



**Diseño, construcción y validación de una geometría inferior de cilindros concéntricos para el reómetro**

**Discovery HR-2 del Laboratorio de Reología**

Ortiz Rosero, Rodrigo Javier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Castellanos Villa, Santiago David PhD

13 de octubre de 2021



Tesis\_Rodrigo\_Ortiz\_para-Copyleaks.docx

Scanned on: 0:11 March 5, 2022 UTC



STAMP AUTOMATICAMENTE PER:  
SANTIAGO DAVID  
CASTELLANOS  
VILLA



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	65
Words with Minor Changes	14
Paraphrased Words	40
Omitted Words	1



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular, "Diseño, construcción y validación de una geometría inferior de cilindros concéntricos para el reómetro Discovery HR-2 del Laboratorio de Reología" fue realizado por el señor **Ortiz Rosero Rodrigo Javier** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para lo que sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de febrero de 2022

Firma:



---

Ing. Castellanos Villa, Santiago David PhD.

CI: 1716962608



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

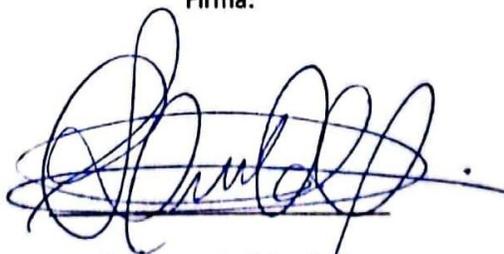
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Ortiz Rosero Rodrigo Javier**, con cédula de identidad N°: 171595063-8, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Diseño, construcción y validación de una geometría inferior de cilindros concéntricos para el reómetro Discovery HR-2 del Laboratorio de Reología”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando debidamente las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de febrero de 2022

Firma:



**Ortiz Rosero Rodrigo Javier**

CI: 171595063-8



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Ortiz Rosero Rodrigo Javier**, con cédula de identidad N°: 171595063-8, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Diseño, construcción y validación de una geometría inferior de cilindros concéntricos para el reómetro Discovery HR-2 del Laboratorio de Reología”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 10 de febrero de 2022

Firma:

**Ortiz Rosero Rodrigo Javier**

CI: 171595063-8

### **Dedicatoria**

El presente trabajo está dedicado a mi hija María Belén que, con sus juegos y risas, llena mis días de una inmensa alegría y ha sido desde el principio, la fuente de motivación para esforzarme y alcanzar mis metas.

### **Agradecimiento**

Quiero agradecer a mis padres, por ser ejemplo de amor y dedicación, además de una constante compañía y apoyo en cada etapa de mi vida. También quiero agradecer a mi tutor Ing. Santiago Castellanos, al Ing. Nicolas Páez y al Ing. Luís Jiménez por todas las guías y el apoyo brindado a mi persona.

## Índice de contenidos

Reporte CopyLeaks .....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de autoría.....	3
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de figuras.....	11
Índice de tablas.....	13
Resumen .....	15
Abstract.....	16
Introducción.....	17
Antecedentes .....	17
Definición del problema.....	17
Área de influencia .....	18
Objetivos del proyecto .....	18
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos.....	18
Justificación e importancia.....	18
Justificación:.....	18
Importancia:.....	19
Alcance del proyecto.....	19
Estado del arte .....	20
Reología .....	20
Tipos de fluidos .....	21
Fluidos dependientes del tiempo .....	23
Tixotropía.....	24
Antitixotropía.....	24
Reometría .....	24

Reómetros .....	25
Partes .....	25
Accesorios .....	27
El efecto de deslizamiento de la pared o Wall slip .....	29
Manufactura de Geometrías .....	33
Geometrías acanaladas .....	33
Otras geometrías especiales .....	36
Manufactura de productos .....	38
Procesos de maquinado y parámetros de corte.....	38
Operaciones afines al torneado .....	40
Proceso de anodizado .....	40
Fabricación de prototipos .....	41
Ingeniería inversa.....	42
Fases de un proceso de ingeniería inversa genérico .....	42
Fase 1. El escaneado de datos.....	43
Fase 2. Procesamiento de puntos.....	43
Fase 3. Desarrollo de modelos geométricos de aplicación.....	44
Ingeniería inversa y el prototipado rápido .....	44
Análisis por ingeniería inversa .....	45
Adquisición de datos .....	45
Proceso de medición .....	46
Desarrollo del modelo CAD .....	48
Detalle de requerimientos .....	48
Análisis de los requerimientos .....	49
Resistencia a la abrasión .....	49
Selección de material (matriz de decisión).....	49
Equipos a emplear en la fabricación .....	54
Fabricación de prototipos .....	58
CAM y código G.....	59
Procedimiento de fabricación .....	59

Hojas de procesos .....	61
Otras consideraciones, observaciones y cambios .....	61
Desarrollo de prototipos .....	63
Análisis de la relación de costos .....	65
Protocolo de pruebas y validación .....	65
Pruebas de calidad .....	65
Ajuste con el equipo.....	65
Funcionalidad.....	66
Pruebas de validación .....	68
Metodología.....	68
Estructura del protocolo de pruebas de validación:.....	70
Ensayo de reversibilidad.....	70
Curva de flujo estacionario.....	71
Ensayo oscilatorio. ....	72
Rampa de temperaturas. ....	73
Parámetros de pruebas .....	74
Postprocesado de los datos .....	77
Descripción de resultados .....	77
Pruebas de ajuste y funcionalidad .....	77
Pruebas de validación .....	78
Ensayos de CFE con Havoline MD-3. ....	79
Ensayos oscilatorios con Havoline MD-3.....	82
Rampa de temperaturas con Havoline MD-3.....	90
Ensayos de CFE con crema Lubriderm.....	91
Ensayos oscilatorios con crema Lubriderm. ....	95
Rampa de temperaturas con crema Lubriderm. ....	102
Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.....	103
Bibliografía.....	104

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Tipos de fluidos</i> .....	21
<b>Figura 2</b> <i>Variación de viscosidad de fluidos no newtonianos</i> .....	22
<b>Figura 3</b> <i>Partes del Reómetro Discovery HR 2 de TA Instruments</i> .....	25
<b>Figura 4</b> <i>Componentes del cabezal del reómetro Discovery HR-2</i> .....	26
<b>Figura 5</b> <i>Plato plano</i> .....	27
<b>Figura 6</b> <i>Plato cónico</i> .....	28
<b>Figura 7</b> <i>Geometría de cilindros concéntricos</i> .....	29
<b>Figura 8</b> <i>Deslizamiento en geometría plato-plato</i> .....	30
<b>Figura 9</b> <i>Efecto del deslizamiento en perfiles de velocidad</i> .....	31
<b>Figura 10</b> <i>Deslizamiento en curvas de flujo</i> .....	32
<b>Figura 11</b> <i>Tipos de geometrías de rotor y copa</i> .....	34
<b>Figura 12</b> <i>Geometrías modificadas</i> .....	36
<b>Figura 13</b> <i>Parámetros de corte</i> .....	38
<b>Figura 14</b> <i>Velocidades de corte</i> .....	39
<b>Figura 15</b> <i>Tipos de escaneo</i> .....	43
<b>Figura 16</b> <i>Proceso genérico de Ingeniería inversa</i> .....	44
<b>Figura 17</b> <i>Modela CAD de la geometría inferior de cilindros concéntricos</i> .....	48
<b>Figura 18</b> <i>Costos de maquinado</i> .....	50
<b>Figura 19</b> <i>Materia prima empleada</i> .....	53

<b>Figura 20</b> Centro de mecanizado Fadal .....	57
<b>Figura 21</b> Proceso de obtención del código G .....	59
<b>Figura 22</b> Diagrama de flujo de fabricación .....	60
<b>Figura 23</b> Sujeción de copa .....	61
<b>Figura 24</b> Elemento de sujeción para tapa .....	62
<b>Figura 25</b> Prototipos fabricados .....	64
<b>Figura 26</b> Prueba de ajuste con el equipo .....	66
<b>Figura 27</b> Ubicación de O-ring .....	67
<b>Figura 28</b> Superficie de la copa .....	68
<b>Figura 29</b> Geometría superior - rotor .....	69
<b>Figura 30</b> Ejemplo de ensayo de reversibilidad .....	70
<b>Figura 31</b> Ejemplo de ensayo de CFE .....	71
<b>Figura 32</b> Ejemplo de ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia .....	72
<b>Figura 33</b> Ejemplo de ensayo oscilatorio con barrido de amplitud .....	73
<b>Figura 34</b> Rampa de temperaturas .....	74
<b>Figura 35</b> Fluido de estudio – aceite de transmisión .....	75
<b>Figura 36</b> Ensayo de CFE con Havoline MD-3 a 20°C .....	79
<b>Figura 37</b> Ensayo de CFE con Havoline MD-3 a 40°C .....	80
<b>Figura 38</b> Ensayo de CFE con Havoline MD-3 a 100°C .....	81
<b>Figura 39</b> Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia con Havoline MD-3 a 20°C .....	82

<b>Figura 40</b> Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia con Havoline MD-3 a 40°C.....	83
<b>Figura 41</b> Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia con Havoline MD-3 a 100°C .....	84
<b>Figura 42</b> Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud con Havoline MD-3 a 20°C.....	86
<b>Figura 43</b> Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud con Havoline MD-3 a 40°C.....	87
<b>Figura 44</b> Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud con Havoline MD-3 a 100°C.....	88
<b>Figura 45</b> Rampa de temperaturas con Havoline MD-3 .....	90
<b>Figura 46</b> Ensayo de CFE con crema a 10°C.....	91
<b>Figura 47</b> Ensayo de CFE con crema a 20°C.....	92
<b>Figura 48</b> Ensayo de CFE con crema a 40°C.....	93
<b>Figura 49</b> Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia (crema a 10°C) .....	95
<b>Figura 50</b> Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia (crema a 20°C) .....	96
<b>Figura 51</b> Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia (crema a 40°C) .....	96
<b>Figura 52</b> Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud (crema a 10°C).....	98
<b>Figura 53</b> Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud (crema a 20°C).....	99
<b>Figura 54</b> Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud (crema a 40°C).....	100
<b>Figura 55</b> Rampa de temperaturas (crema) .....	102

### Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Datos de rugosidad en geometrías .....	34
<b>Tabla 2</b> Instrumentos empleados para proceso de medición .....	46

<b>Tabla 3</b> Tabla de ponderación .....	51
<b>Tabla 4</b> Priorización de criterios .....	52
<b>Tabla 5</b> Matriz de decisión .....	52
<b>Tabla 6</b> Características físicas del material.....	54
<b>Tabla 7</b> Especificaciones técnicas del torno VIWA VTC 1640 .....	54
<b>Tabla 8</b> Herramientas de corte empleadas en torneado.....	55
<b>Tabla 9</b> Herramientas de corte empleadas en fresado .....	58
<b>Tabla 10</b> Simbología del diagrama de fabricación.....	59
<b>Tabla 11</b> Descripción de prototipos fabricados.....	63
<b>Tabla 12</b> Copas a emplear para ensayos de validación .....	75
<b>Tabla 13</b> Componentes de los ensayos de validación .....	76
<b>Tabla 14</b> Resultados de pruebas .....	78
<b>Tabla 15</b> Error de ensayos de CFE (MD-3).....	81
<b>Tabla 16</b> Error de ensayos oscilatorios con barrido de frecuencia (MD-3).....	85
<b>Tabla 17</b> Error de ensayos oscilatorios con barrido de amplitud (MD-3) .....	89
<b>Tabla 18</b> Error de ensayo CFE (crema) .....	94
<b>Tabla 19</b> Error ensayos oscilatorio con barrido de frecuencia (crema) .....	97
<b>Tabla 20</b> Error ensayos oscilatorio con barrido de amplitud (crema) .....	101

## Resumen

El presente trabajo busca desarrollar una geometría inferior de cilindros concéntricos mediante un proceso de ingeniería inversa. Dicha geometría es parte del reómetro Discovery HR-2, que se encuentra en Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, y es un accesorio empleado para contener muestras de baja viscosidad. Se validará la geometría fabricada mediante la aplicación de pruebas, en las cuales se compararán los resultados obtenidos por geometrías originales y se determinarán las funciones de error en cada caso.

Para el proceso de fabricación se desarrollará dos prototipos previos al prototipo final, el cual será cometido a las pruebas de validación, donde se empleará un fluido newtoniano y un fluido no newtoniano, estos fluidos serán ensayados a tres diferentes temperaturas y en tres geometrías: una geometría patrón sin ningún desgaste, una geometría con desgaste y la geometría que ha sido fabricada.

Se espera que, la geometría inferior de cilindros concéntricos obtenida, permita reemplazar a la geometría original que se encuentra con un desgaste apreciable en sus paredes internas. A la vez que se evaluará si realmente existe una afectación en las mediciones producto de este desgaste superficial.

### Palabras clave:

- **INGENIERIA INVERSA**
- **PROTOTIPOS**
- **REOLOGÍA**
- **FLUIDO NO NEWTONIANO**

### **Abstract**

The present work aims to develop a lower geometry of concentric cylinders through a reverse engineering process. This geometry is part of the Discovery HR-2 rheometer, which is located in the Rheology Laboratory of the University of the Armed Forces - ESPE, and is an accessory used to contain low-viscosity samples. The manufactured geometry will be validated through the application of tests, in which the results obtained by original geometries will be compared and the error functions will be determined for each case.

For the manufacturing process, two prototypes will be developed previous the final prototype, which will be committed to validation tests, here a Newtonian fluid and a non-Newtonian fluid will be used, these fluids will be tested at three different temperatures and in three geometries: one pattern geometry without any wear, a geometry with wear and the geometry that has been manufactured.

It is expected that, the lower geometry of concentric cylinders obtained, replace the original geometry, which has an appreciable wear on its internal walls. At the same time, it will be evaluated if there really is an affectation in the measurements as a result of this superficial wear.

#### **Keywords:**

- **REVERSE ENGINEERING**
- **PROTOTYPES**
- **RHEOLOGY**
- **NON-NEWTONIAN FLUID**

## Introducción

### Antecedentes

El Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE cuenta en la actualidad con un reómetro Discovery HR-2, fabricado por TA Instruments, el cual es empleado para el desarrollo de diferentes ensayos con fluidos.

Al necesitar cubrir una amplia gama de fluidos de estudio, el reómetro cuenta con varios accesorios que facilitan esta tarea, para el caso específico de fluidos cuya viscosidad es muy baja, es necesario emplear un accesorio conocido como geometría de cilindros concéntricos, la cual permite ensayar este tipo de fluidos.

Dicha geometría consta de dos partes: una copa o geometría inferior y un rotor o geometría superior. El rotor es el encargado de aplicar un esfuerzo de corte al fluido, mientras la geometría inferior contiene la muestra.

### Definición del problema

Debido al uso de sustancias cementantes, la geometría inferior presenta un desgaste apreciable en sus paredes internas, las cuales están en contacto directo con fluidos que son objeto de estudio y se desconoce si esto puede ser un factor que influya sobre los datos obtenidos al emplear este accesorio. Es por esta razón que se requiere reemplazar esta geometría. Sin embargo, el costo que supondría la adquisición de una nueva geometría inferior de TA Instruments representa una inversión importante para la institución.

### **Área de influencia**

El área de influencia directa del presente proyecto es el laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, donde se validará y empleará la geometría inferior de cilindros concéntricos para ensayos realizados con el reómetro Discovery HR-2.

### **Objetivos del proyecto**

#### ***Objetivo general***

Diseñar, construir y validar una geometría inferior de cilindros concéntricos para el Reómetro Discovery HR-2 del Laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

#### ***Objetivos específicos***

- Realizar un proceso de ingeniería inversa de la geometría de cilindros concéntricos del Reómetro HR-2.
- Establecer un material apropiado para la fabricación y posterior uso de la geometría, el cual brinde prestaciones similares al material de la geometría original.
- Efectuar la fabricación de la geometría inferior de cilindros concéntricos siguiendo los requerimientos establecidos.
- Validar la geometría inferior de cilindros concéntricos mediante la implementación de un protocolo de pruebas.

### **Justificación e importancia**

#### ***Justificación:***

Este trabajo permitiría a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE reducir el costo que supone adquirir una geometría inferior de cilindros concéntricos, aprovechando la capacidad

operacional del Laboratorio de Manufactura de la institución. Dicha geometría es un accesorio fabricado por TA Instruments para el reómetro Discovery HR-2, el cual es empleado en el Laboratorio de Reología y es usada para contener muestras de baja viscosidad.

La pieza con la que cuenta actualmente el Laboratorio de Reología presenta desgaste en sus paredes internas, por esta razón, el presente proyecto también permitiría establecer si el estado actual de esta geometría es un factor que influya en los resultados arrojados al emplearse para ensayos en el reómetro.

***Importancia:***

El laboratorio de Reología realiza ensayos con diferentes sustancias como cementos, asfaltos, aceites, petróleo y otros fluidos no newtonianos en general. Para ello, entre sus recursos, cuenta con un equipo de reometría, el reómetro Discovery HR-2, donde se emplean geometrías de cilindros concéntricos, como la que se busca fabricar, en estos ensayos, una pieza que presente desgaste podría dar lugar a alteraciones en los resultados o en el correcto funcionamiento del equipo.

Debido a esto es importante contar con una nueva geometría, la cual se encuentre en óptimas condiciones y permita la correcta ejecución de los ensayos desarrollados por el personal de este laboratorio.

**Alcance del proyecto**

Al finalizar el presente proyecto se presentará una geometría inferior de cilindros concéntricos, la cual está conformada con por una copa y una tapa, dicha geometría cumplirá con los siguientes requerimientos:

- Presentar resistencia a la abrasión

- Tolerancias adecuadas para un correcto acople con el equipo
- Material asequible y económico

Se desarrollará un proceso de fabricación claro y detallado que permita, de ser requerido, la fabricación de nuevas piezas del mismo tipo.

Además, se realizarán pruebas de validación que aseguren el correcto acople y funcionamiento de la geometría fabricada con el reómetro Discovery HR-2, con el respectivo análisis de los resultados obtenidos en dichas pruebas. Estas pruebas serán estudiadas mediante comparación con resultados obtenidos con otras geometrías, bajo las mismas condiciones de prueba.

