la herramienta conforma el polímero, al inicio se presenta el régimen de lubricación hidrodinámico en el cual está presente bajas cargas debido al paso incremental además el calor generado no es significativo por lo cual la viscosidad del lubricante no se ve afectada, las superficies están separadas en su totalidad por una película lubricante la cual soporta la carga de deformación que ejerce la herramienta sobre el material, en esta zona se presentan bajos coeficientes de fricción y el desgaste es mínimo, acorde a las gráficas presentadas se nota que el lubricante de aceite de girasol tiene a brindar buenos resultados a bajas cargas siendo comparando con el aceite mineral, sin embargo los lubricantes base agua presentan altas rugosidades, además de que el espesor de la capa lubricantes es mínima por tal razón su zona hidrodinámica es casi imperceptible en comparación a los lubricantes.

A medida que la herramienta avanza en profundidad el segundo régimen de lubricación se presenta, régimen mixto, en el cual la película de lubricación disminuye su espesor permitiendo que las asperezas de las superficies entren en contacto, lo cual provoca que se generen partículas de desgaste lo cual aumenta la rugosidad superficial de los polímeros utilizados, al utilizar la mezcla agua – glicerina se observa que la superficie exhibe una mayor desgaste en comparación al aceite vegetal y mineral ya que su viscosidad es muy baja en comparación a estos lubricantes, en esta zona el lubricante aceite de girasol presenta baja rugosidad superficial ya que la presencia de ácido estérico en su composición química ayuda a disminuir la tasa de desgaste en comparación al aceite mineral y los lubricantes base agua.

Cuando la herramienta se encuentra en el fondo de la geometría propuesta, el lubricante se encuentra en régimen de capa límite debido a las altas cargas que ejerce la herramienta para deformar plásticamente el material, debido a la fricción generada por la herramienta y el polímero la viscosidad del lubricante disminuye lo cual provoca que la película de lubricación sea casi nula, este fenómeno es evidente al utilizar aceite mineral para conformar el polímero UHMWPE a 2000 rpm, ya que el lubricante pierde sus propiedades y la herramienta entre en contacto directo con el material deformando plásticamente la superficie lo cual genera partículas de desgaste y además aumenta la rugosidad superficial de dicha zona, ya que la temperatura alcanza es de 100 °C, hay que acotar que al usar los lubricantes base agua se consigue disminuir la temperatura del proceso pero la rugosidad superficial se incrementa, en esta zona las fuerzas de formabilidad son muy altas, lo cual aumenta el consumo energético, sin embargo al usar aceite de girasol como lubricante se obtiene una rugosidad superficial aceptable, el consumo energético es el menor de todos, finalmente si se quiere obtener un dispositivo que tenga una buena rugosidad superficial y no tenga problemas con su geometría final es aconsejable el uso de aceite de girasol ya que no provoca un ablandamiento como es el caso cuando se usa aceite mineral como medio de lubricación.

4.7. Aplicación caso clínico

Como resultado de las curvas stribeck se obtuvo que el uso del aceite de girasol es beneficioso para ser utilizado como lubricante durante el proceso SPIF, por lo cual una aplicación común dentro del proceso es la fabricación de prótesis.

A continuación, se presenta el proceso para la realización de una prótesis medica por SPIF.

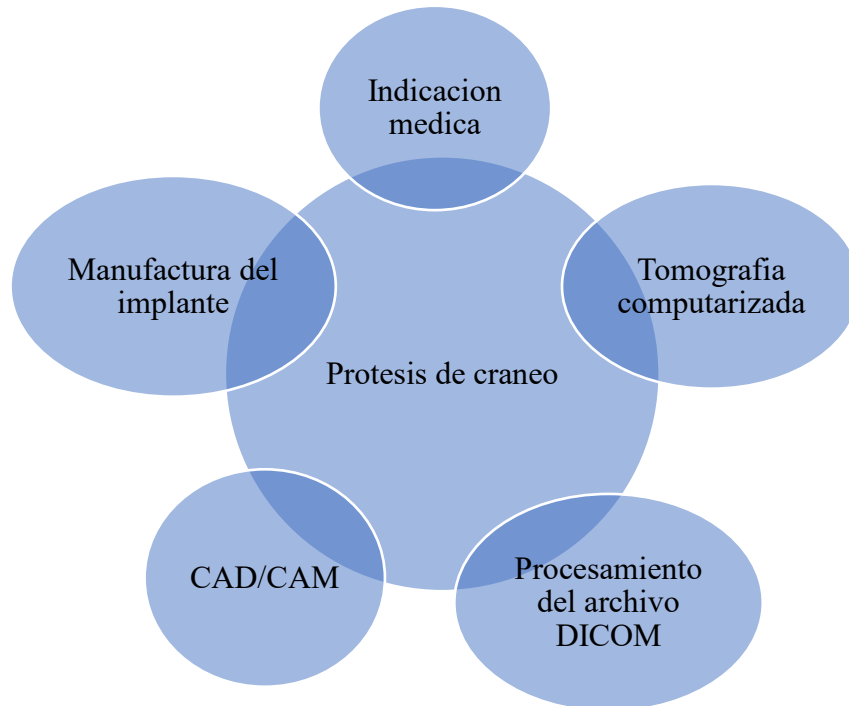


Fig. 53.33 Proceso manufactura de implante

Para la manufactura de la prótesis se consideró los siguientes parámetros:

- Diámetro de herramienta (mm.): 8 mm
- Velocidad de giro del husillo (rpm): 0 rpm
- Paso incremental (mm): 0.25 mm
- Lubricante: Aceite de girasol

Para la generación del modelo virtual se utilizó el software Rhinoceros®, mediante el cual se pudo generar la superficie de la prótesis, el uso del software Solidworks® permite manipular la superficie y generar el modelo completo a manufacturar, el modelo es importado y procesado mediante el software N.X. 10.0 obteniendo el código G para ser usado en el centro de mecanizado KRYLE VMC 535.

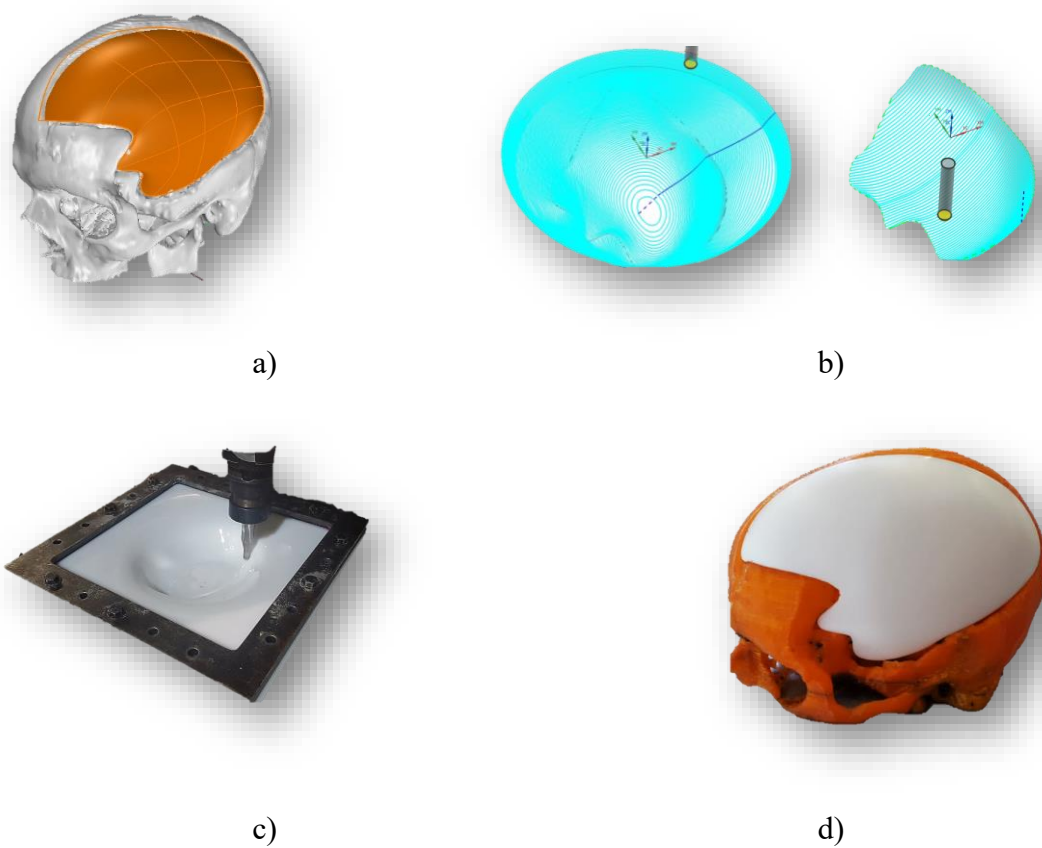


Fig. 54.34 a) modelación del implante, b) estrategia de la trayectoria de la herramienta, c) manufactura de la prótesis por SPIF, d) prótesis craneal

5. Conclusiones

El uso de diferentes lubricantes durante el estudio permitió observar diferentes comportamientos:

Al principio del proceso, el régimen de lubricación hidrodinámico se presenta, sin embargo, aumentando el paso incremental, el régimen cambia a lubricación mixta y capa límite, el paso incremental afecta a los regímenes de lubricación ya que, al incrementar su valor, la fuerza normal aumenta provocando que la película lubricante este sometida a mayores cargas lo cual disminuye su región hidrodinámica.