### **Estado del arte**

#### **Reología**

La reología es el estudio del flujo y deformación de la materia, así lo definía Eugene Bingham, quien introdujo el término 1929, el alcance de la reología va más allá del estudio de líquidos, también se dedica a analizar ciertos sólidos en condiciones bajo las cuales fluyen más de lo que se deforman elásticamente, dentro de las cuales se consideran materiales con estructuras complejas. (Barnes, Hutton, & Walters, An Introduction to Rheology, 1989)

El término Reología fue aceptado desde 1929, mismo año en el que se fundó la Sociedad Americana de Reología. Hoy en día la reología abarca varios campos de la ingeniería.

Comúnmente, se considera el comportamiento elástico según la Ley de Hooke y el comportamiento viscoso según la Ley de Newton, en dichas leyes suponen una relación lineal entre esfuerzo y deformación. Sin embargo, el rango de esfuerzo bajo el cual muchos materiales tienen un comportamiento lineal es muy pequeño, así, ciertas propiedades tales como el módulo

de rigidez o la viscosidad pueden variar según el esfuerzo aplicado, el cual no tiene por qué ser muy elevado. (Barnes, Hutton, & Walters, An Introduction to Rheology, 1989)

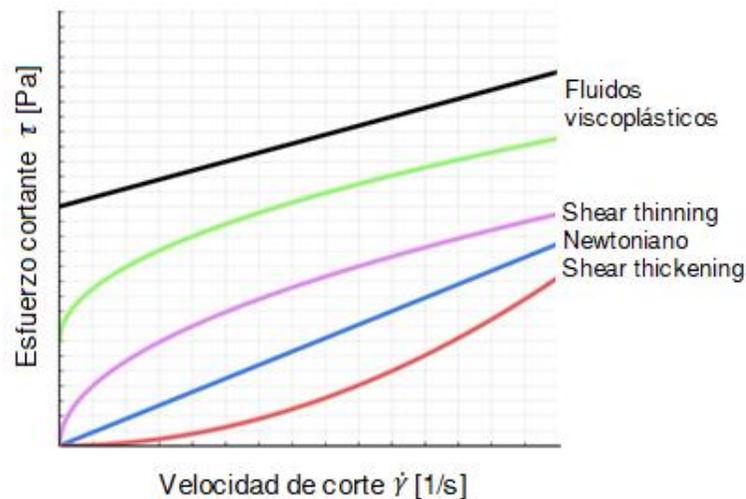
De esta manera surge el concepto de fluido no newtoniano, como aquellos fluidos que no cumplen con la relación lineal establecida por Newton.

### ***Tipos de fluidos***

Se puede definir a un fluido como una sustancia que se encuentra en constante deformación al aplicársele el mínimo esfuerzo. Las propiedades reológicas de un fluido se determinan bajo la relación existente entre un estímulo externo y la respuesta que se tiene por parte del fluido, esto puede verse representado mediante una curva de flujo. (Diaz, 2018) como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1**

*Tipos de fluidos*



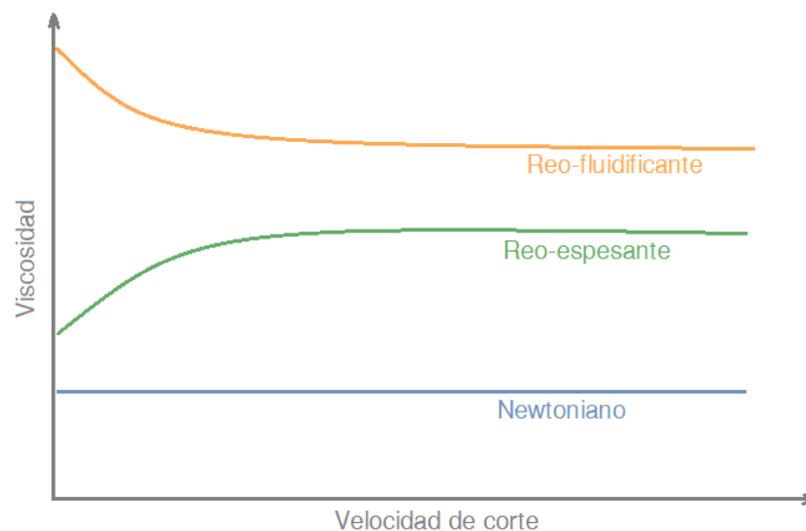
Nota: Con la ayuda de la curva de flujo estacionario podemos distinguir cinco tipos de fluidos diferentes.

Un ejemplo cotidiano de esto es la pasta dental, la cual bajo la acción de un esfuerzo fluye con facilidad del recipiente, mientras que al estar sobre el cepillo de dientes está permanente estático y no fluye debido al aumento de su viscosidad por la reducción de la tasa de esfuerzo cortante. A fluidos con este tipo de comportamientos se los llama reo-fluidificante (shear-thinning) y es un ejemplo de la relación no lineal entre la viscosidad y la tasa de corte, donde la viscosidad se reduce al incrementarse la tasa de esfuerzo cortante.

En la siguiente figura se puede apreciar la variación de viscosidad

### **Figura 2**

*Variación de viscosidad de fluidos no newtonianos*



Nota: Representación de la relación entre viscosidad y velocidad de corte para fluidos newtonianos y no newtonianos. Adaptado de: (Ancy, 2005)

Como puede apreciarse en la Figura 2 un comportamiento opuesto al reo-fluidificante es el reo-espesante o shear-thickening, en el cual se aprecia un aumento en la viscosidad del fluido cuando se incrementa la tasa de corte aplicada. Estos dos comportamientos corresponden a fluidos no newtonianos. (Morrison, 2001)

Existen también fluidos que poseen un esfuerzo de fluencia bajo el cual no fluyen, es decir se comportan como un sólido, estos son conocidos como fluidos visco-plásticos. En la industria alimenticia se puede encontrar varios ejemplos como: pure de papa, mantequilla, emulsiones, mayonesa, entre otros. (Diaz, 2018)

Los fluidos visco-plásticos pueden describirse matemáticamente mediante el modelo de Bingham (1) el cual consiste en una ecuación de primer grado, donde el termino independiente es mayor a cero, lo que representa un esfuerzo umbral, luego del cual la sustancia empieza a fluir.

$$\tau = \tau_o + \eta_p \dot{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

$\tau_o$ : Esfuerzo umbral o de fluencia

$\eta_p$ : Viscosidad plástica

El modelo de Bingham modificado (2), se emplea para el caso de fluidos plásticos, también llamados plásticos ideales. Este modelo se representa con una ecuación de segundo grado y, al igual que el anterior modelo, el termino independiente es mayor que cero.

$$\tau = \tau_o + \eta_p \dot{\gamma} + c \dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

Donde:

$\tau_o$ : Esfuerzo umbral o de fluencia

$\eta_p$ : Viscosidad plástica

$c$ : constante que describe comportamiento (reo-fluidificante o reo-espesante)

### ***Fluidos dependientes del tiempo***

**Tixotropía.** Hay fluidos que, a una velocidad de cizalla constante, presentan variaciones de viscosidad las cuales son dependientes del tiempo. Aquí es donde se introduce el término tixotropía. Según Mewis, Norman y Wagner (2009) la tixotropía es un decremento constante en la viscosidad en el tiempo, al aplicarse un flujo a una muestra que inicialmente se encontraba en reposo, y la subsecuente recuperación de la viscosidad cuando el flujo se ha detenido, es decir, es reversible.

Un experimento que permite estudiar la tixotropía de un fluido es el ensayo de salto de escalón, el cual puede realizarse de forma ascendente, donde la velocidad de cizalla aumenta de manera gradual, o de forma descendente, en el que la velocidad de cizalla se reduce gradualmente.

**Antitixotropía.** Fluidos con un comportamiento opuesto se conocen como antitixotropicos, en este la viscosidad del fluido sufre un incremento con el tiempo, al aplicarse una velocidad de corte constante y de igual manera el fluido recuperará su viscosidad inicial luego de un tiempo de reposo.

## **Reometría**

Para resolver problemas de flujo es necesario considerar tres ecuaciones: la conservación de la cantidad de movimiento, la conservación de la masa y la ecuación constitutiva, que refleja como la relación entre el esfuerzo y la deformación. Esta última es propia de cada material y en la práctica, la única manera de determinar si es apropiada es realizando mediciones y comparándolas con los resultados que arroja el modelo matemático. (Morrison, 2001)

Al proceso de realizar estas mediciones de propiedades reológicas a un material se le conoce con el nombre de Reometría.

## Reómetros

El reómetro es un instrumento de precisión, empleado en laboratorios, el cual contiene el material de interés en una determinada configuración geométrica. El reómetro controla el medio alrededor de la muestra, y mide o aplica amplios rangos de esfuerzo, deformación y velocidad de deformación. (TA Instruments, 2021)

Estos equipos son empleados para realizar mediciones reológicas en fluidos, ya que son capaces de controlar y medir una mayor cantidad de parámetros que un viscosímetro, otro instrumento más simple empleado para determinar viscosidades.

## Partes

El reómetro Discovery HR-2 fabricado por TA Instruments está conformado por ocho partes como se señala en la Figura 1. Las cuales son: 1. Varilla de ajuste 2. Cabezal 3. Conexión de refrigerante 4. Base 5. Pantalla 6. Chaqueta peltier 7. Conexión de alimentación/señal Smart Swap 8. Panel frontal.

## Figura 3

*Partes del Reómetro Discovery HR 2 de TA Instruments*



Nota: Reómetro con el que cuenta el laboratorio de Reología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Dentro del cabezal de este reómetro se encuentran varios componentes importantes que permiten el control y medición de variables. Según (TA Instruments, 2021) en su sitio web se destacan los elementos numerados en la Figura 4:

#### Figura 4

*Componentes del cabezal del reómetro Discovery HR-2*



Nota: Adaptado de (TA Instruments, 2021)

1. Control activo de temperatura (ATC), un sistema inalámbrico para la medición de temperatura en el plato superior, lo que posibilita el control, en tiempo real, de las temperaturas en el plato inferior y superior. Los beneficios que supone sistema son:
  - Capacidad de implementar una rampa de temperatura real
  - Respuesta más rápida
  - Se eliminan procedimientos de calibración adicionales

2. Un transductor de reequilibrio de fuerza normal, para mediciones de alta precisión de hasta 50 newtons.
3. El cojinete de empuje magnético, el cual es responsable en gran medida de la calidad de los datos obtenidos en un ensayo, ya que este requiere de la ausencia de fricción y una buena estabilidad, rigidez y tolerancia a contaminantes.
4. Motor de copa de arrastre, ofrece un torque estable y variaciones mínimas, mantiene la temperatura e inercia, además es un elemento que permite una suave aceleración y rápida respuesta. Lo que permitirá obtener una alta reproducibilidad de datos.
5. Sensor de posición verdadera (TPS), un dispositivo de alta resolución que permite realizar mediciones lineales eliminando errores producidos por expansión térmica en tiempo real.

### ***Accesorios***

Para contener las muestras, en los reómetros, se emplean aditamentos de diferentes geometrías. Algunas de las configuraciones geométricas más comunes, que se emplean en estos equipos son: (TA Instruments, 2021):

- Geometría de plato-plato: Como muestra la Figura 5, está compuesto de dos piezas circulares, sin ángulo de inclinación en sus superficies respecto del eje horizontal. En medio de estas dos se encuentra el fluido a analizar.

### **Figura 5**

*Plato plano*



Nota: Geometría de TA Instruments presente en el laboratorio de Reología.

- Geometría cono-plato: Esta configuración presenta una geometría superior con un ángulo de inclinación en su superficie, el cual puede ser de diferentes medidas, comúnmente entre 0.5 y 4 grados. En la Figura 6 puede verse una geometría de este tipo.

El cambio en el diámetro o en el ángulo de inclinación, para la geometría de cono, supone una variación del rango medible de tensión y deformación o velocidad de corte, con esto se consigue analizar propiedades del material en un rango más amplio.

## Figura 6

### Plato cónico



Nota: Geometría de TA Instruments presente en el laboratorio de Reología.

- Geometría de cilindros concéntricos: Está conformada por un rotor superior y una geometría cilíndrica inferior o copa, la cual va a contener el fluido. Tal como se muestra en la figura 7. Estos son usados en conjunto con una chaqueta con peltier, donde se ingresa la copa y controlar la temperatura del fluido de estudio en un rango entre los  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta los  $150^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 7**

*Geometría de cilindros concéntricos*



Nota: Conjunto de copa de acero y rotor..

En el presente trabajo, la atención se centra únicamente en el desarrollo de una geometría inferior de cilindros concéntricos, la cual, según TA Instruments (2021) se fabrican en materiales como acero inoxidable o aluminio anodizado.

Con la finalidad de poder cubrir la amplia gama de fluidos que pueden ser de interés para un estudio reológico o según necesidades propias de un ensayo, en varios trabajos se manufacturan y modifican las geometrías de cilindros concéntricos, sobre todo las superficies que se encuentran en contacto con los fluidos, donde la rugosidad es de interés.

### **El efecto de deslizamiento de la pared o Wall slip**

Al realizar la medición de propiedades reológicas se parte de tres condiciones ideales:

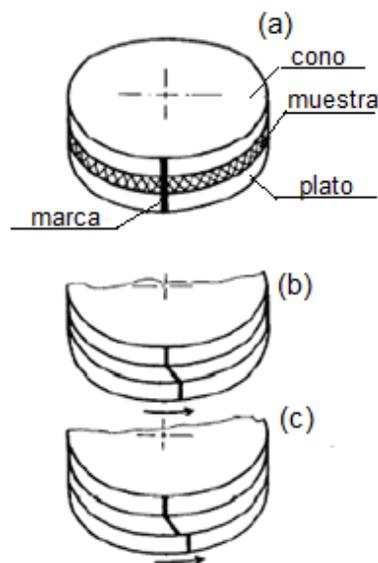
- Condiciones de frontera sin deslizamiento
- Perfil de velocidad homogéneo durante el corte
- Relajación al cesar el corte sin que surja movimientos macroscópicos.

Estas tres condiciones respecto del estado de deformación, por definición son válidas para mediciones viscoelásticas lineales y han sido el punto de partida para la mayoría de los estudios reométricos en la literatura. (Wang, Ravindranath, & Boukany, 2011)

Sin embargo, para la reometría, pueden surgir perturbaciones o problemas experimentales relacionados con el tipo de reómetro que se emplea para las mediciones. Así, por ejemplo, al usar un viscosímetro rotacional que emplea una superficie de cizallamiento metálica lisa, se puede producir un efecto llamado Wall slip o deslizamiento de la pared, del cual se puede apreciar una representación en la Figura 8. (Ancey, 2005)

### Figura 8

*Deslizamiento en geometría plato-plato.*



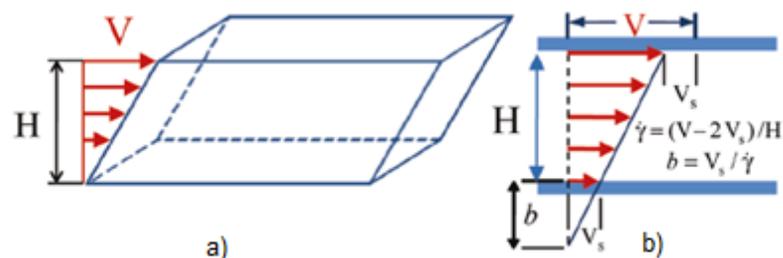
Nota: a) Marcas alineadas antes de aplicar el corte b) Ensayo normal c) Ensayo con deslizamiento en la pared. Tomado de (Ancey, 2005)

Una fuente importante de problemas, como el deslizamiento de la pared, proviene de la propia presencia de la pared junto a un fluido con partículas en suspensión. (Barnes, A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers Its cause, character, and cure, 1995)

Una pared modifica la distribución de las partículas en el fluido, este fenómeno es conocido como agotamiento de partículas (particle depletion) e implica una disminución en la concentración de partículas en la zona próxima a la pared, lo cual conduce a la generación de una capa constituida en mayor porcentaje por fluido, el cual actúa como un lubricante en el límite entre la pared y la masa en deslizamiento. (Ancey, 2005)

**Figura 9**

*Efecto del deslizamiento en perfiles de velocidad*



Nota: a) Perfil de velocidades normal con corte homogéneo. b) Deslizamiento de la pared modifica el perfil de velocidad, que presenta una velocidad menor a la velocidad de la superficie superior, mientras en la superficie inferior se tiene una  $V_s > 0$ . El deslizamiento puede ser cuantificado mediante la extrapolación de  $b$ . Tomado de: (Wang, Ravindranath, & Boukany, 2011)

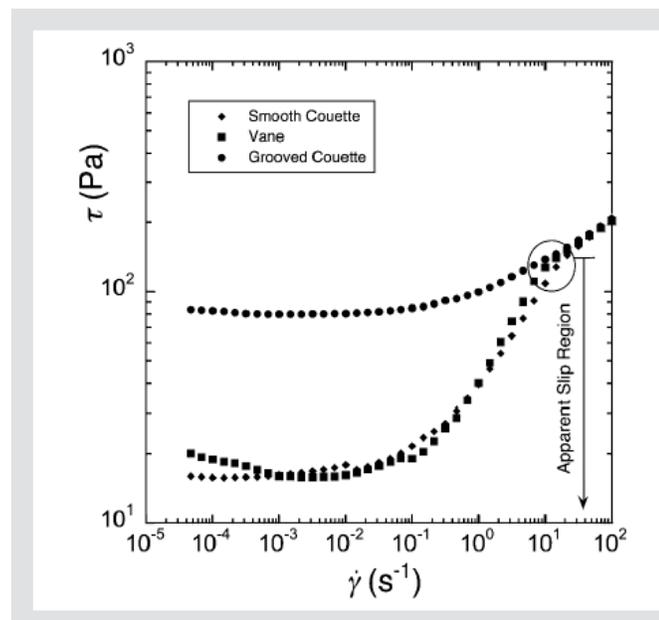
El deslizamiento de la pared puede tener efectos significativos en las mediciones reométricas, por ejemplo:

- Subvaloración de la viscosidad de la muestra.
- Evaluación inadecuada del límite elástico de un material viscoplástico.

Un efecto de deslizamiento puede apreciarse en la siguiente figura:

**Figura 10**

*Deslizamiento en curvas de flujo*



Nota: Comparación de curvas de flujo con geometrías lisas, de vanos y ranuradas, en una dispersión de Carbopol al 0.17%, donde se aprecia el efecto de Wall slip en las geometrías lisas y de vanos. Tomado de: (Marchesini, Naccache, Abdu, Aliche, & Mendes, 2019)

Algunas soluciones comunes para este fenómeno, tanto en la industria como en el ámbito investigativo son (Ancy, 2005):

- Medir directamente la velocidad a la que se da el deslizamiento y luego calcular mediante software una tasa de corte efectiva.
- Los propios proveedores de reómetros proporcionan geometrías ranuradas o corrugadas de maneras específicas.
- También se puede usar un proceso con chorro de arena (sandblasting) con un grano grueso para raspar la superficie metálica.
- Pegar un papel de lija a la superficie también es una práctica común para evitar este fenómeno.
- Si se tienen interacciones químicas o físicas (fuerzas de Van der Waals) entre los componentes del fluido y las paredes, se debe utilizar un tratamiento superficial específico.

### **Manufactura de Geometrías**

Existen geometrías en las que se han modificado el rotor o de la copa, dentro de estos tenemos: rotores de paletas o también llamado rotor de vanos, rotores helicoidales, así como copas ranuradas y copas de gran diámetro. Estas geometrías especiales de cilindros concéntricos permiten caracterizar dispersiones con una estabilidad limitada o también resultan útiles para materiales con partículas más grandes, además evitan errores de medición por deslizamiento en la pared. (Meeker, Bonnecaze, & Cloitre, 2004)

### ***Geometrías acanaladas***

Estas geometrías comúnmente son empleadas para evitar alteraciones en las mediciones producidas por el efecto de Wall slip o deslizamiento en la pared, hay varios estudios que justifican el uso de estas geometrías para estudios reológicos, por ejemplo:

Según Marchesini, Naccache, Abdu, Alicke, & Mendes (2019) la geometría de cilindros concéntricos acanalada, en comparación con una geometría lisa o una geometría de vanos con copa lisa, mostradas en la Figura 11, presenta un mejor desempeño al realizar mediciones reológicas, ya que elimina exitosamente el efecto de deslizamiento aparente en la superficie cilíndrica externa.

**Figura 11**

*Tipos de geometrías de rotor y copa*



Nota: Juegos de copa y rotor lisos (izquierda), un rotor de vanos (centro) y geometrías acanaladas (derecha). Tomado de: (Marchesini, Naccache, Abdu, Alicke, & Mendes, 2019)

De igual forma Chen, y otros, (2015) realizan una caracterización reológica de espumas de perforación poliméricas, donde emplea un viscosímetro con dos ensambles del tipo copa-rotor modificando sus superficies para añadirles mayor rugosidad, siendo la configuración número 1 menos rugosa que la configuración número 2. La siguiente tabla muestra las rugosidades de estas

**Tabla 1**

*Datos de rugosidad en geometrías*

		Rugosidad promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar de la rugosidad [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Ensamble copa-rotor lisa</b>	Copa	3.1	3.7
	Rotor	2.0	2.4
<b>Ensamble 1 copa-rotor menos rugosa</b>	Copa	13.0	15.6
	Rotor	38.0	45.5
<b>Ensamble 2 copa-rotor más rugosa</b>	Copa	21.0	15.6
	Rotor	44,0	50.0

Nota: Valores de rugosidad presentes en la superficie de rotores y copas empleadas en la caracterización reológica de espumas poliméricas de perforación. Adaptado de (Chen, y otros, 2015)

Los resultados obtenidos de esta investigación mostraron que las propiedades reológicas medidas con un ensamble tipo copa-rotor de superficie lisa resultan alteradas, siendo el factor de consistencia del fluido (K) más bajos y el índice de comportamiento del fluido (n) más alto.

Además, señala que la configuración #2 es más efectiva que la configuración #1 reduciendo estas alteraciones en los datos, esto debido a su mayor rugosidad, la cual permite contener una mayor cantidad de líquido, evitando que se produzca un deslizamiento en la pared de la copa.

Por otro lado, de acuerdo con (Shamua & Håkansson, 2019), el emplear una geometría acanalada para mediciones reológicas de pastas de cemento no evitó la presencia de deslizamientos en la superficie, por lo que sugiere que fluidos complejos como las pastas de cemento podrían requerir geometrías especiales, como el rotor de vanos o posiblemente canales

que presenten una rugosidad adecuada al tamaño de partícula, con el fin de reducir estos efectos de deslizamiento.

### ***Otras geometrías especiales***

Como lo demostró Pandey, Linga, & Sangwai (2016) en su estudio, las geometrías de cilindros concéntricos convencionales, no resultan adecuadas para realizar estudios reológicos de sistemas multifásicos a alta presión, como los hidratos de gas. Debido a la necesidad de estudiar la formación y disociación del hidrato de metano, formado a partir de sistemas de agua pura y agua-decano, se desarrolló una geometría de cilindros concéntricos modificada que permitiera este análisis.

El problema se debía a que no se lograba medir las propiedades reológicas durante la formación de hidratos, debido a que no se producían hidratos in situ, al emplear la geometría convencional de cilindros concéntricos. Con modificaciones de la geometría, como se ve en la Figura 12, se pudo formar el hidrato a partir de un sistema gas-agua-decano debido a una mejor mezcla in situ.

De igual manera estas nuevas geometrías son capaces de medir propiedades viscoelásticas dinámicas de lechadas de hidratos y también, durante la disociación de hidratos, pueden capturar e imitar el perfil de viscosidad.

### **Figura 12**

*Geometrías modificadas*



Nota: Rotores modificados para estudio de sistemas multifásicos a alta presión Tomado de: (Pandey, Linga, & Sangwai, 2016)

Los resultados obtenidos por Pandey, Linga, & Sangwai (2016) denotaron un aumento de la viscosidad (de 0.001 a 25 Pa s), lo cual no era apreciable al desarrollar los ensayos con la geometría convencional. De igual forma es posible emplear esta geometría modificada para realizar estudios reológicos a lodos, suspensiones y emulsiones.

Según (TA Instruments, 2021) las geometrías de cilindros concéntricos pueden emplearse para ensayar una amplia gama de fluidos como, por ejemplo: soluciones con bajas concentraciones de polímeros, lodos de perforación, solventes, aceites, materiales cementantes, pintura, alimentos, suspensiones farmacológicas, entre otros.

Un ejemplo del aporte de estudios reológicos, son los efectuados en materiales cementantes, donde se han alcanzado mejores propiedades como: resistencia mecánica, compactación y una alta durabilidad. Todo esto suponen grandes ventajas para la industria de la construcción. Otros avances alcanzados por estudios reológicos en pastas de cemento, hacen referencia a la agregación de material particulado, de diversos tamaños y formas. (Flatt, Martys, & Bergström, 2004)

## Manufactura de productos

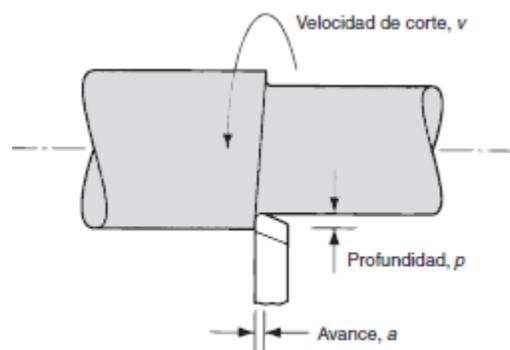
### *Procesos de maquinado y parámetros de corte*

Los procesos de maquinado son tecnologías de manufactura caracterizadas por su precisión y exactitud, estos se valen de una herramienta de corte la cual retira material en forma de viruta para obtener la pieza deseada. Se tienen diferentes tipos de operaciones de maquinado, pero las tres más comunes se consideran el torneado, fresado y taladrado, operaciones ampliamente usadas en procesos de manufactura, donde cada una permite crear cierto tipo de geometrías.

Para realizar la remoción de material se requiere de un movimiento de la herramienta, la cual se realiza a una velocidad denominada velocidad de corte, además de un movimiento lento llamado avance, y finalmente una profundidad del corte. Estos son los tres parámetros primarios y dependen principalmente del tipo de operación, desbaste o acabado, el material de la pieza de trabajo y el tipo de herramienta. Los parámetros de corte se representan en la figura siguiente:

**Figura 13**

#### *Parámetros de corte*



Nota: representación de los tres parámetros de corte en una operación de torneado. Tomado de:  
(Groover, 2007)

Las operaciones de maquinado pueden clasificarse como desbaste, cuando se busca remover la mayor cantidad de material en el menor tiempo posible hasta que la pieza de trabajo adquiera una forma cercana a la que se requiere. Por otro lado, cuando lo que se busca es dar a la pieza las dimensiones, tolerancias y acabado superficiales finales la operación se clasifica como de acabado.

Como lo evidencia la Figura 14, las velocidades de corte son más altas en las operaciones de acabado, pero con avance y profundidades de corte menores en comparación con las operaciones de desbaste. (Groover, 2007)

**Figura 14**

*Velocidades de corte*

Material de trabajo	Herramientas sólidas (fresas escariadoras, taladros) <sup>2</sup>				Herramientas indexables (molinos frontales) <sup>2</sup>			
	Velocidad convencional		Velocidad alta de corte		Velocidad convencional		Velocidad alta de corte	
	m/min	ft/min	m/min	ft/min	m/min	ft/min	m/min	ft/min
Aluminio	300+	1 000+	3 000+	10 000+	600+	2 000+	3 600+	12 000+
Acero fundido, suave	150	500	360	1 200	360	1 200	1 200	4 000
Acero fundido, dúctil	105	350	250	800	250	800	900	3 000
Acero, maquinado libre	105	350	360	1 200	360	1 200	600	2 000
Acero, aleación	75	250	250	800	210	700	360	1 200
Titanio	40	125	60	200	45	150	99	300

Nota: la tabla detalla de manera comparativa las velocidades de corte según el tipo de maquinado, para ciertos materiales de la pieza de trabajo. Tomado de: (Groover, 2007)

En el proceso de torneado, la máquina herramienta más ampliamente usada es el torno paralelo. En un torno, la pieza se sujeta al mandril o a una boquilla, mientras el cabezal incorpora un sistema de engranes para la variación de la velocidad. La herramienta de corte se sujeta al carro portaherramientas, el cual posee movimiento axial y radial a la vez que se puede variar el ángulo para el mecanizado de superficies cónicas. (Schey, 2000)

Por su parte, el fresado, es un proceso de gran importancia que se orienta al mecanizado de piezas de simetría no rotacional, las fresadoras pueden clasificarse por la orientación del eje de rotación, teniendo así: fresadoras horizontales y fresadoras verticales.

### ***Operaciones afines al torneado***

Además del torneado convencional, en un torno se pueden realizar otras operaciones, las cuales, en su mayoría, solo requieren un cambio en la herramienta de corte, por ejemplo:

- Taladrado y perforado: En estas operaciones se maquinan agujeros, para el taladrado se emplea una broca que se hace avanzar de forma axial. Para el perforado una herramienta de punta sencilla avanza sobre el diámetro interno de un agujero ya formado.
- Roscado: Emplea una herramienta especial diseñada con la forma de la cuerda a producir, la cual avanza a una velocidad necesaria para formar la rosca.
- Tronzado: También llamado partición, consiste en un avance radial de la herramienta de corte en algún punto en la longitud de la pieza.
- Moleteado: Es una operación de formado de metal, ya que no involucra la remoción de material, se emplea para generar un rayado regular y superficial. La herramienta empleada para ello consiste en dos rodillos o muelas endurecidas con el patrón de rayado en sus superficies, las cuales se presionan contra la pieza de tal forma que el patrón se graba en la superficie. Para este proceso es recomendable que el diámetro de la pieza se múltiplo del paso de la muela de moleteado.

### ***Proceso de anodizado***

El anodizado es un proceso electroquímico que se aplica al aluminio y sus aleaciones, en el cual se generan una capa de óxido de aluminio, llena de nano-poros en la superficie del

material, que incrementa la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión. (Barajas, Mojica, Vasquez, & Estupiñan, 2007)

Este proceso se realiza por medio de un baño electrolítico, donde la pieza a tratar actúa como ánodo, de allí su nombre. Al aplicar una corriente eléctrica, se separan los iones  $H^+$   $OH^-$  del electrolito y se desprende oxígeno en el ánodo, creando la capa de oxido en el mismo.

Se han desarrollado técnicas de anodizado ultrarrápido en dos etapas, estudiadas por Murugaiya, Mutalikdesai, & Ramasesha (2015) donde se realiza un anodizado inicial por diez minutos y posteriormente un segundo anodizado de 3 minutos a alto voltaje (150 V). Este proceso toma menos de 15 minutos, frente a otros que pueden tomar hasta 12 horas. En este se emplea ácido oxálico y ácido fosfórico como electrolitos de la primera y segunda etapa respectivamente, para lograr la optimización del proceso.

### ***Fabricación de prototipos***

Un prototipo se entiende como una aproximación al producto final en una o más dimensiones de interés. (Ulrich & Eppinger, 2012), se pueden definir diversas clasificaciones de prototipos, por ejemplo, prototipos físicos y analíticos o prototipos integrales y prototipos enfocados.

El desarrollo de prototipos es importante ya que permite reducir el riesgo de costosas iteraciones, porque nos permite identificar de manera más clara problemas o errores en el diseño, incrementando así las probabilidades de obtener un producto final exitoso. Otra ventaja del prototipado puede ser el agilizar ciertas actividades comprendidas en el desarrollo de un producto, ya que permiten que se visualice y diseñe con mayor rapidez el proceso de fabricación.

Actualmente existen dos tipos de tecnologías importantes para la fabricación, los sistemas CAD y la fabricación de forma libre. Un ejemplo de aplicación de tecnologías CAD 3D se dio con la fabricación de aviones Boeing 777 y 787, donde comúnmente se empleaban prototipos de madera a escala natural para detectar interferencias geométricas con otros sistemas de la aeronave. (Ulrich & Eppinger, 2012)

Por su parte la fabricación por forma libre, además de crear prototipos en 3D de forma rápida y a un bajo costo, permiten materializar conceptos, facilitando la forma en que estos se comunican en una etapa temprana del proceso de desarrollo. Estos procesos de fabricación en su mayoría se realizan capa por capa, para lo cual existen diferentes enfoques.

### **Ingeniería inversa**

Mientras en la ingeniería convencional, los conceptos y modelos son materializados en mecanismos o elementos tangibles, la ingeniería inversa es el proceso de sentido opuesto en el cual se crean conceptos y modelos a partir de partes reales. En este proceso es evidente el uso de sistemas CAD/CAM, los cuales mejoran la calidad y eficiencia del diseño, de la manufactura y del análisis. (Várady, Martin, & Cox, 1997)

### ***Fases de un proceso de ingeniería inversa genérico***

De acuerdo con Raja & Fernandes (2007), en términos generales, la ingeniería inversa es un proceso de tres partes, el cual comprende: escaneo, procesamiento de puntos y el desarrollo del modelo geométrico de aplicación específica. Para el proceso de ingeniería inversa es necesario tener en cuenta:

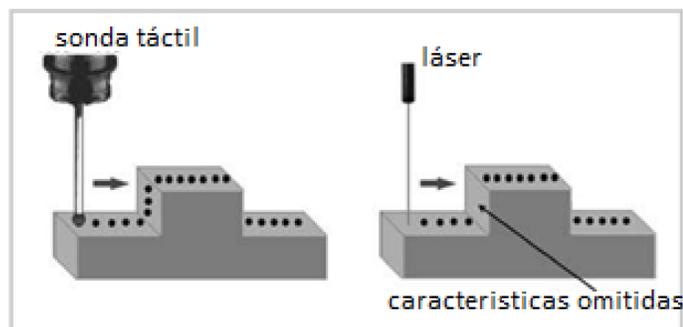
- El tamaño, si el elemento de estudio es grande o pequeño.

- La complejidad del elemento
- El material del elemento, puede ser suave o duro, rugoso o liso, etc.
- La geometría, que puede ser orgánica o prismática, externa o interna
- Precisión requerida, sea linear o volumétrica

**Fase 1. El escaneado de datos.** Existen varias técnicas de escaneo, por ello es importante escoger la opción correcta, es decir aquella que capture la información que describa todas las características geométricas. Se pueden encontrar dos tipos de escaneo, escaneo de contacto y escaneo sin contacto, la Figura 15 muestra dos tipos de escaneo de datos y la información que puede omitirse

**Figura 15**

*Tipos de escaneo*



Nota: Información capturada por diferentes tipos de escaneo de información. Adaptado de: (Raja & Fernandes, 2007)

**Fase 2. Procesamiento de puntos.** En esta etapa se importan las nubes de puntos, se reduce el ruido en los datos y el número de puntos. También en esta etapa se puede fusionar múltiples sets de datos para asegurarse que todas las características requeridas han sido escaneadas.

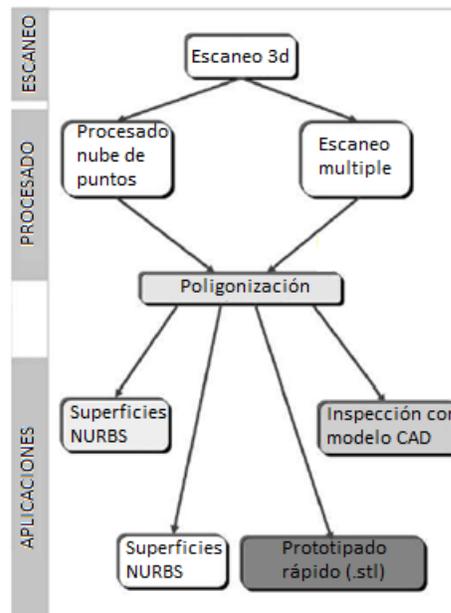
**Fase 3. Desarrollo de modelos geométricos de aplicación.** Modelos CAD son creados a partir de componentes físicos mediante datos de puntos, siendo esta, probablemente, la actividad más compleja, ya que requiere de potentes algoritmos de ajuste superficial para generar superficies que definan con precisión la información 3D descrita dentro de estos sets de datos.