Los lubricantes de base de agua presentan un régimen de lubricación de capa límite a lo largo del proceso, provocando que las nanopartículas añadidas estén en contacto directo en la interfaz material herramienta, teniendo en cuenta que la dureza de las nanopartículas es mayor que la de los polímeros empleados, las nanopartículas provocarían un desgaste mayor aumentando la rugosidad superficial.

El aceite de girasol y mineral reducen de igual forma los coeficientes de rugosidad durante el proceso en comparación con los otros lubricantes, esto es debido a que el aceite de girasol contiene altas cantidades de ácido estérico, el cual está relacionado con menores coeficientes de fricción y tasas de desgaste.

El lubricante a base de agua disipa el calor más rápido que los otros lubricantes, permitiendo que el material no se ablande debido al efecto de la temperatura.

El uso del aceite mineral como medio lubricante a altas velocidades de giro del husillo causa un aumento en la temperatura de proceso, éste incremento de temperatura (100 °C) disminuye la película de lubricación, lo cual provoca que el lubricante se encuentre en el régimen de lubricación por capa límite permitiendo que el material deforme plásticamente la superficie del material sin lubricante aumentando el desgaste y elevando la rugosidad superficial.

La técnica de EDS permite denotar la presencia de silicio en la superficie del material, lo que permite deducir que el mecanismo de lubricación presentado es la formación de una capa, debido al uso de nanolubricantes.

Al incrementarse la temperatura, se nota una disminución en las fuerzas planares, lo cual tendría un efecto adverso en las dimensiones finales del dispositivo manufacturado.

El uso de un lubricante vegetal como medio lubricante ayuda a disminuir el consumo de aceite mineral, el cual para su fabricación emplea compuestos químicos nocivos para la salud y el medio ambiente, el uso de los lubricantes de base vegetal promueve un a proceso de manufactura más ecológico disminuyendo los residuos generados por el uso de lubricantes base petróleo.

6. Contribuciones

Primer estudio de la lubricación aplicada a los polímeros biocompatibles (HDPE y UHMWPE) utilizando como proceso de manufactura al conformado incremental monopunto.

El uso de lubricantes convencionales (base agua, vegetal y base petróleo) y nanoestructurados a un proceso de manufactura

Aplicación de las curvas Stribeck a un proceso de fabricación real teniendo en cuenta todos los parámetros en el número de Sommerfeld.

Colaboración en el artículo:



Case study

Study of lubrication and wear in single point incremental sheet forming (SPIF) process using vegetable oil nanolubricants



J. Diabb^{a,*}, C.A. Rodríguez^a, N. Mamidi^a, J.A. Sandoval^a, J. Taha-Tijerina^b, O. Martínez-Romero^a, A. Elías-Zúñiga^a

^a Centro de Innovación en Diseño y Tecnología, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, Av. E. Garza Sada 2501 Sur, Monterrey 64849, NL, México
^b Departamento de Ingeniería, Universidad de Monterrey, San Pedro Garza García, México

ARTICLE INFO

Article history:
Received 3 September 2016
Received in revised form
7 January 2017
Accepted 12 January 2017

Keywords:
Lubricated wear including scuffing
Scanning electronic microscope (SEM)
Lubricant additives
Other manufacturing process
Wear test
Non-ferrous metals

ABSTRACT

The aim of the present study focuses on investigating the performance that sunflower and corn oils, added with 0.0125, 0.025, 0.05 and 0.1 wt% of SiO₂ nanoparticles, have when these are used as lubricants during Single Point Incremental Sheet Forming (SPIF) process of 6061 aluminum sheet alloys. In an attempt to explain the differences between friction conditions, the Stribeck curve was used to address the influence that the reinforced lubricants have on the friction and roughness values attained during SPIF process of the aluminum alloy samples. To study the wear effects that the nanoparticles have on the surface samples, the Scanning Electronic Microscope (SEM), Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) techniques were used to observe the surface morphology and chemical composition. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) technique was used to study the interaction of the SiO₂ nanoparticles with vegetable oils. Experimental results showed a significant surface wear reduction when 0.025 wt% of SiO₂ nanoparticles are added into the vegetable oils.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

7. Trabajo futuro

Estudiar la influencia de la funcionalización de las nanopartículas de SiO₂ en el mecanismo de lubricación de los lubricantes propuestos.