Esta fase depende mucho del propósito que tiene el proceso de ingeniería inversa.

La figura siguiente esquematiza las tres fases ya mencionadas de la ingeniería inversa.

**Figura 16**

*Proceso genérico de Ingeniería inversa*



Nota: Tomado de: (Raja & Fernandes, 2007)

Según Várady, Martin, & Cox (1997) esta secuencia resulta ser meramente nocional, de hecho, estas fases comúnmente se traslapan y la mayoría de veces se requieren e varias iteraciones para obtener un resultado final.

***Ingeniería inversa y el prototipado rápido***

El prototipado rápido es una tecnología la cual es empleada para producir un elemento físico a partir de un archivo CAD (computer-aided design), esta técnica permite materializar una idea y poder comunicarla a clientes o a un equipo de trabajo. Estos prototipos pueden usarse para varios aspectos referentes al diseño como, por ejemplo, comprobaciones dimensionales o pruebas de túnel de viento. (Raja & Fernandes, 2007)

Una de las ventajas más destacables de estas tecnologías de prototipado rápido es la reducción en los costos de producción de un producto nuevo, reducción que se encuentra entre un 40 a 70 por ciento según (Waterman & Dickens, 1994). De la misma forma, este estudio también señala que el plazo de lanzamiento de un producto, o time to market, es reducido entre un 60 a 90 por ciento.

Es importante señalar que el término “rápido” es relativo, en el sentido de que este se refiere a la velocidad con la que pasa de un archivo CAD a un objeto físico, y no necesariamente hace referencia a la velocidad propia del proceso de construcción de la pieza. Esta última es dependiente de las dimensiones, la complejidad y tiempos de enfriamiento, en caso de ser requeridos. (Raja & Fernandes, 2007)

## **Análisis por ingeniería inversa**

### **Adquisición de datos**

Para el proceso de ingeniería inversa se cuenta con dos geometrías de cilindros concéntricos en el Laboratorio de Reología. Estas tienen características dimensionales y geométricas muy similares entre ellas, ambas constan de una copa y una tapa. Como primer paso,

las geometrías son llevadas al laboratorio de metrología de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, donde se realiza el siguiente proceso para la toma de datos:

1. Boceto a mano alzada donde se representan vistas, cortes y detalles de mayor relevancia.
2. Acotación de los bocetos
3. Preparación de los instrumentos de medición
4. Toma de medidas
5. procesamiento de los datos mediante Microsoft Excel

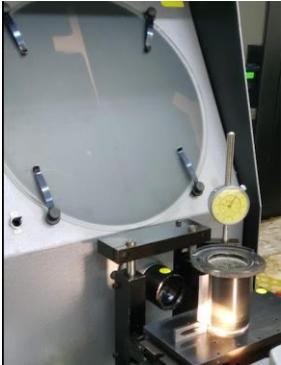
### ***Proceso de medición***

En el proceso de medición cada cota se mide siete veces, para posteriormente realizar una tabulación y promedio. Para la medición se emplean los instrumentos mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Instrumentos empleados para proceso de medición*

<b>Instrumento</b>	<b>Apreciación</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Imagen</b>
Gramil digital	0.01mm	Medición de alturas	

Instrumento	Apreciación	Aplicación	Imagen
Calibrador digital	0.01mm	Medición de longitudes y diámetros	
Galga de roscas (métrica)	N/A	Pasos de rosca	
Galga de radios	N/A	Radios de curvatura	
Proyector de perfiles	0.01mm	Perfiles	

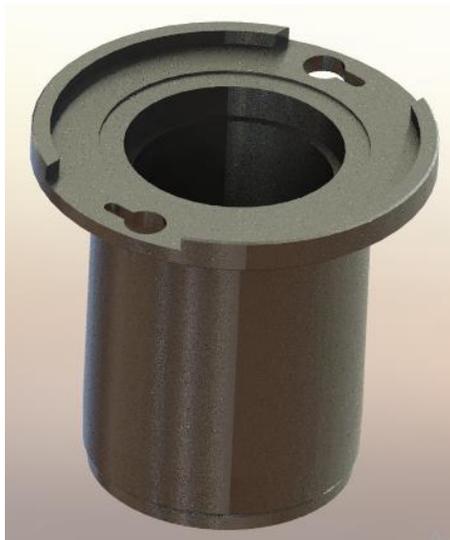
Nota: Todos los instrumentos mostrados en la tabla son propiedad del laboratorio de Metrología de la Universidad de la Fuerzas Armadas - ESPE

### Desarrollo del modelo CAD

Mediante los datos obtenidos se desarrollan los modelos CAD, como se ve en la Figura 17, empleando el software SolidWorks donde también se realizan los planos de la geometría.

### Figura 17

*Modela CAD de la geometría inferior de cilindros concéntricos*



Nota: Modelo CAD, resultado de adquisición de datos.

### Detalle de requerimientos

Se requiere obtener una geometría inferior de cilindros concéntricos la cual esté fabricada en un material metálico, y que responda adecuadamente bajo los siguientes criterios:

- Resistencia a la abrasión producida por partículas presentes en ciertos fluidos de estudio, tales como sustancias cementantes.
- Tener un coeficiente de conducción térmica similar al de las copas originales.
- El cierre entre tapa y copa debe ser hermético para evitar fugas de las muestras durante los ensayos.

- Presentar una tolerancia geométrica y dimensional, adecuadas para el acople con el peltier y con la geometría superior (rotor).
- Las tolerancias requeridas deben estar acorde con las capacidades de las maquinas empleadas para la fabricación del elemento.

Adicionalmente, se buscará que la geometría se fabrique con un material asequible y económico en el mercado.

### **Análisis de los requerimientos**

#### ***Resistencia a la abrasión***

Para cubrir este requerimiento se emplea el mismo método utilizado por TA Instruments según su catálogo de productos, según el cual, para las copas de aluminio se emplea un proceso de anodizado y en el caso de copas de acero inoxidable no se sigue ningún proceso adicional.

#### ***Selección de material (matriz de decisión)***

La pieza original se encuentra fabricada en un material metálico, que según el sitio web del fabricante, [tainstruments.com](http://tainstruments.com), son fabricados en aluminio anodizado o acero inoxidable, por lo que se les considera como principales opciones para el maquinado de la nueva geometría. Esto aplica para el cuerpo o copa, ya que todas las geometrías cuentan con una tapa de acero inoxidable.

Para facilitar el proceso de manufactura se consideran las siguientes variables:

- Costo de la materia prima.

En términos generales, el aluminio resulta ser un material muy atractivo para la fabricación de productos debido a su buena relación de densidad y resistencia mecánica, llegando a pesar un tercio del acero, y su excelente maquinabilidad.

- Costo de las herramientas

Las características del material definirán el tipo de herramienta a emplearse y por tanto el costo de las mismas.

- Maquinabilidad del material

Un material que presente una buena maquinabilidad supone, entre otros aspectos, una mayor vida útil para la herramienta de corte, lo cual permite reducir los costes de fabricación, como lo muestra la Figura 18.

**Figura 18**

*Costos de maquinado*

Material	Dureza	Costo de maquinado
Al 7075-T6		10
Acero 1020	BHN 111	25
Acero inoxidable 410	BHN 163	40
Acero inoxidable 310	BHN 168	55
Ti-6Al-4V		75
Acero 4340	52 $R_C$	100
Inconel		170
Inconel 700 (envejecido)	BHN 400	340

*\*De Profile Milling Requirements for Hard Metals 1965-1970. Informe de la Ad Hoc Machine Tool Advisory Committee para el Department of the U.S. Air Force, mayo 1965.*

Nota: se supone un proceso de torneado con una vida de la herramienta de 60 minutos.

Tomado de: Groover (2007)

- Procesos adicionales para protección o recubrimiento

Ciertos materiales permiten la aplicación de procesos de recubrimiento para mejorar sus propiedades, como dureza, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión o incluso por cuestiones de estética.

Para el caso del acero inoxidable no se requeriría de ningún tratamiento posterior, sin embargo, para el aluminio se requiere un proceso de anodizado con la finalidad de brindar una capa protectora a la pieza mecanizada.

- Dimensiones comerciales del material en bruto

Al tratarse de una pieza de simetría rotacional que se fabrica por un proceso de torneado, la materia prima debe tener forma de barra sólida de sección redonda, las cuales se encuentran en el mercado de diferentes diámetros. Debe considerarse el menor diámetro disponible, ya que esto supone un menor tiempo de trabajo.

A continuación, se realizan las matrices de decisión que permitirán seleccionar el material apropiado, para ello, la Tabla 3 permite asignar un valor numérico para evaluar las alternativas y criterios.

**Tabla 3**

*Tabla de ponderación*

Alternativas	VALORACIÓN		PONDERACIÓN
		Criterios	
Mucho mejor		Muy relevante	9
Mejor		Relevante	7
Igual		Igual de relevante	5
Peor		Menos relevante	3
Mucho peor		Mucho menos relevante	1

Nota: se asigna una ponderación numérica que permita comparar entre criterios de evaluación.

La siguiente tabla permite identificar, mediante una comparación, los criterios de mayor interés para la fabricación de la geometría inferior de cilindros concéntricos.

**Tabla 4**

*Priorización de criterios*

	Costo Material	Costo de herramientas	Maquinabilidad	Procesos adicionales	Dimensiones comerciales	Total
Costo de material		7	5	9	5	26
Costo de herramientas	3		3	9	5	20
Maquinabilidad	5	7		9	7	28
Procesos adicionales	1	1	1		1	4
Dimensiones comerciales	5	5	3	9		22
						100

Nota: Se comparan los criterios de interés, lo que permite determinar cuáles son los criterios de mayor interés.

Ahora que ya se conocen los criterios de mayor interés, se procede a evaluar cada criterio según las alternativas disponibles.

**Tabla 5**

*Matriz de decisión*

	Costo Material	Costo de herramientas	Maquinabilidad	Procesos adicionales	Dimensiones comerciales	Puntuación total
--	----------------	-----------------------	----------------	----------------------	-------------------------	------------------

	26	20	28	4	22	
Aluminio	9	7	9	1	5	740
Acero inoxidable	1	3	1	9	5	260

Nota: El aluminio se presenta como el material idóneo con un 74% de aceptación.

Para la fabricación de la copa se opta, entonces, por un aluminio 7xxx, las cuales tienen como aleante principal el zinc. Son aleaciones que admiten tratamientos térmicos, brindan excelente grado de maquinabilidad y apariencia, además poseen un esfuerzo último a la tracción entre 210 y 380 MPa. Al no ser optas para procesos de fundición, este tipo de aleaciones son aplicadas para procesos de mecanizado en los que se requiere de un acabado excelente. (Kaufman, 2000)

### Figura 19

*Materia prima empleada*



Nota: Barra redonda sólida de aluminio 7xxx de diámetro 100mm.

Según la información proporcionada por el proveedor, (Bohman, 2022) este es un aluminio tratado térmicamente para el alivio de tensiones y una dureza Brinell de 146 a 180. Permite reducir los tiempos de mecanizado y emplear herramientas de bajo costo gracias a su

excelente maquinabilidad, cuenta además con una buena resistencia a la corrosión y buena estabilidad que garantiza un mínimo de deformación luego del maquinado. Además, admite tratamientos superficiales como: anodizado, cromado, niquelado, PTFE. La Tabla 6 detalla las características del material a emplear.

**Tabla 6**

*Características físicas del material*

<b>Densidad kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2830</b>
<b>Módulo de elasticidad N/mm<sup>2</sup></b>	71500
<b>Coefficiente de expansión térmica (20°C-100°C)</b>	23x10 <sup>-6</sup>
<b>Conductividad térmica W/m°C</b>	165
<b>Calor específico J/kg °C</b>	890

Nota: Adaptado de (Bohman, 2022)

### ***Equipos a emplear en la fabricación***

Para la fabricación de la geometría inferior de cilindros concéntricos, que comprende copa y tapa, se emplea un torno paralelo CNC marca VIWA modelo VTC 1640, el cual cuenta con un control Centroid T400S, que soporta programación código G y M estándar y asistencia de programación gráfica. Otras especificaciones técnicas del equipo se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 7**

*Especificaciones técnicas del torno VIWA VTC 1640*

<b>Motor principal</b>	<b>7.5 HP</b>
<b>Diámetro de volteo</b>	420 mm
<b>Distancia entre puntos</b>	1 m

<b>Ancho de bancada</b>	360 mm
<b>Revoluciones del husillo</b>	3000 RPM máx.
<b>Dimensiones</b>	2.00 m x 0.86 m x 1.46 m
<b>Peso neto</b>	1.6 Ton
<b>Alimentación</b>	220V (trifásico)

Nota: Adaptado de (VIWA S.A., 2016)

En el proceso de torneado se emplean diferentes insertos según el trabajo a realizar. La siguiente tabla resume las herramientas empleadas.

**Tabla 8**

*Herramientas de corte empleadas en torneado*

Tipo de trabajo	Inserto / herramienta de corte	Porta herramientas	Imagen
Torneado externo	DNMG110404	DDJNR 2525M 11	

Tipo de trabajo	Inserto / herramienta de corte	Porta herramientas	Imagen
	CNMG120412	CCLNR 2020K 12	
<b>Torneado interno</b>	DCMT070202	SDUCR07	
<b>Roscado</b>	16NRAG60	SNR0020Q16	
<b>Acanalado</b>	Herramienta de acero rápido HSS afilada a 2.5mm de grosor	N/A	

Tipo de trabajo	Inserto / herramienta de corte	Porta herramientas	Imagen
<b>Taladrado</b>	Broca de centros Broca de D = 9 mm Broca de D = 12 mm Broca de D = 15 mm Broca de D = 20 mm Broca de D = 25 mm	Conos Morse	

Nota: Para procesos de desbaste se emplea el inserto CNMG120412, mientras que para operaciones de acabo se usa el inserto DNMG110408.

Para completar el proceso de manufactura de la geometría se debe hacer uso del centro de mecanizado vertical FADAL VMC 3016, en el cual se emplearán las herramientas descritas en la Tabla 9.

### Figura 20

*Centro de mecanizado Fadal*



Nota: centro de mecanizado presente en el Laboratorio de Manufactura, el cual permite completar tareas de fresado.

**Tabla 9**

*Herramientas de corte empleadas en fresado*

Tipo de trabajo	Herramienta de corte	Imagen
	Fresa plana (diámetro 10mm)	
<b>Fresado</b>	Fresa plana (diámetro 3mm)	

Nota: Las herramientas son propiedad del laboratorio de Procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

### **Fabricación de prototipos**

Para el presente trabajo se desarrollarán tres diferentes prototipos, dos de los cuales servirán de apoyo para la manufactura del prototipo final. Se espera que cada uno cumpla distintos objetivos en el proceso.

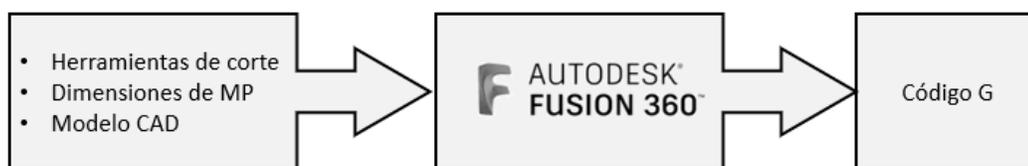
## CAM y código G

Como paso inicial se realizó una revisión de las herramientas (brocas, insertos, portaherramientas y fresas) con las que cuenta el laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, y se seleccionaron aquellas que podían ser de utilidad en el proceso de fabricación. Posteriormente se revisaron las medidas comerciales de la materia prima con la finalidad de usarlos como datos de entrada.

El modelo 3D desarrollado en SolidWorks es exportado a Fusión 360 para desarrollar un proceso de manufactura asistida por computadora (CAM) que permite generar el código G de manera automática. La siguiente figura muestra los datos de entrada y la salida generada con ayuda del software Fusion 360.

**Figura 21**

*Proceso de obtención del código G*



Nota: El diagrama muestra la información de entrada para la adquisición del código G.

## Procedimiento de fabricación

El flujo de procesos (Figura 22) es una representación gráfica y simplificada de la sucesión de actividades requeridas para la correcta fabricación de la geometría inferior de cilindros concéntricos, en él se indica el tipo de tarea según la siguiente simbología:

**Tabla 10**

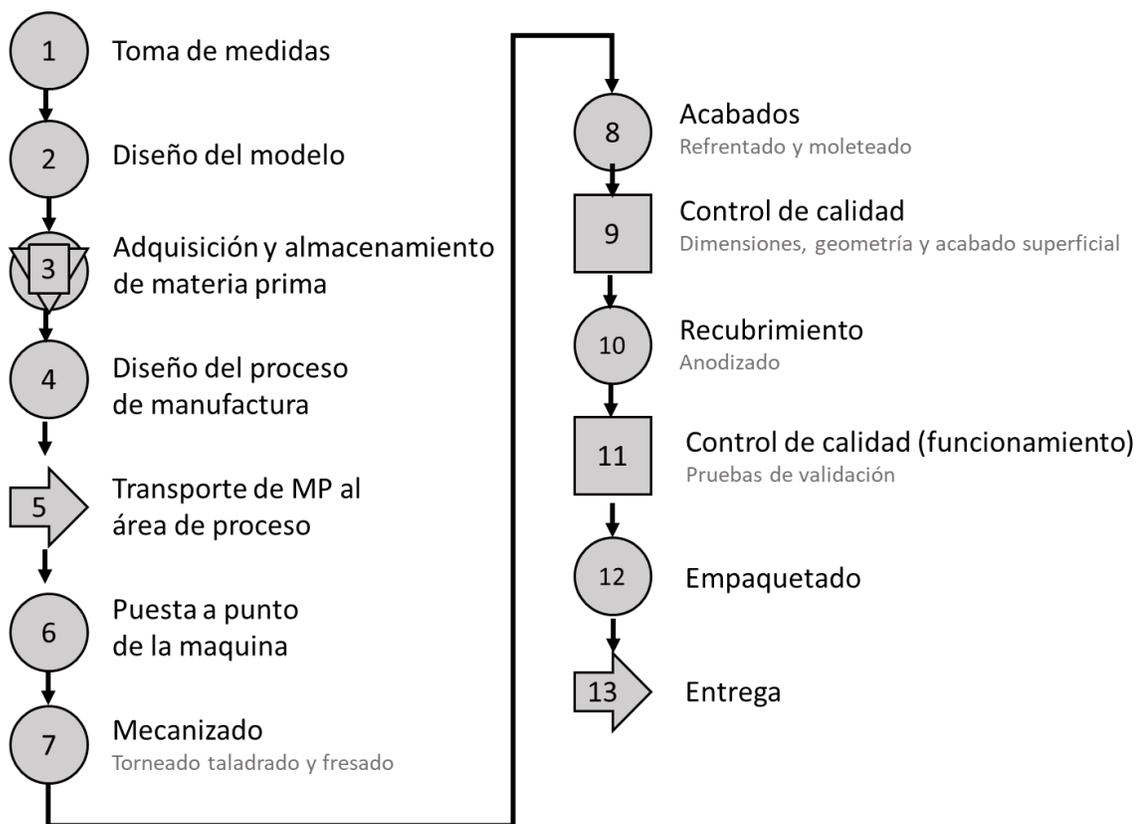
*Simbología del diagrama de fabricación*

SÍMBOLO	IMPLICA:
Circulo	Proceso
Cuadrado	Revisión
Triangulo	Almacenamiento
Flecha	Transporte

Nota: Significado de las figuras empleadas para el diagrama de flujo.

**Figura 22**

*Diagrama de flujo de fabricación*



Nota: El proceso comprende la fabricación de una sola pieza (prototipo de validación) desde la medición de las geometrías modelo, hasta la entrega del elemento al Laboratorio de Reología.

### ***Hojas de procesos***

Las hojas de procesos se encuentran en el apartado de Anexos.

### ***Otras consideraciones, observaciones y cambios***

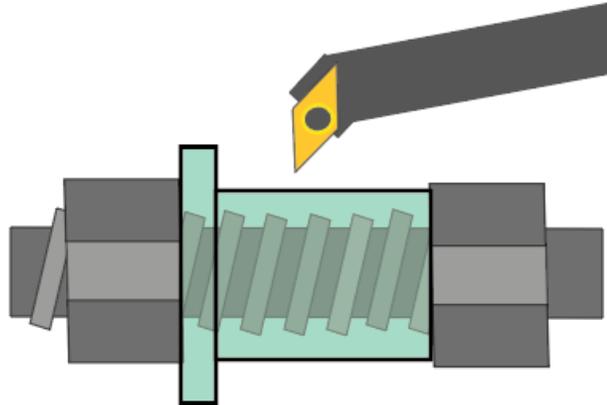
Durante el proceso de fabricación, la sujeción de la pieza a la máquina-herramienta es un factor de interés, dada la geometría y las tolerancias de concentricidad de la copa, se decidió que, para el agujero central pasante, se procederá a dejar un excedente de 16mm, como se detalla en la hoja de procesos, el cual permitirá facilitar la sujeción de la pieza al mecanizar el extremo opuesto de la pieza.

El espesor de pared es suficiente para que no se produzcan deformaciones, sin embargo, se recomienda que las muelas del husillo apliquen una presión cercana a los 25 psi. Para el mecanizado de la tapa se opera de igual manera, dejando un excedente de 10mm, que permite la sujeción de la pieza en pasos posteriores.

Para el acabado final se realizará una sujeción con ayuda de un eje roscado y dos tuercas, como lo muestra la Figura 23. Además, para el moleteado y refrentado final de la tapa se mecaniza una rosca interna en un tubo metálico, como se muestra en la figura 24, que permita sujetar a la pieza durante estas operaciones

### **Figura 23**

*Sujeción de copa*



Nota: Para el acabado final de la copa se hace uso de un eje roscado y dos tuercas que mantengan fija a la pieza durante esta operación.

#### **Figura 24**

*Elemento de sujeción para tapa*



Nota: Tubo roscado para sujeción de tapa al mandril del torno.

Con la ayuda del proyector de perfiles, se logró determinar que la parte inferior de la copa cuenta con una inclinación de dos grados, esta conicidad en la pared exterior de la copa comprende un cambio de sección, el cual debe ser controlado para evitar que interfiera con el correcto ajuste de la geometría con la chaqueta de cilindros concéntricos del equipo.

El número de hilos del roscado fue incrementado por facilidad de fabricación, lo que implica un cerrado más lento que el de las geometrías originales, pero no supone otra repercusión negativa sobre el ajuste de la geometría en el equipo.

La geometría de cilindros concéntricos es empleada para realizar mediciones en fluidos de bajas viscosidades, por lo que deben evitarse las fugas, para ello se emplea un O-ring. El tamaño de este debe ser elegido de forma correcta para que se dé el cierre. El o-ring empleado en la geometría de muestra es de 2.1mm de espesor con un diámetro aproximado de 50mm. sin embargo comercialmente no se encuentra o-rings de dicho espesor.

### Desarrollo de prototipos

Para garantizar la correcta fabricación de la geometría, denominado como prototipo operativo, se realizan dos prototipos previos, lo cuales apoyan en el proceso de fabricación. A continuación, en la Tabla 11, se describen los tres prototipos fabricados.

**Tabla 11**

*Descripción de prototipos fabricados*

Prototipo	Objetivos	Logros	Método de fabricación	Material	Costo referencial
Exploratorio	Comunicar el concepto	Identificar errores en el archivo CAD	Impresión 3D	ABS	Muy bajo
Funcional	Comprobar el ajuste geométrico con el equipo	Desarrollar el proceso de fabricación	Mecanizado CNC	Nylon	Bajo

Operativo	Aplicar pruebas de validación	Comparar los resultados de las copas originales entre sí, y así evaluar el desempeño de la copa con desgaste.	Mecanizado CNC	Aluminio	Medio
-----------	-------------------------------	---	----------------	----------	-------

Notas: 1. Se entiende por logros a circunstancias resueltas de manera no programada gracias al desarrollo del prototipo. 2. El costo de cada prototipo esta referenciado al costo de la geometría original.

**Figura 25**

*Prototipos fabricados*



Nota: De izquierda a derecha se tiene: Prototipo exploratorio, prototipo funcional y prototipo operativo.

### **Análisis de la relación de costos**

Según TA Instruments (2006) el costo de adquisición de una geometría inferior de cilindros concéntricos fabricada en aluminio de diámetro 44 mm (número de serie: 545615.901) es de \$1300 USD. A lo que se debe sumar los costos de importación del producto.

La pieza a fabricar fue presupuestada en un centro de mecanizado CNC por un valor entre \$110 a \$130, a lo cual se debe agregar los siguientes costos:

- Costos de material: \$128.30
- Proceso de anodizado: \$8.00
- O-ring: \$0.80

Por lo tanto, el fabricar la geometría tendría un costo total de \$257.10. por lo que la relación de costos sería:

$$R = \frac{\text{Costo geometría original}}{\text{Costo geometría fabricada}} = \frac{1300}{257} = 5.06$$

### **Protocolo de pruebas y validación**

#### **Pruebas de calidad**

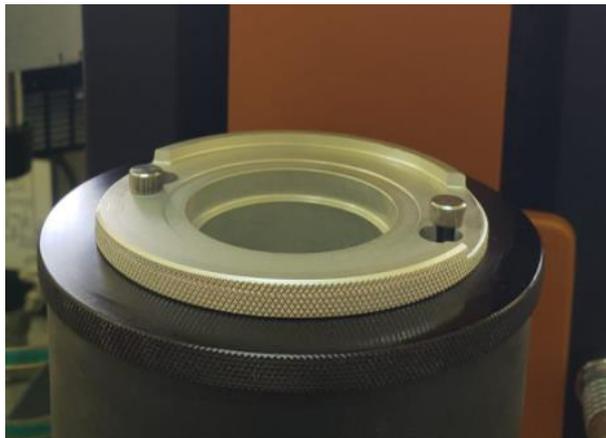
#### ***Ajuste con el equipo.***

La geometría inferior de cilindros concéntricos debe introducirse en una chaqueta, como se muestra en la figura 26. Además de brindar soporte a la geometría, esta chaqueta permite controlar la temperatura mediante un peltier, en este sentido el ajuste entre estos elementos debe favorecer la transferencia de calor.

Por esto se comprobará que la geometría a fabricar pueda montarse y desmontarse con normalidad, sin sufrir atascamientos u otros inconvenientes. Esto se comprobará en presencia del equipo de docentes del laboratorio de reología, y se evaluará de forma visual que la geometría fabricada cumpla en los siguientes puntos:

### **Figura 26**

*Prueba de ajuste con el equipo*



Nota: Verificación del ajuste geométrico de la copa con la chaqueta de cilindros concéntricos.

- La geometría puede ser insertada y retirada de la chaqueta con normalidad, sin requerir sobreesfuerzo.
- El ajuste entre la geometría y la chaqueta es apropiado para la transferencia de calor entre las superficies (ausencia de una excesiva holgura)
- La geometría puede fijarse correctamente mediante los tornillos de sujeción de la chaqueta.
- La parte superior de la geometría se asienta sobre la chaqueta.

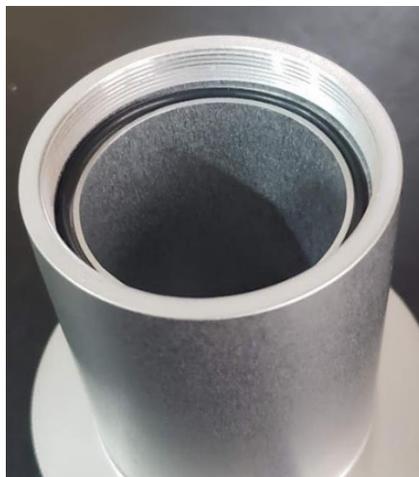
### ***Funcionalidad***

La geometría de cilindros concéntricos fue pensada con la finalidad de contener fluidos de bajas viscosidades, que no podrían ser estudiados en otras geometrías como la de platos paralelos. Por este motivo se debe garantizar que no existan fugas entre la tapa y la copa. Para esto se emplea, como se indicó en el capítulo anterior, un O-ring de 1,8mm de espesor con diámetro de 50mm. Como se muestra en la Figura 27.

A modo de verificación se llena la geometría fabricada con agua y se deja reposar por 48 horas sobre papel absorbente.

### **Figura 27**

*Ubicación de O-ring*

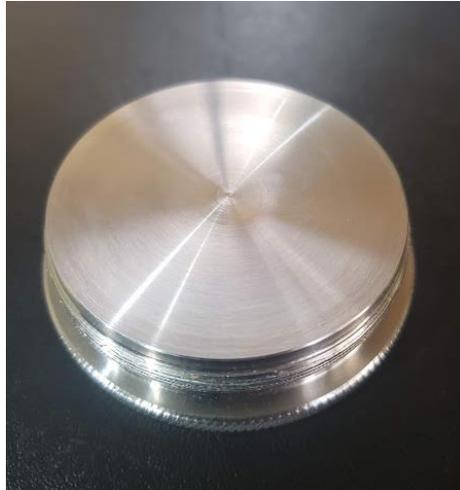


Nota: Copa fabricada requiere de o-ring en su base para evitar fugas.

Antes de realizar los ensayos en el reómetro Discovery HR-2 se debe realizar la calibración del equipo, en este proceso se debe definir el fondo de la copa, para lo cual el equipo usa el rotor (geometría superior) a manera de un palpador, este desciende hasta identificar el fondo para ello es necesario verificar que la superficie de la tapa, en su centro, cuente con un acabado apropiado que no altere esta medición. Como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 28**

*Superficie de la copa*



Nota: Superficie de la tapa luego de rectificar la superficie.

### **Pruebas de validación**

#### ***Metodología***

Terminado el proceso de fabricación de los prototipos (exploratorio, funcional y operativo) se procede con la aplicación de ensayos, que permitan evaluar el desempeño de la geometría fabricada (prototipo operativo). Para esto se hace uso de:

- Reómetro Discovery HR-2 de la marca TA Instruments
- Geometría de cilindros concéntricos
- Pipeta y vaso de precipitación de 100 ml
- Software TRIOS.

Los ensayos inician con el montaje de los accesorios, el encendido y calibración del equipo, para lo cual es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Encender el compresor de aire y abrir la llave de paso, verificar que la presión sea de 30 psi.
2. Encender el intercambiador de calor Thermo Cube a una temperatura de 19°C.
3. Retirar la protección del árbol del reómetro y atornillar el rotor.
4. Encender el reómetro pulsando el botón ubicado detrás del equipo.
5. Colocar la camisa con peltier en la base magnética y conectar las boquillas del refrigerante. Insertar la copa a usar dentro del peltier.
6. Abrir el software TRIOS y verificar que el PC reconoce al equipo.
7. Calibrar la geometría.
8. Encerar el rotor con la base de la copa mediante el botón Zero Gap ubicado en la pestaña Gap en la esquina inferior derecha.

Culminado el proceso de montaje y calibración se puede empezar a programar el experimento según sea necesario y ejecutarlo. Para todos los ensayos se empleará el mismo rotor, el cual se muestra en la figura:

**Figura 29**

*Geometría superior - rotor*



Nota: Rotor de 28 mm de diámetro y longitud 42.04 mm (número de serie: 104687).

***Estructura del protocolo de pruebas de validación:***

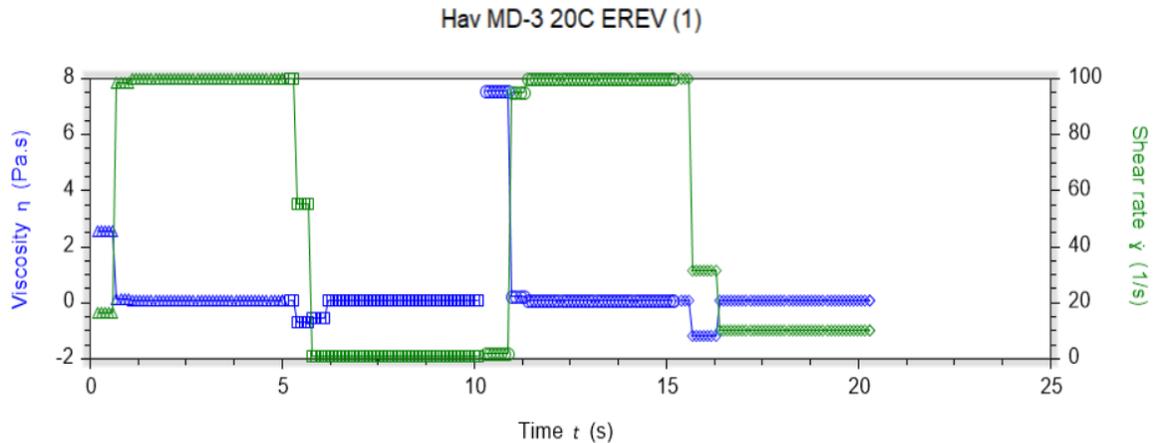
Las pruebas de validación constarán de cuatro ensayos:

**Ensayo de reversibilidad.** En este ensayo el reómetro DHR-2 aplica una velocidad de corte constante por un tiempo determinado y súbitamente cambia esta velocidad de corte ya sea a un valor mucho mayor (o menor), esto con la finalidad de observar el comportamiento del fluido. De este se obtendrá una gráfica de viscosidad y tasa de corte en función del tiempo como se muestra en la figura.

Este ensayo permite conocer el tiempo en el que se estabiliza el fluido luego de aplicarse un cambio abrupto en la velocidad de corte, lo cual es de interés para realizar la curva de flujo estacionario de manera correcta.

**Figura 30**

*Ejemplo de ensayo de reversibilidad*



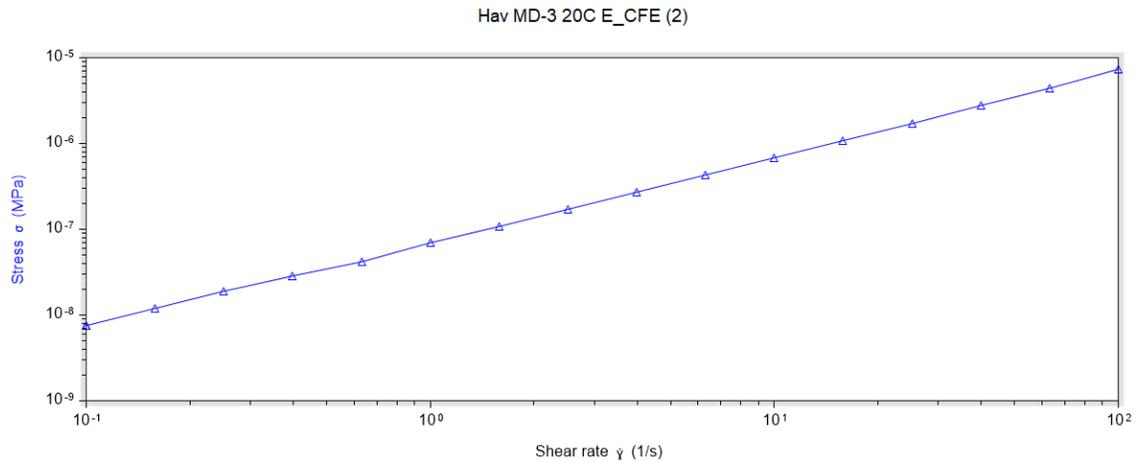
Nota: Ensayo realizado a muestra de Havoline ATF MD-3 a 20°C. Se muestran los saltos en la velocidad de corte ( $100 \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \text{ s}^{-1}$ ,  $100 \text{ s}^{-1}$  y  $10 \text{ s}^{-1}$ ).