Estudiar la influencia de las nanopartículas en el mecanismo de deformación del proceso SPIF

Realizar un análisis de ciclo de vida de los lubricantes utilizados en el proceso SPIF

Realizar un estudio desde el punto de vista de termodinámico y de transferencia de calor aplicado al proceso SPIF empleando distintos medios de lubricación

Modelar el espesor de la película de lubricación durante el proceso SPIF

Realizar un modelo de contacto para el proceso SPIF en cual se tomen en cuenta las propiedades de los materiales en contacto y las variables del proceso

Apéndice

Programa realizado en Matlab® para la obtención de la fuerza tangencial y radial en conformado incremental monopunto

```
% obtencion de los puntos de intervalo

Td = std(diff(tiempo));
Ts = mean(diff(tiempo));
Fs = 1/Ts;
Fn = Fs/2;
Wp = [24 25]/Fn;
Ws = [0.5 26]/Fn;
Rp = 10;
Rs = 30;
[n,Ws] = cheb2ord(Wp,Ws,Rp,Rs);
[z,p,k] = cheby2(n,Rs,Ws);
[sosbp,gbp] = zp2sos(z,p,k);
fuerza_fzfiltrada = filtfilt(sosbp, gbp,fuerza_Fz);
[pospks,poslocs] = findpeaks(fuerza_fzfiltrada, tiempo,
'MinPeakDistance',3.3, 'MinPeakHeight',0.1);
tiempos_positivos = poslocs;
tiempos_negativos(1,1)=0;
tiempos_positivos(1,1)=0;
figure (4)
plot(tiempo,fuerza_fzfiltrada,tiempo,fuerza_Fz)
hold on
plot(tiempos_positivos, pospks, 'vr')
hold off
grid on

tiempo_usado=tiempos_positivos;           %tiempo seleccionado
espacio_intervalos=0.2;                   %tiempo entre contornos obtenido
de la fuerza_Fz
espaciador=espacio_intervalos/2;
%vector de tiempos a la izquierda
tamano_tiempo_usado=size(tiempo_usado);
Tizquierda=zeros(tamano_tiempo_usado(1),1);
for a=1:length(tiempo_usado)
    Tizquierda(a)=tiempo_usado(a)-espaciador;
Tizquierda(1,1)=0;
end
%vector de tiempos a la derecha
Tderecha=zeros(tamano_tiempo_usado(1),1);
for a=1:length(tiempo_usado)
Tderecha(a)=tiempo_usado(a)+espaciador;
Tderecha(1,1)=0.6;                       %se debe cambiar
este tiempo para cada prueba
end
% vector de tiempos
vector_tiempo = [Tderecha Tizquierda];
vector_tiempo = vector_tiempo.';
vector_tiempo(vector_tiempo==0)=[];
vector_tiempo = round(sort(vector_tiempo(:)),2);
vector_tiempo(end)=[];                   %se verifica si
el ultimo tiempo pertenece al vector tiempo
posiciones = dsearchn(tiempo,vector_tiempo);
c2 = vec2mat(posiciones,2);
```

```

ti = c2(:,1);
td = c2(:,2);

%calculo angulo teta
d=size(vector_tiempo);
tiempo_contorno=zeros(d(1)/2,1);
intervalos=d(1)/2;
d1=size(fuerza_Fz);
teta=zeros(d(1),1);
for e=1:1:intervalos
    tiempo_contorno(e)=td(e)-ti(e);

teta(ti(e):td(e),1)=((0:1:tiempo_contorno(e,1))/tiempo_contorno(e,1)
)*2*pi());
end

matriz_de_correccion=ones(d1(1),1);
intervalo=1;
for a1=1:1:length(tiempo)
    if a1>ti(intervalo)-1
        matriz_de_correccion(a1)=-1;
    end
    if a1>td(intervalo)-1
        intervalo=intervalo+1;
        if intervalo==e
            break
        end
    end
end
end
fuerza_Fycorregida=matriz_de_correccion.*fuerza_Fy;
phi=(atan(fuerza_Fy./fuerza_Fx)*-1);
phi(isnan(phi)) = 0 ;
alfa=teta+phi(1:length(teta));
seno=sin(alfa);
coseno=cos(alfa);
Fxy=sqrt(((fuerza_Fx).^2)+((fuerza_Fy).^2));
Fuerza_radial=abs(Fxy(1:length(teta)).*seno);
Fuerza_tangencial=abs(Fxy(1:length(teta)).*coseno);
tiempo2=tiempo(1:length(teta));
fuerza_Fz2=fuerza_Fz(1:length(teta));
figure(5)
axes('LineWidth',0.2,'FontWeight','bold','FontSize',16,'YMinorTick','o
n','YGrid','on','XMinorTick','on','XGrid','on','TickDir','out');
set(gcf,'numbertitle','off','name','Fuerza Z');

p1=plot(tiempo2,fuerza_Fz2,'r','LineWidth',1);
hold on
p2=plot(tiempo2,Fuerza_radial,'b','LineWidth',1);
hold on
p3=plot(tiempo2,Fuerza_tangencial,'g','LineWidth',1);

legend([p1 p2 p3],'Axial force','Radial force','Tangential
force','Location','northwest')
lgd = legend('show');
lgd.FontSize = 9;
lgd.TextColor = 'black';
legend('boxoff')
xlabel('Time (seconds)','FontWeight','bold','FontSize',15);
ylabel('Force (Newtons)','FontWeight','bold','FontSize',15);
title('Forces','FontWeight','bold','FontSize',15);