**Curva de flujo estacionario.** La curva de flujo estacionario representa la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de cizalla. Dicha relación también se puede expresar como la viscosidad en función de la velocidad de cizalla mediante una conversión aplicando la ecuación de Newton. De esta forma el fluido puede identificarse como un fluido newtoniano, si los datos obtenidos representan una respuesta lineal, o como no newtoniano si se tiene una relación no lineal.

Para este ensayo el reómetro varía de forma gradual la tasa de corte aplicada al fluido, y se obtiene una gráfica de esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte, como la que se muestra en la figura siguiente.

### Figura 31

*Ejemplo de ensayo de CFE*



Nota: Ensayo realizado a muestra de Havoline ATF MD-3 a 20°C.

**Ensayo oscilatorio.** Los ensayos oscilatorios permiten evaluar el comportamiento predominante (viscoso o elástico) en un fluido.

En fluidos con visco-elasticidad la deformación no cesa de forma instantánea al dejar de aplicarles un esfuerzo de corte, como pasaría con un fluido newtoniano como el agua, por el contrario, en estos la configuración molecular del fluido puede mantener el esfuerzo por un tiempo (tiempo de relajación). Este esfuerzo remanente puede deformar el fluido luego de que se deja de aplicar el esfuerzo cortante.

El estudio de la visco-elasticidad se la realiza mediante el análisis de las gráficas de los módulos elástico  $G'$  y viscoso  $G''$  en los ensayos oscilatorios.

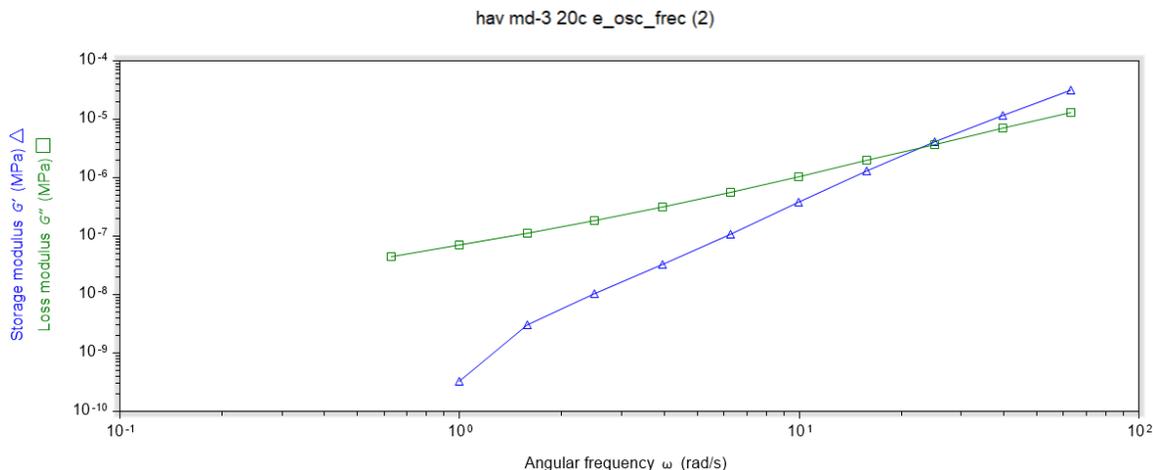
En estos ensayos se deben distinguir dos tipos de pruebas:

1. Con barrido de frecuencia

El ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia realiza las mediciones en un rango de frecuencias a la vez que mantiene una temperatura y amplitud de oscilación constantes. La amplitud puede especificarse por el porcentaje de deformación.

### Figura 32

*Ejemplo de ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia*



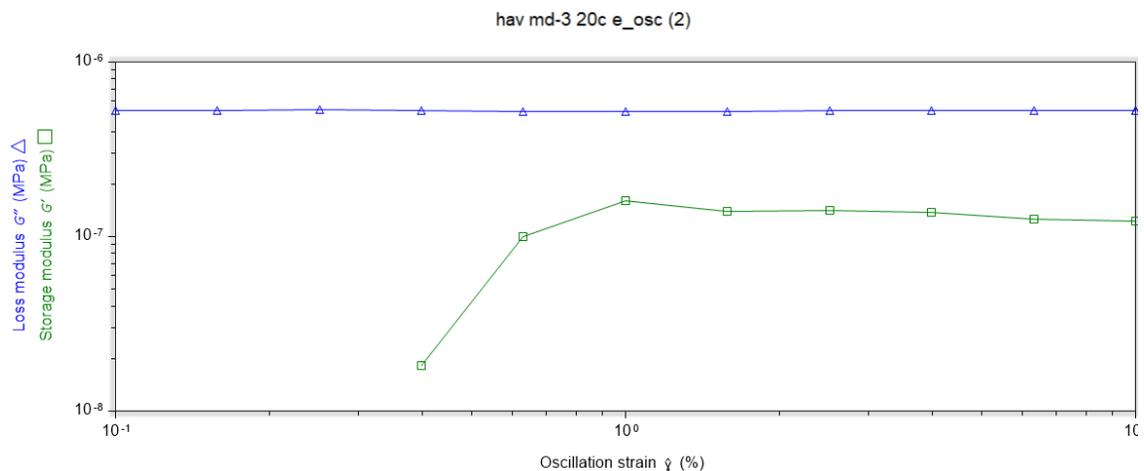
Nota: Ensayo realizado a muestra de Havoline ATF MD-3 a 20°C.

## 2. Con barrido amplitud

Para estos ensayos se emplea un rango de deformación porcentual a una frecuencia y temperatura constante, con esto se busca definir el inicio del comportamiento no lineal.

### Figura 33

*Ejemplo de ensayo oscilatorio con barrido de amplitud*



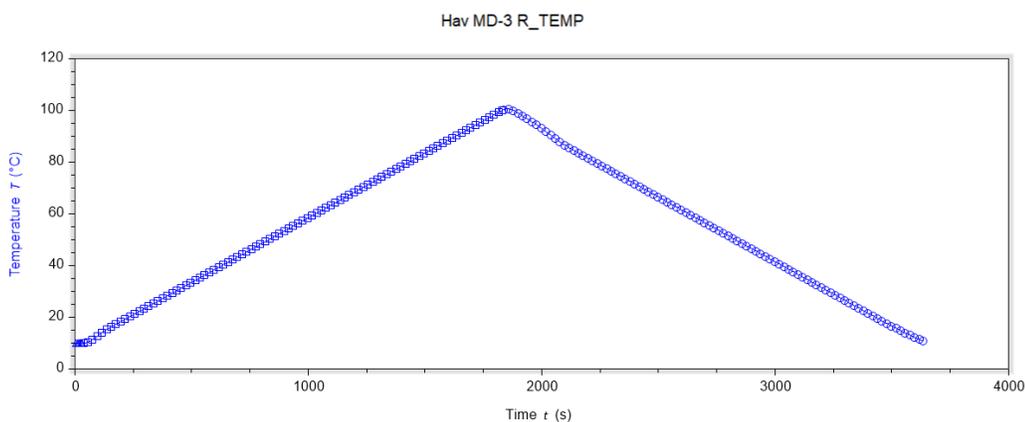
Nota: Ensayo realizado a muestra de Havoline ATF MD-3 a 20°C.

**Rampa de temperaturas.** En este tipo de ensayos se ilustra el comportamiento de la viscosidad de un fluido ante la variación de temperaturas, para ello, el reómetro emplea el peltier

presente dentro de la chaqueta de cilindros concéntricos, esta aumentará progresivamente la temperatura hasta un máximo a partir del cual disminuirá hasta el valor de temperatura inicial. Todo ello mientras se aplica una tasa de corte constante.

### Figura 34

#### *Rampa de temperaturas*



Nota: Ensayo realizado a muestra de Havoline ATF MD-3 donde la temperatura varía de 10°C a 100°C a una tasa de 3°C por minuto.

Como resultado de esta prueba se tiene una gráfica donde se observa como varía la viscosidad del fluido de estudio en función de la temperatura.

#### ***Parámetros de pruebas***

Los ensayos de reversibilidad, curva de flujo y ensayos oscilatorios se realizarán a tres temperaturas diferentes (elegidas según el fluido de estudio) y todos los ensayos se realizan empleando 70 ml de material a ensayar y se repetirán tres veces, con el fin de verificar la repetibilidad en los datos obtenidos.

Estas pruebas serán aplicadas a dos fluidos de estudio, un newtoniano y uno no newtoniano:

- Aceite monógrado: Fluido de transmisión automática Havoline ATF MD-3. Se emplean temperaturas de 20°C, 40°C y 100°C para los ensayos de reversibilidad, CFE y oscilatorios. Se lo considera como una muestra de fluido newtoniano.

**Figura 35**

*Fluido de estudio – aceite de transmisión*



Nota: Fluido de transmisión para automóviles y camiones ligeros.

- Crema humectante corporal Lubriderm. Se emplean temperaturas de 10°C, 20°C y 40°C para los ensayos de reversibilidad, CFE y oscilatorios. Se la considera como la muestra de un fluido no newtoniano.

Para los ensayos se hará uso de tres geometrías inferiores de cilindros concéntricos como se describe en la siguiente tabla:

**Tabla 12**

*Copas a emplear para ensayos de validación*

Denominación	Observaciones	Color
<p><b>Copa 1: Lisa</b></p> 	<p>Geometría de referencia, no presenta ningún desgaste apreciable. (superficie lisa) Usa tapa de la Copa 2. Posee o-ring</p>	Negro
<p><b>Copa 2: Desgastada</b></p> 	<p>Geometría con desgaste en sus paredes internas donde se aloja la muestra. No emplea o-ring.</p>	Negro
<p><b>Copa 3: Fabricada</b></p> 	<p>Geometría fabricada por ingeniería inversa. Posee tapa propia y o-ring</p>	Plomo

Nota: Las copas 1 y 2 son copas fabricadas por TA Instruments usadas para comparación en los ensayos de validación. Las tres geometrías se encuentran fabricadas en aluminio.

Las pruebas de validación comprenderán los componentes descritos en la Tabla 13:

**Tabla 13**

*Componentes de los ensayos de validación*

Materiales de estudio	Geometrías a emplear	Tipos de ensayos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluido newtoniano: fluido de transmisión automática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Copa 1: superficie lisa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayo de reversibilidad</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluido no newtoniano: crema lubricante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Copa 2: superficie desgastada</li> <li>• Copa 3: copa fabricada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Curvas de flujo estacionario</li> <li>• Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud</li> <li>• Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia</li> <li>• Rampa de temperatura</li> </ul>

Nota: No se reportarán los resultados del ensayo de reversibilidad, ya que sirve de apoyo para el ensayo de CFE.

Una vez terminados los ensayos con una muestra, esta se desecha según las indicaciones del personal del laboratorio de reología.

### ***Postprocesado de los datos***

Los datos obtenidos en ensayos de iguales condiciones (tipo de ensayo, geometría empleada, temperatura y material de estudio) son promediados y se obtienen sus barras de error mediante el software OriginLab, a continuación, se comparan las gráficas obtenidas con las tres copas. A partir de ellas se elaborará el análisis de resultados y conclusiones finales.

### **Descripción de resultados**

### ***Pruebas de ajuste y funcionalidad***

La siguiente tabla detalla los resultados de las pruebas de ajuste con el equipo y funcionalidad de la geometría.

**Tabla 14**

*Resultados de pruebas*

Ord.	Prueba	Resultado	Observaciones
1	La geometría puede ser insertada y retirada con normalidad	Cumple	Presenta menor holgura que las geometrías originales
2	Ausencia de una excesiva holgura	Cumple	
3	Acople con tornillos de sujeción	Cumple	
4	La geometría se asienta sobre la chaqueta	Cumple	
5	Ausencia de fugas	Cumple empleando O-ring	O-ring Diámetro: 1.8 mm
6	Superficie de la tapa	Cumple luego de rectificar	

Nota: Luego de cumplir con todas las pruebas la geometría es apta para continuar con las pruebas de validación.

### ***Pruebas de validación***

Se presentan las gráficas de cada ensayo, donde se muestran los resultados obtenidos por las tres geometrías:

- Copa 1: con superficie lisa, empleada como modelo.
- Copa 2: con superficie interna desgastada.
- Copa 3: prototipo fabricado.

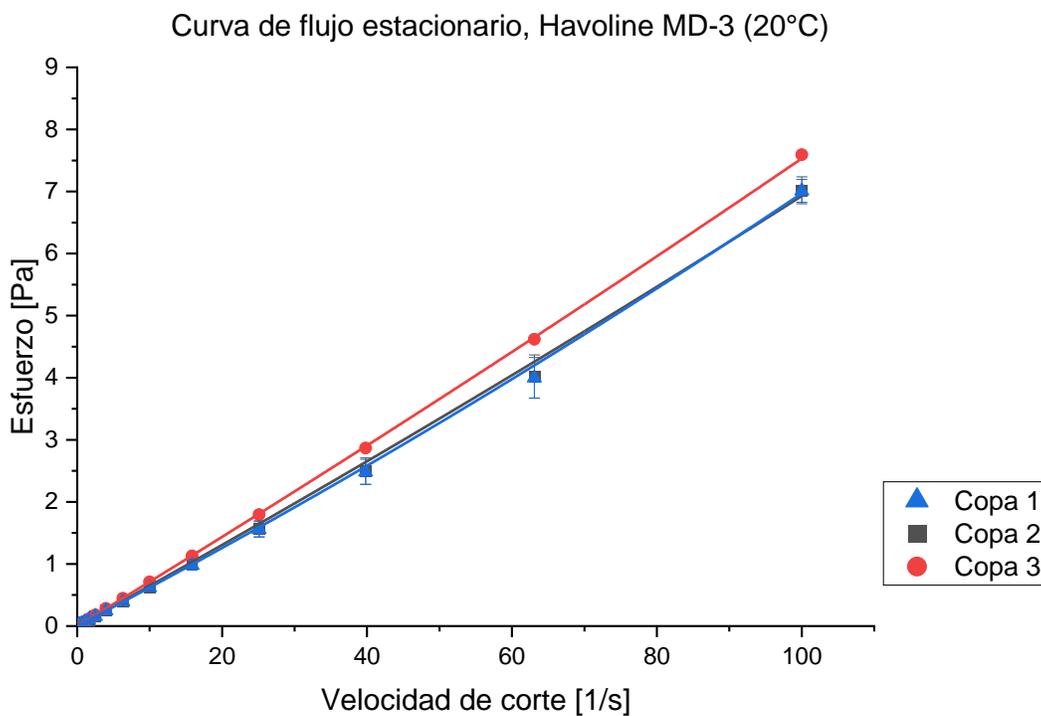
Para cada grafica se muestra una tabla con la curva de ajuste, la función de corrección y el error porcentual obtenido por las copas 2 y 3, respecto de los datos de la copa 1.

**Ensayos de CFE con Havoline MD-3.** Luego de procesar los datos obtenidos por los ensayos de CFE se obtienen las siguientes gráficas.

Se empieza realizando el ensayo a una temperatura constante de 20°C con lo que se obtuvo los siguientes resultados, como su muestra en la figura 36.

**Figura 36**

*Ensayo de CFE con Havoline MD-3 a 20°C*

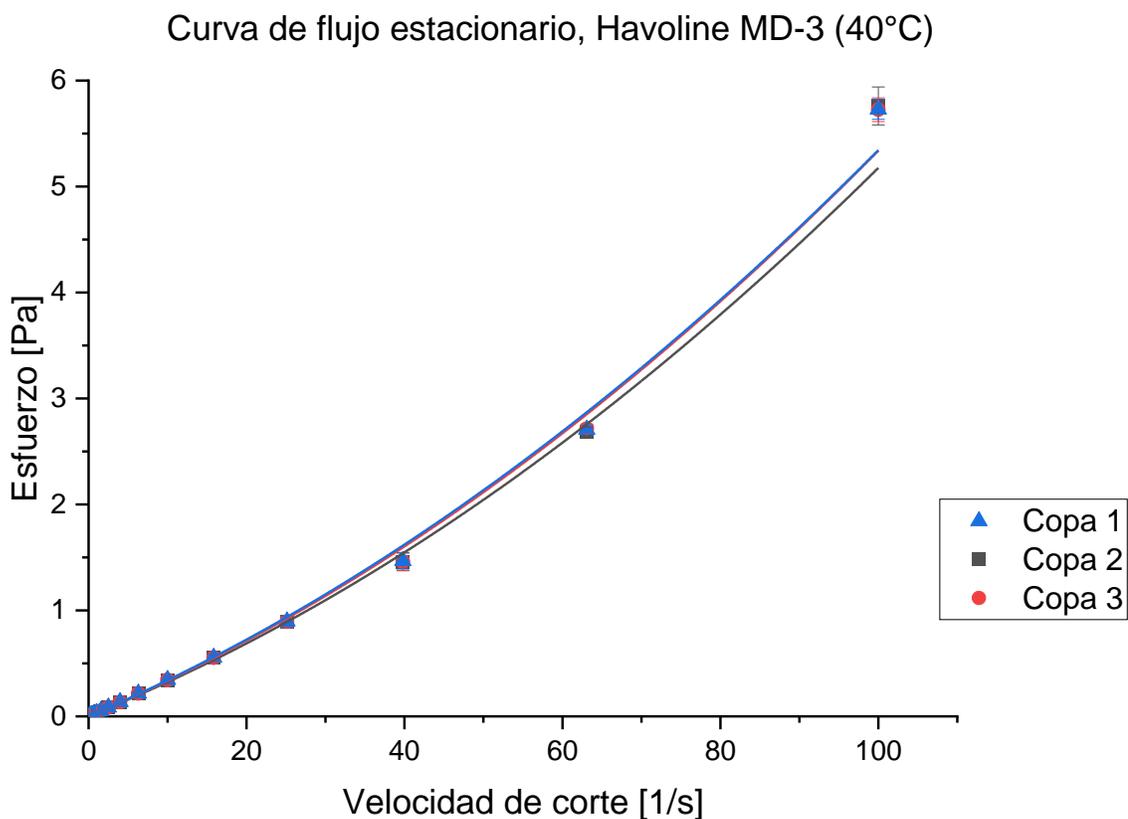


Nota: Ensayos de CFE realizados a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperatura de: 20°C. Las líneas continuas representan las ecuaciones de ajuste de cada copa.

Concluidos estos ensayos la temperatura del peltier se eleva hasta los 40°C, y se repiten los ensayos, esta vez, se puede evidenciar que con la geometría fabricada (copa 3) se obtienen datos más cercanos a los de la geometría nueva (copa 1), esto se puede apreciar en la figura 37.

**Figura 37**

*Ensayo de CFE con Havoline MD-3 a 40°C*

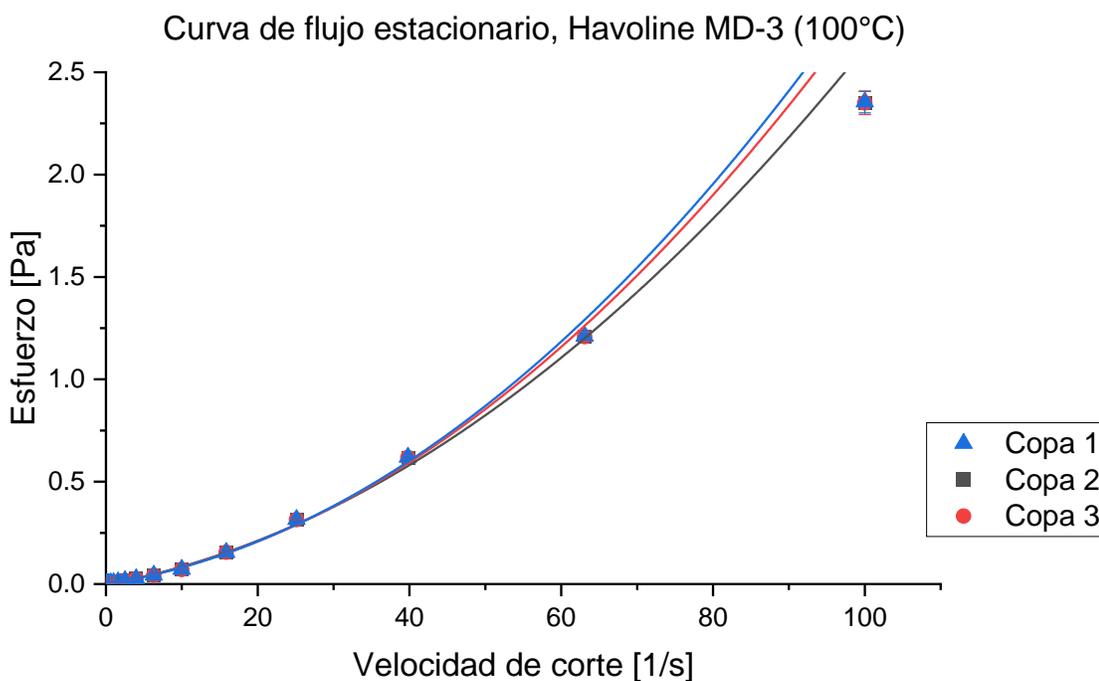


Nota: Ensayos de CFE realizados a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperatura de: 40°C. Las líneas continuas representan las ecuaciones de ajuste de cada copa.

Al realizar los ensayos a 100°C la tendencia de la geometría fabricada (copa 3) continúa siendo muy similar a la de la geometría nueva (copa 1), mientras la geometría con desgaste (copa 2) presenta una desviación en sus datos, tal como se puede ver en la figura 38.

**Figura 38**

Ensayo de CFE con Havoline MD-3 a 100°C



Nota: Ensayos de CFE realizados a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperatura de: 100°C. Las líneas continuas representan las ecuaciones de ajuste de cada copa.

Los datos de CFE se ajustan mejor a un polinomio de segundo grado que a una función lineal, como se muestra en la tabla 15, ya que se obtienen valores más elevados de  $R^2$ , además esta tendencia no lineal se acentuó más conforme se incrementó la temperatura del ensayo.

**Tabla 15**

Error de ensayos de CFE (MD-3)

Temp.	Copa	Error %	Ecuación de ajuste	$R^2$	Función de corrección
20°C	1	-	$\tau = 8.51E - 5\dot{\gamma}^2 + 0.061\dot{\gamma} + 1.18E - 3$	0.999	-

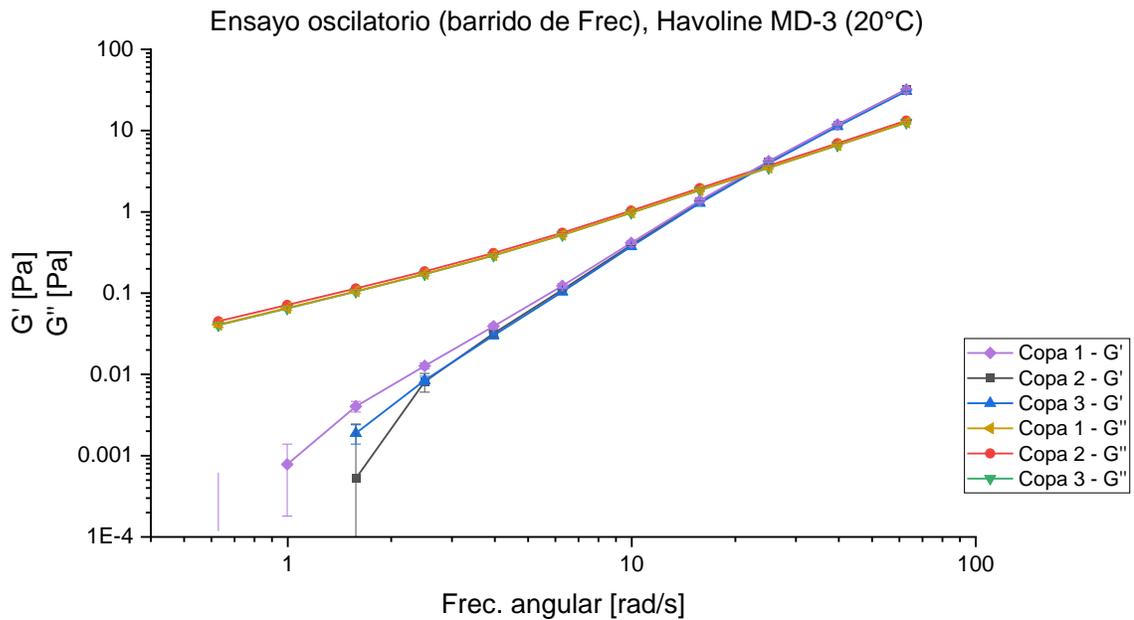
Temp.	Copa	Error %	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>	Función de corrección
20°C	2	6.07	$\tau = 4.38E - 5\dot{\gamma}^2 + 0.064\dot{\gamma} - 2.04E - 3$	0.996	1.94292 + $\frac{-0.06334\dot{\gamma} + 5.14E - 3}{4.38E - 5\dot{\gamma}^2 + 0.064\dot{\gamma} - 2.04E - 3}$
20°C	3	11.07	$\tau = 4.32E - 5\dot{\gamma}^2 + 0.071\dot{\gamma} - 8.8E - 4$	0.999	1.9699 + $\frac{-0.07886\dot{\gamma} + 2.91E - 3}{4.32E - 5\dot{\gamma}^2 + 0.071\dot{\gamma} - 8.8E - 4}$
40°C	1	-	$\tau = 2.15E - 4\dot{\gamma}^2 + 0.032\dot{\gamma} + 4.15E - 4$	0.995	-
40°C	2	1.26	$\tau = 2.18E - 4\dot{\gamma}^2 + 0.029\dot{\gamma} + 3.73E - 3$	0.994	-
40°C	3	1.09	$\tau = 2.22E - 4\dot{\gamma}^2 + 0.031\dot{\gamma} + 1.36E - 3$	0.996	-
100°C	1	-	$\tau = 2.34E - 4\dot{\gamma}^2 + 0.006\dot{\gamma} + 1.25E - 3$	0.992	-
100°C	2	0.82	$\tau = 1.93E - 4\dot{\gamma}^2 + 0.007\dot{\gamma} - 3.24E - 3$	0.991	-
100°C	3	0.51	$\tau = 2.22E - 4\dot{\gamma}^2 + 0.006\dot{\gamma} - 6.75E - 5$	0.994	-

Nota: Se considera a la copa 1 como patrón para las mediciones de error, para errores menores al 2% no se considera una función de corrección.

**Ensayos oscilatorios con Havoline MD-3.** En los ensayos de barrido de frecuencia se procede de igual forma, empezando con ensayos a 20°C, con lo cual se obtiene datos muy similares con las tres geometrías, por lo que las curvas se montan unas sobre otras y no son fáciles de distinguir, como lo muestra la figura 39. Para el módulo elástico se aprecia una mayor dispersión de los datos iniciales, por lo que son excluidos del análisis.

### Figura 39

*Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia con Havoline MD-3 a 20°C*

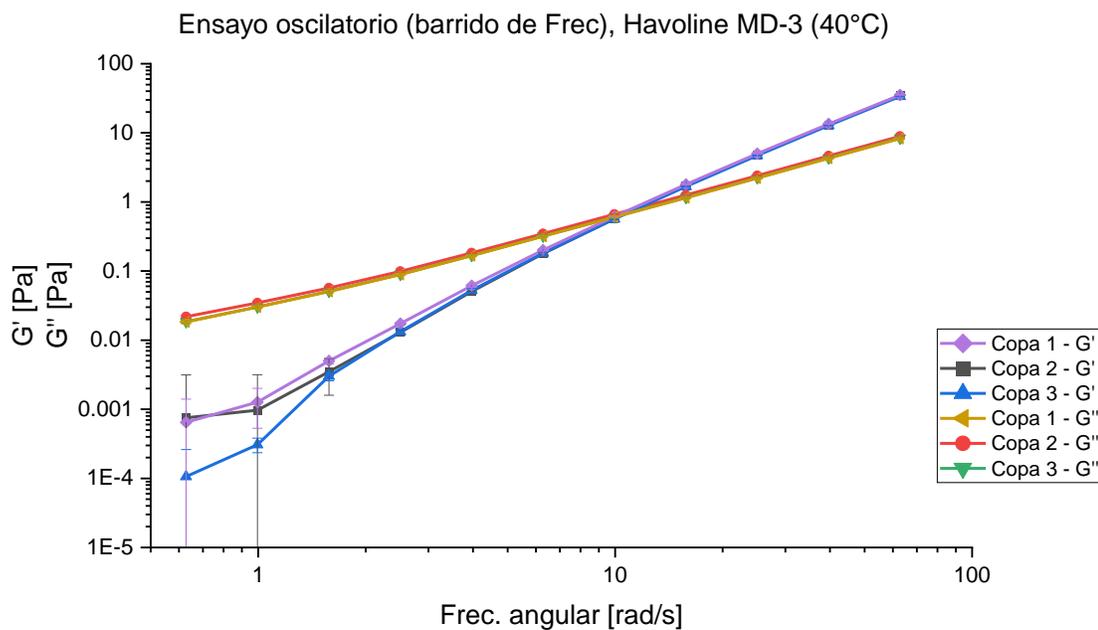


Nota: Ensayo oscilatorio (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperatura de: 20°C.

Al realizar el ensayo a una temperatura de 40°C, se puede observar que el punto de intersección de los módulos viscoso  $G''$  y elástico  $G'$  sufre un corrimiento hacia abajo, esta tendencia se puede ver en las tres copas empleadas, según se muestra en la figura 40.

#### **Figura 40**

*Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia con Havoline MD-3 a 40°C*

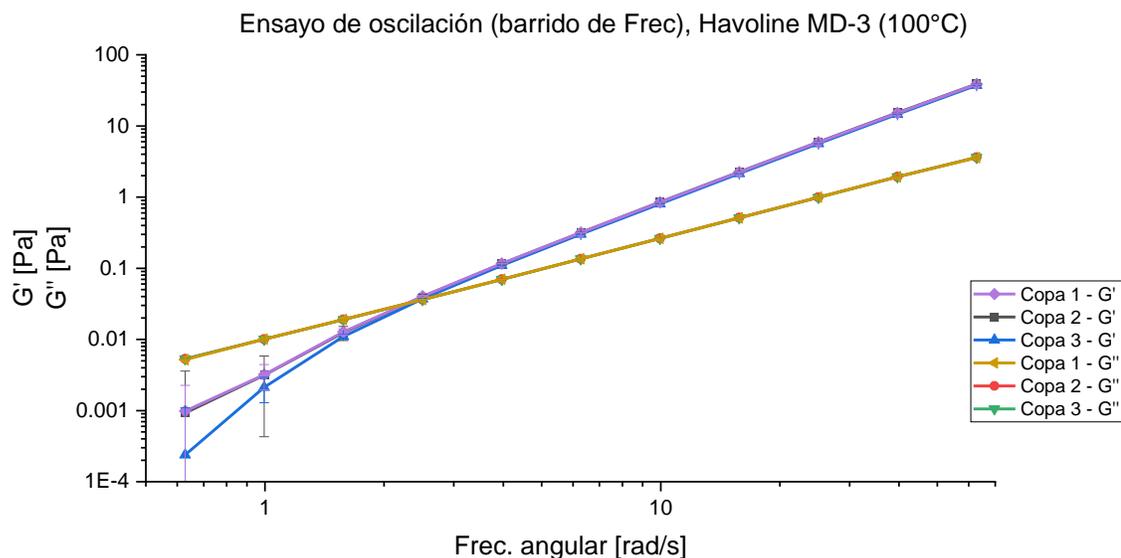


Nota: Ensayo oscilatorio (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperatura de: 40°C. Las curvas se sobreponen por la proximidad de los datos.

Al realizar los ensayos a la temperatura de 100°C se puede ver como el punto de intersección de las curvas continúa desplazándose hacia abajo, este comportamiento se repite en las tres geometrías analizadas, como se puede apreciar en la figura 41.

#### **Figura 41**

*Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia con Havoline MD-3 a 100°C*



Nota: Ensayo oscilatorio (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperatura de: 100°C. Las curvas se sobrepone por la proximidad de los datos.

Para los ensayos oscilatorios con barrido de frecuencia se puede apreciar que los primeros datos tienen cotas de error muy altas, por lo que descarta estos primeros puntos. Además, no se establece curvas de ajuste ni funciones de corrección debido a que los errores son muy pequeños (menores al 1%), como lo muestra la siguiente tabla.

**Tabla 16**

*Error de ensayos oscilatorios con barrido de frecuencia (MD-3)*

Temperatura	Copa	Módulo	Error %
20°C	2	G'	0.70%
20°C	3	G'	0.65%
20°C	2	G''	0.66%
20°C	3	G''	0.63%
40°C	2	G'	0.65%

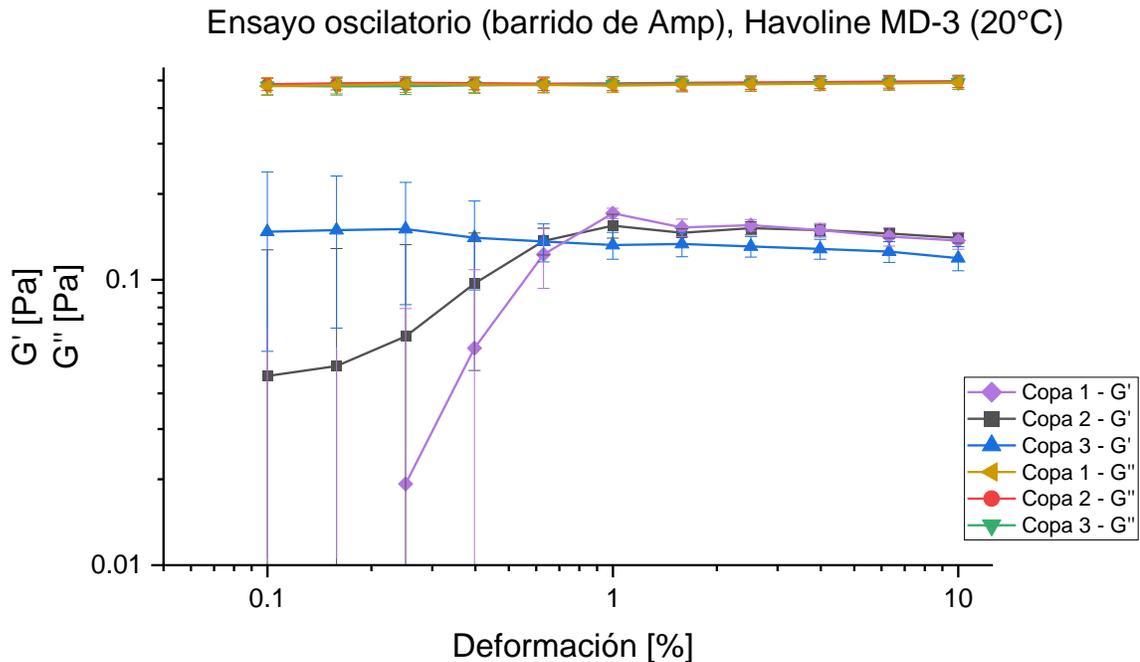
Temperatura	Copa	Módulo	Error %
40°C	3	G'	0.51%
40°C	2	G''	0.88%
40°C	3	G''	0.82%
100°C	2	G'	0.76%
100°C	3	G'	0.44%
100°C	2	G''	0.35%
100°C	3	G''	0.29%

Nota: El error porcentual es obtenido tomando como medida real los valores obtenidos con la copa 1.

En los ensayos oscilatorios con barrido de amplitud se observa que en el módulo elástico G' la copa fabricada presenta un desfase respecto de las mediciones obtenidas con las copas 1 y 2, mientras los datos del módulo viscoso G'' presentan una misma tendencia entre las tres copas. Tal como se muestra en la imagen 42.