```

Referencias

- Aerens, R., P. Eyckens, A. Van Bael, and J. R. Duflou. 2010. "Force Prediction for Single Point Incremental Forming Deduced from Experimental and FEM Observations." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46(9–12):969–82.
- Ambrogio, Giuseppina et al. 2017. "Performances Analysis of Titanium Prostheses Manufactured by Superplastic Forming and Incremental Forming." *Procedia Engineering* 183:168–73.
- Anderson, J. C. 1982. "High Density and Ultra-High Molecular Weight Polyethelenes: Their Wear Properties and Bearing Application." *Tribol Intl* 15:43–47.
- Araújo, Rogério et al. 2014. "Single Point Incremental Forming of a Facial Implant." *Prosthetics and Orthotics International* 38(5):369–78. Retrieved (<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309364613502071>).
- Azevedo, Nelson Gil et al. 2015. "Lubrication Aspects during Single Point Incremental Forming for Steel and Aluminum Materials." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16(3):589–95. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1007/s12541-015-0079-0>).
- Baena, Juan Carlos and Zhongxiao Peng. 2017. "Mechanical and Tribological Performance of UHMWPE Influenced by Temperature Change." *Polymer Testing* 62:102–9.
- Bagudanch, I., M. L. Garcia-Romeu, G. Centeno, A. El??as-Z????iga, and J. Ciurana. 2015. "Forming Force and Temperature Effects on Single Point Incremental Forming of Polyvinylchloride." *Journal of Materials Processing Technology* 219:221–29.
- Bagudanch, Isabel et al. 2015. "Manufacturing of Polymeric Biocompatible Cranial Geometry by Single Point Incremental Forming." *Procedia Engineering* 132:267–73. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815044057>).
- Bao, Y. Y., Sun, J. L., & Kong, L. H. 2017. "Tribological Properties and Lubricating Mechanism of SiO₂ Nanoparticles in Water-Based Fluid." *Journal of Physics: Conference Series* 755:11001. Retrieved (<http://stacks.iop.org/1742-6596/755/i=1/a=011001?key=crossref.0cdd0e5ffab2dd74a68d0f9f4f1296b>).
- Berghahn, Walter G. and George F. Murray Jr. 1967. "Method of Dielessly Forming Surfaces of Revolution." Retrieved (<https://www.google.com/patents/US3316745>).
- Bhattacharya, A., K. Maneesh, N. Venkata Reddy, and Jian Cao. 2011. "Formability and Surface Finish Studies in Single Point Incremental Forming." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 133(6):61020. Retrieved (<http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1460638>).
- Blau, P. J. 2001. "The Significance and Use of the Friction Coefficient." *Tribology International* 34(2001):585–91.

- Castelan, Jovani, Lirio Schaeffer, Anderson Daleffe, Daniel Fritzen, Vanessa Salvaro, and Fábio Pinto Da Silva. 2014. "Manufacture of Custom-Made Cranial Implants from DICOM Images Using 3D Printing, CAD/CAM Technology and Incremental Sheet Forming." *Revista Brasileira de Engenharia Biomedica* 30(3):265–73.
- Castelan, Jovani, Lirio Schaeffer, Anderson Daleffe, Daniel Fritzen, Vanessa Salvaro, and Fábio Pinto. 2014. "Manufacture of Custom-Made Cranial Implants from DICOM® Images Using 3D Printing, CAD / CAM Technology and Incremental Sheet Forming." *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica* 30(1996):265–73.
- Cawley, B., D. Adams, and J. Jeswiet. 2013. "Examining Tool Shapes in Single Point Incremental Forming." *Proceedings of NAMRI/SME* 41(April):114–20. Retrieved (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84892776270&partnerID=40&md5=e5a53430e17474f0d9574448fbb335a4>).
- Centeno, G., D. Morales-Palma, et al. 2017. "A Functional Methodology on the Manufacturing of Customized Polymeric Cranial Prostheses from CAT Using SPIF." *Rapid Prototyping Journal* 23(4).
- Centeno, G., I. Bagudanch, et al. 2017. "Recent Approaches for the Manufacturing of Polymeric Cranial Prostheses by Incremental Sheet Forming." *Procedia Engineering* 183:180–87. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.059>).
- Chinnaiyan, Pandivelan and A. K. Jeevanantham. 2014. "Multi-Objective Optimization of Single Point Incremental Sheet Forming of AA5052 Using Taguchi Based Grey Relational Analysis Coupled with Principal Component Analysis." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15(11):2309–16.
- Diabb, J. et al. 2017. "Study of Lubrication and Wear in Single Point Incremental Sheet Forming (SPIF) Process Using Vegetable Oil Nanolubricants." *Wear* 376–377:777–85. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.045>).
- Fahime, B. E. L. 2016. "Tool, Lubricant and Process Parameters Investigation to Form an AA 3003-H12 Sheet by Single Point Incremental Sheet Forming Process." *International Journal of Scientific & Engineering Research* 7(11):950–60.
- Fiorentino, a et al. 2012. "Rapid Prototyping Techniques for Individualized Medical Prosthesis Manufacturing." *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping* 1:589–94.
- Flores, P. et al. 2007. "Model Identification and FE Simulations: Effect of Different Yield Loci and Hardening Laws in Sheet Forming." *International Journal of Plasticity* 23(3):420–49.
- Fratini, L. et al. 2004. "Influence of Mechanical Properties of the Sheet Material on Formability in Single Point Incremental Forming." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53(1):207–10. Retrieved (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607606805>); (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607606805>).
- Guezmil, M., W. Bensalah, and S. Mezlini. 2016. "Effect of Bio-Lubrication on the

- Tribological Behavior of UHMWPE against M30NW Stainless Steel.” *Tribology International* 94:550–59.
- Hamilton, K. and J. Jeswiet. 2010. “Single Point Incremental Forming at High Feed Rates and Rotational Speeds: Surface and Structural Consequences.” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59(1):311–14. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.016>).
- Hsu, Stephen M. 2004. “Nano-Lubrication: Concept and Design.” *Tribology International* 37(7):537–45.
- Hussain, G. et al. 2008. “Tool and Lubrication for Negative Incremental Forming of a Commercially Pure Titanium Sheet.” *Journal of Materials Processing Technology* 203(1–3):193–201.
- Hussain, G. 2014. “Microstructure and Mechanical and Tribological Properties of a Lubricant Coating For Incremental Forming of a Ti Sheet.” *Iranian Journal of Science and Technology* 38:423–29.
- Hussain, G. and K. A. Al-Ghamdi. 2014. “PEO Coating as Lubrication Means for SPIF of Titanium Sheet: Characteristics and Performance.” *Materials Research Innovations* 18(sup2):S2-727-S2-733. Retrieved (<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1432891714Z.000000000504>).
- Hussain, G., H. R. Khan, L. Gao, and N. Hayat. 2013. “Guidelines for Tool-Size Selection for Single-Point Incremental Forming of an Aerospace Alloy.” *Materials and Manufacturing Processes* 28(3):324–29. Retrieved (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2012.700151>).
- Iseki, H., K. Kato, and S. Sakamoto. 1989. “Flexible and Incremental Sheet Metal Forming Using a Spherical Roller.” *Proc. 40th JJCTP* 41:44.
- Jawale, Kishore, José Ferreira Duarte, Ana Reis, and M. B. Silva. 2016. “Lubrication Study for Single Point Incremental Forming of Copper.” *Journal of Physics: Conference Series* 734:32038. Retrieved (<http://stacks.iop.org/1742-6596/734/i=3/a=032038?key=crossref.254f576801fb89249ebec07d0f4b08fa>).
- Jeswiet, J. et al. 2008. “Metal Forming Progress since 2000.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 1(1):2–17.
- Jeswiet, J. and D. Young. 2005. “Forming Limit Diagrams for Single-Point Incremental Forming of Aluminium Sheet.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 219(4):359–64. Retrieved (<http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/095440505X32210>).
- Khan, M. M. A. and N. R. Dhar. 2006. “Performance Evaluation of Minimum Quantity Lubrication by Vegetable Oil in Terms of Cutting Force, Cutting Zone Temperature, Tool Wear, Job Dimension and Surface Finish in Turning AISI-1060 Steel.” *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 7(11):1790–99. Retrieved (<http://link.springer.com/10.1631/jzus.2006.A1790>).
- Kim, Y. .. H. and J. .. J. Park. 2002. “Effect of Process Parameters on Formability in Incremental Forming of Sheet Metal.” *Journal of Materials Processing Technology* 130–131(3):42–46. Retrieved

- (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602007884>).
- Kuram, E., B. Ozcelik, E. Demirbas, and E. Ş. 2010. "Effects of the Cutting Fluid Types and Cutting Parameters on Surface Roughness and Thrust Force." *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 II*.
- Kurtz, Steven M. 2004. "A Primer on UHMWPE." Pp. 1–12 in *The UHMWPE Handbook: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement*. Elsevier. Retrieved November 14, 2017 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124298514500024>).
- Le, V. S., A. Ghiotti, and G. Lucchetta. 2008. "Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials." *International Journal of Material Forming* 1:1179–82.
- Lee, Kwangho et al. 2009. "Understanding the Role of Nanoparticles in Nano-Oil Lubrication." *Tribology Letters* 35(2):127–31.
- Leszak, E. 1967. "Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming." Retrieved (<https://www.google.com/patents/US3342051>).
- Liu, Gang et al. 2004. "Investigation of the Mending Effect and Mechanism of Copper Nano-Particles on a Tribologically Stressed Surface." *Tribology Letters* 17(4):961–66.
- Lu, B. et al. 2014. "Mechanism Investigation of Friction-Related Effects in Single Point Incremental Forming Using a Developed Oblique Roller-Ball Tool." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 85:14–29.
- Marques, Tania A., Maria Beatriz Silva, and P. A. F. Martins. 2012. "On the Potential of Single Point Incremental Forming of Sheet Polymer Parts." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60(1–4):75–86.
- Martins, Bruno et al. 2016. "Biomedical Titanium Alloy Prostheses Manufacturing by Means of Superplastic and Incremental Forming Processes." *Numiform 2016* 80:16010-1-16010–16.
- Martins, P. A. F., N. Bay, M. Skjoedt, and M. B. Silva. 2008. "Theory of Single Point Incremental Forming." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57(1):247–52.
- Martins, P. A. F., L. Kwiatkowski, V. Franzen, A. E. Tekkaya, and M. Kleiner. 2009. "Single Point Incremental Forming of Polymers." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58(1):229–32.
- Matsubara, Shigeo. 1994. "Incremental Backward Bulge Forming of a Sheet Metal with a Hemispherical Head Tool-a Study of a Numerical Control Forming System II." *Journal-Japan Society for Technology of Plasticity* 35:1311.
- McAnulty, Tegan, Jack Jeswiet, and Matthew Doolan. 2017. "Formability in Single Point Incremental Forming: A Comparative Analysis of the State of the Art." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 16:43–54. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.07.003>).
- Mugendiran, V., A. Gnanavelbabu, and R. Ramadoss. 2014. "Parameter Optimization

for Surface Roughness and Wall Thickness on AA5052 Aluminium Alloy by Incremental Forming Using Response Surface Methodology.” *Procedia Engineering* 97:1991–2000.

- Nagendramma, Ponnekanti and Savita Kaul. 2012. “Development of Ecofriendly/biodegradable Lubricants: An Overview.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(1):764–74.
- Namer, Nasri S. M., Marwan T. Mazhir, and Sami A. Naáma. 2015. “Influence of Lubricant Viscosity on the Surface Roughness of PEHD and PVC Plastic Sheets in Single Point Increment Forming Process.” *International Journal of Engineering and Applied Sciences* 7(2):2012–15.
- Patil, Harshwardhan H., Prof D. S. Chavan, and Prof A. T. Pise. 2013. “Tribological Properties Of SiO₂ Nanoparticles Added In SN-500 Base Oil.” 2(5):763–68.
- Peng, D. X., C. H. Chen, Y. Kang, Y. P. Chang, and S. Y. Chang. 2010a. “Size Effects of SiO₂ Nanoparticles as Oil Additives on Tribology of Lubricant.” *Industrial Lubrication and Tribology* 62(2):111–20. Retrieved (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77952616960&partnerID=40&md5=0bb5a1455a9aae71d923b3563efa08f2>).
- Peng, D. X., C. H. Chen, Y. Kang, Y. P. Chang, and S. Y. Chang. 2010b. “Size Effects of SiO₂ Nanoparticles as Oil Additives on Tribology of Lubricant.” *Industrial Lubrication and Tribology* 62(2):111–20. Retrieved (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-77952616960&partnerID=40&md5=0bb5a1455a9aae71d923b3563efa08f2>).
- Peng, D. X., Y. Kang, R. M. Hwang, S. S. Shyr, and Y. P. Chang. 2009. “Tribological Properties of Diamond and SiO₂ Nanoparticles Added in Paraffin.” *Tribology International* 42(6):911–17.
- Petek, Aleš et al. 2008. “The Analysis of Complex Tribological System of Single Point Incremental Sheet Metal Forming - SPIF.” *Journal of Mechanical engineering* 54(4):266–73.
- Potran, Michal and Plavka Skakun. 2014. “Application of Single Point Incremental Forming For Manufacturing of Denture Base.” *Technology of Plasticity* 39(2):10.
- Powell, N. N. and C. Andrew. 1992. “Incremental Forming of Flanged Sheet Metal Components Without Dedicated Dies.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 206(1):41–47. Retrieved (http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/PIME_PROC_1992_206_054_02).
- Sharma, Jagdeep and Balwinder Singh Sidhu. 2014. “Investigation of Effects of Dry and near Dry Machining on AISI D2 Steel Using Vegetable Oil.” *Journal of Cleaner Production* 66:619–23.
- Sia, S. Y., Eman Z. Bassyony, and Ahmed A. D. Sarhan. 2014. “Development of SiO₂ Nanolubrication System to Be Used in Sliding Bearings.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 71(5–8):1277–84.
- Siniawski, M. T., N. Saniei, B. Adhikari, and L. Doezema. 2008. “Influence of Fatty

- Acid Composition on the Tribiological Performance of Two Vegetable-Based Lubricants.” *Journal of Synthetic Lubrication* 25(September):45–55.
- Sornsuwit, Nuttaphong and Sunthorn Sittisakuljaroen. 2014. “The Effect of Lubricants and Material Properties in Surface Roughness and Formability for Single Point Incremental Forming Process.” *Applied Physics and Material Science* 979:359–62.
- Vanhove, Hans, Yannick Carette, Sanne Vancleef, and Joost R. Duflo. 2017. “Production of Thin Shell Clavicle Implants through Single Point Incremental Forming.” *Procedia Engineering* 183:174–79.
- Wang, a, a Essner, V. .. Polineni, C. Stark, and J. .. Dumbleton. 1998. “Lubrication and Wear of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacements.” *Tribology International* 31(1–3):17–33.
- Woydt, Mathias and Rolf Wäsche. 2010. “The History of the Stribeck Curve and Ball Bearing Steels: The Role of Adolf Martens.” *Wear* 268(11–12):1542–46.
- Zhang, Qinglai et al. 2010. “Warm Negative Incremental Forming of Magnesium Alloy AZ31 Sheet: New Lubricating Method.” *Journal of Materials Processing Technology* 210(2):323–29.
- Zhang, S. W. 1998. “State-of-the-Art of Polymer Tribology.” *Tribology International* 31(1–3):49–60.

Curriculum vitae



José Antonio Sandoval Asimbaya nació en Machachi, Ecuador el 3 de noviembre de 1990. En Julio del 2015 se graduó de ingeniero mecánico de la Escuela Politécnica Nacional (Quito - Ecuador), en el 2015 recibió la beca de excelencia académica por parte del Tecnológico de monterrey para estudiar la maestría en ciencias con especialidad en sistemas de manufactura.

Se desempeño como ayudante de cátedra en el laboratorio de análisis de materiales en la Escuela Politécnica Nacional, previo a realizar sus estudios de maestría trabajo como técnico docente politécnico, es una persona honesta, responsable y trabajadora.

Correo: joansaas@hotmail.com