**Figura 42**

*Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud con Havoline MD-3 a 20°C*

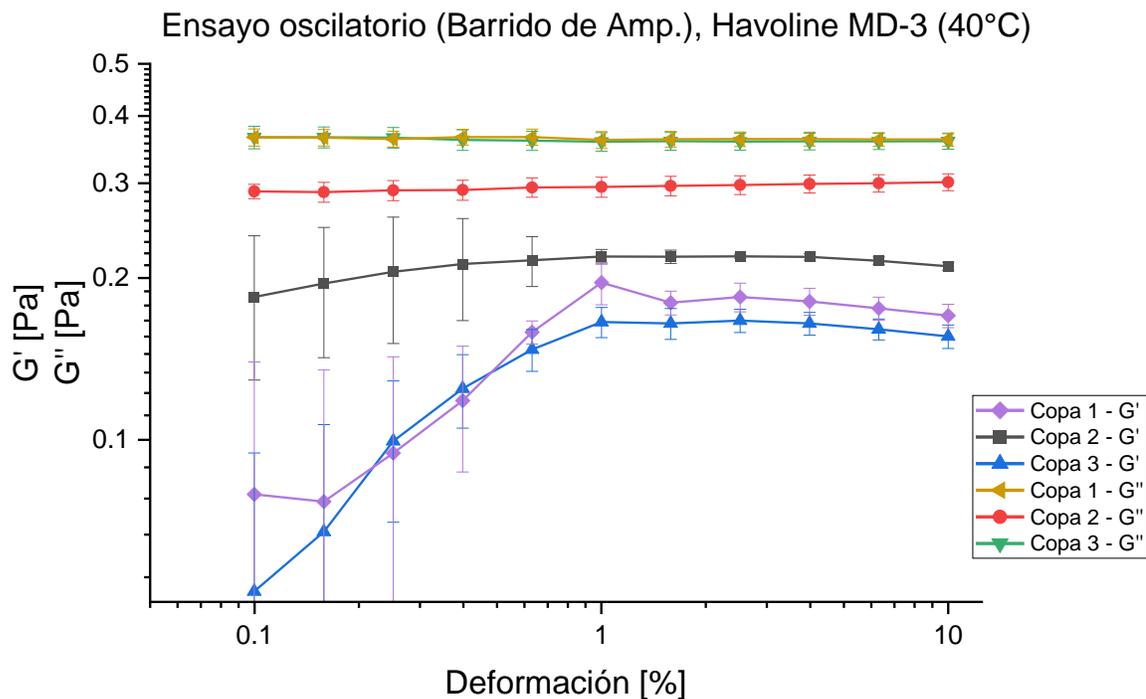


Nota: Ensayos oscilatorios (barrido de amplitud) a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperaturas de: 20°C. Los datos iniciales presentan barras de error grandes por lo que se excluyen del análisis.

Al realizar el ensayo a una temperatura de 40°C se puede ver cómo, con todas las geometrías, los módulos elástico y viscoso se acercan mediante un corrimiento vertical, en el cual el  $G'$  asciende y  $G''$  desciende. También se puede ver que los datos obtenidos con la geometría desgastada (copa 2) presenta un desfase respecto a los datos obtenidos con las otras geometrías, como lo muestra la figura 43.

### Figura 43

Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud con Havoline MD-3 a 40°C

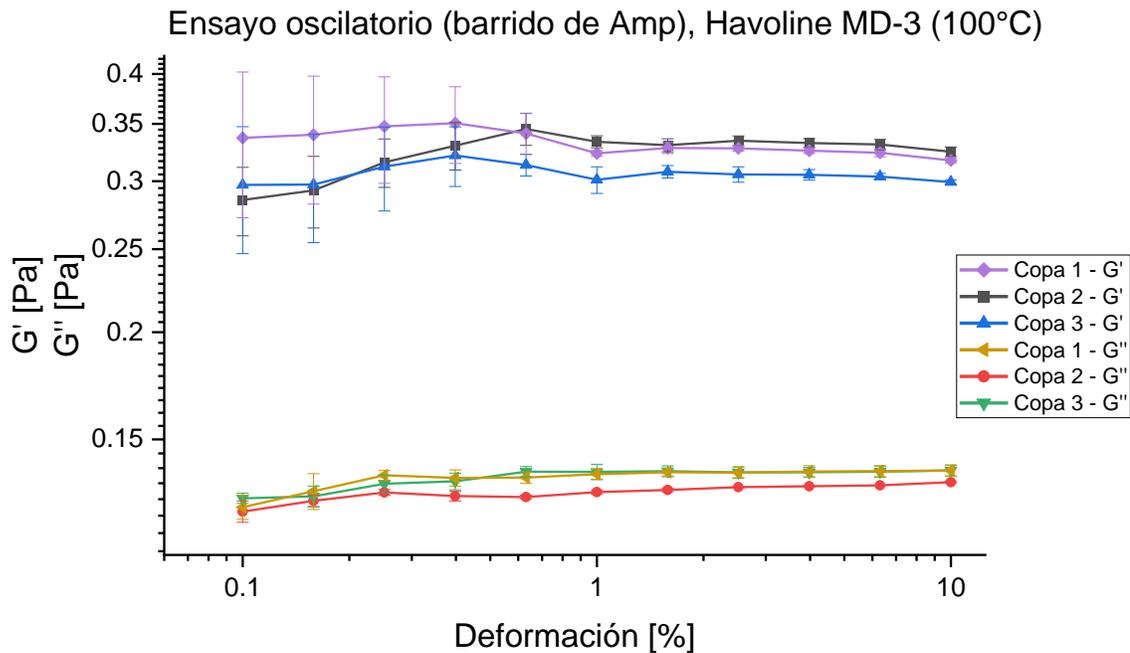


Nota: Ensayos oscilatorios (barrido de amplitud) a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperaturas de: 40°C. Los datos iniciales presentan barras de error grandes por lo que se excluyen del análisis.

En los ensayos oscilatorios con barrido de amplitud se observa que en el módulo elástico  $G'$  sube a la vez que el módulo viscoso  $G''$  baja, de esta manera se evidencia que para una temperatura de 100°C la gráfica del módulo elástico se encuentra sobre la del módulo viscoso, como se muestra en la figura 44.

#### Figura 44

Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud con Havoline MD-3 a 100°C



Nota: Ensayos oscilatorios (barrido de amplitud) a muestras de 70 ml de Havoline ATF MD-3 con temperaturas de: 100°C. Los datos iniciales presentan barras de error grandes por lo que se excluyen del análisis.

Las gráficas de los ensayos con barrido de amplitud presentan desplazamientos en el eje y, por lo que se pueden ajustar las curvas de las copas 2 y 3 mediante un factor de corrección como se muestra en la tabla.

**Tabla 17**

*Error de ensayos oscilatorios con barrido de amplitud (MD-3)*

Temperatura	Copa	Módulo	Error %	Factor de corrección
20°C	2	G'	4.61%	1.03
20°C	3	G'	14.37%	1.15
20°C	2	G''	1.41%	-

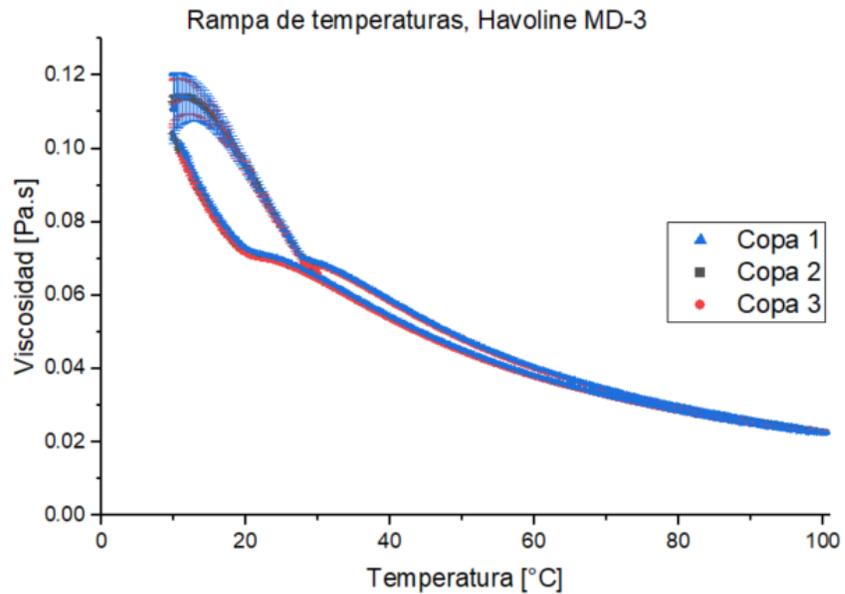
Temperatura	Copa	Módulo	Error %	Factor de corrección
20°C	3	G''	0.41%	-
40°C	2	G'	22.26%	0.80
40°C	3	G'	9.53%	1.09
40°C	2	G''	17.84%	1.20
40°C	3	G''	0.97%	-
100°C	2	G'	2.47%	0.98
100°C	3	G'	6.79%	1.06
100°C	2	G''	4.10%	1.04
100°C	3	G''	0.47%	-

Nota: Para errores menores a 2% no se considera un factor de corrección.

**Rampa de temperaturas con Havoline MD-3.** Los datos obtenidos en estos ensayos presentan barras de error al inicio de la prueba, por lo que se excluyen a los datos iniciales de este análisis. Por otro lado, los datos obtenidos fueron muy similares, teniendo un error del 0.77% para la copa 2 y del 0.92% para la copa 3. Por lo que las curvas de las tres copas se sobreponen, como se puede ver en la figura 45.

#### Figura 45

*Rampa de temperaturas con Havoline MD-3*

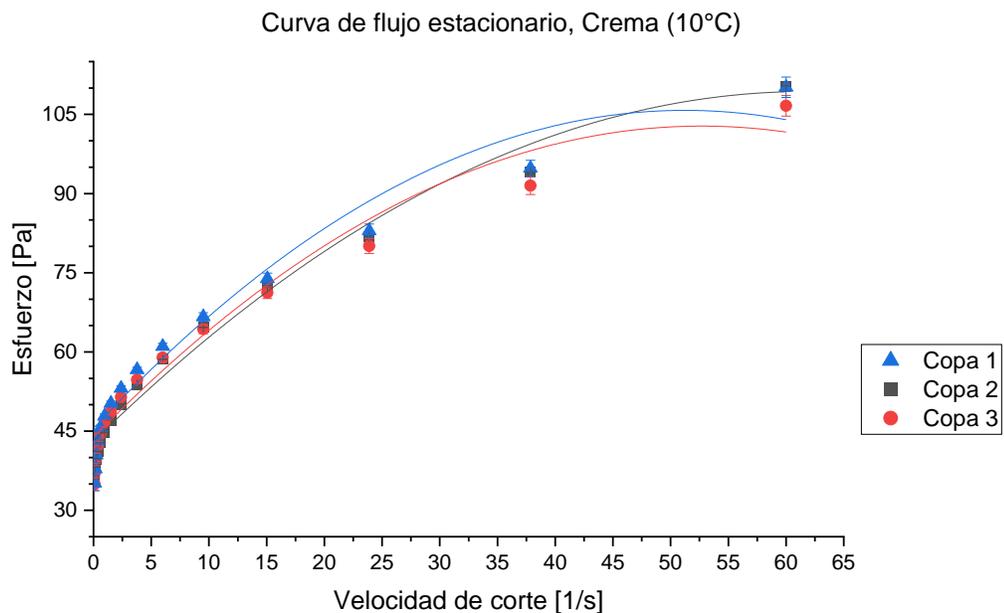


Nota: Los datos obtenidos con las tres copas se sobreponen, por lo no se logran apreciar completamente los datos de las copas 2 y 3.

**Ensayos de CFE con crema Lubriderm.** En los ensayos realizados a 10°C se puede advertir la presencia de un esfuerzo de fluencia o esfuerzo umbral, que se da antes que la muestra empiece a fluir, además de que los datos se ajustan mediante una función cuadrática, como lo muestra la figura 46.

**Figura 46**

*Ensayo de CFE con crema a 10°C*

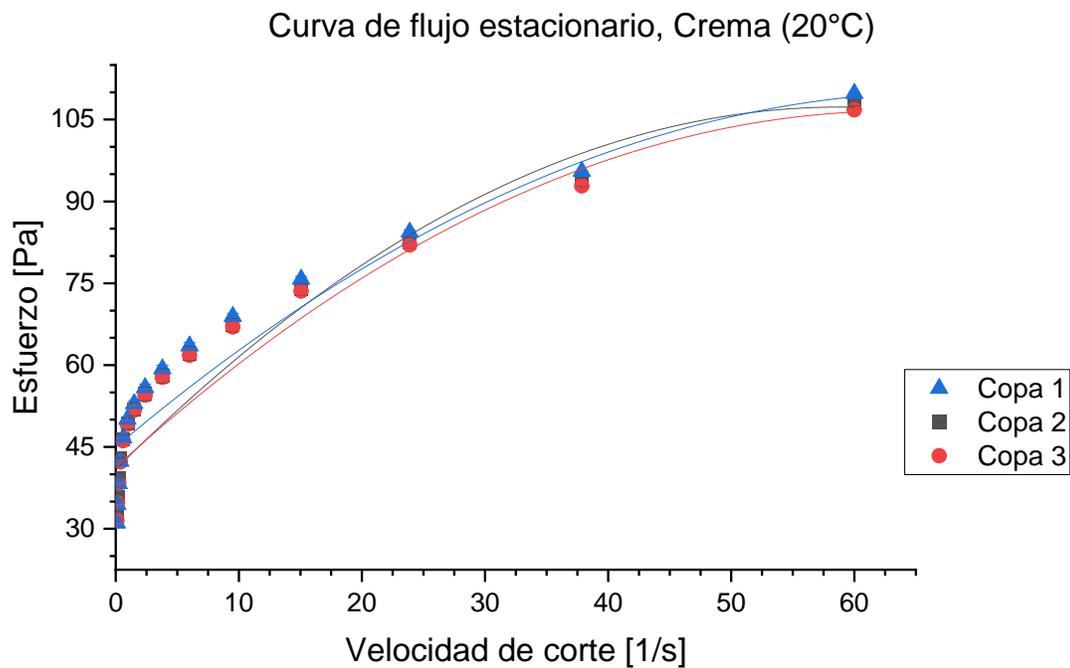


Nota: Ensayos de CFE realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperatura de: 10°C. Las líneas continuas representan las ecuaciones de ajuste de cada copa.

A una temperatura de 20°C se puede ver que los datos son muy similares a los obtenidos a la temperatura de 10°C, como muestra la figura 47, además la geometría fabricada (copa 3) presenta una ligera desviación de los datos obtenidos con las otras geometrías.

#### **Figura 47**

*Ensayo de CFE con crema a 20°C*

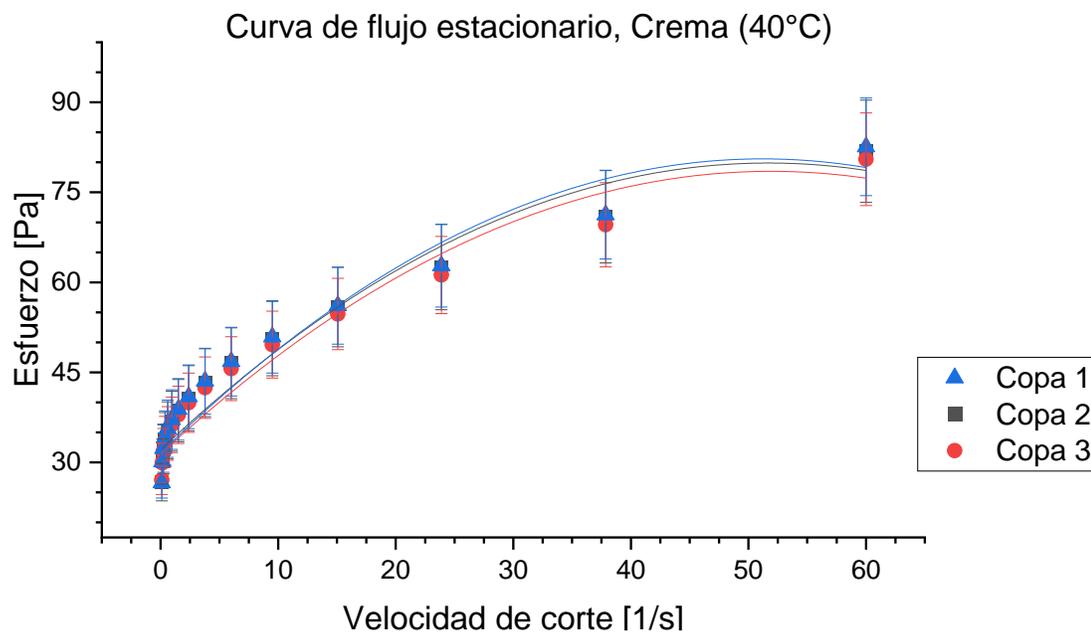


Nota: Ensayos de CFE realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperatura de: 20°C. Las líneas continuas representan las ecuaciones de ajuste de cada copa.

Para los ensayos realizados a una temperatura de 40°C se puede ver que las barras de error crecen considerablemente como se puede visualizar en la figura 48.

#### **Figura 48**

*Ensayo de CFE con crema a 40°C*



Nota: Ensayos de CFE realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperatura de: 40°C. Las líneas continuas representan las ecuaciones de ajuste de cada copa.

La siguiente tabla muestra los errores obtenidos en los ensayos de CFE para cada copa, además de la ecuación de ajuste y una función de corrección para las copas 2 y 3.

**Tabla 18**

*Error de ensayo CFE (crema)*

Temp.	Copa	Error %	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>	Función de corrección
10°C	1	-	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 2.35\dot{\gamma} + 45.52$	0.921	-
10°C	2	3.53	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 2.15\dot{\gamma} + 43.07$	0.979	$1 + \frac{0.2\dot{\gamma} + 2.45}{-0.02\dot{\gamma}^2 + 2.15\dot{\gamma} + 43.07}$
10°C	3	2.73	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 2.24\dot{\gamma} + 43.84$	0.922	$1 + \frac{0.11\dot{\gamma} + 1.68}{-0.02\dot{\gamma}^2 + 2.24\dot{\gamma} + 43.84}$
20°C	1	-	$\tau = -0.01\dot{\gamma}^2 + 1.91\dot{\gamma} + 44.98$	0.981	-
20°C	2	2.36	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 2.26\dot{\gamma} + 40.89$	0.966	$0.5 + \frac{0.78\dot{\gamma} + 24.535}{-0.02\dot{\gamma}^2 + 2.26\dot{\gamma} + 40.89}$

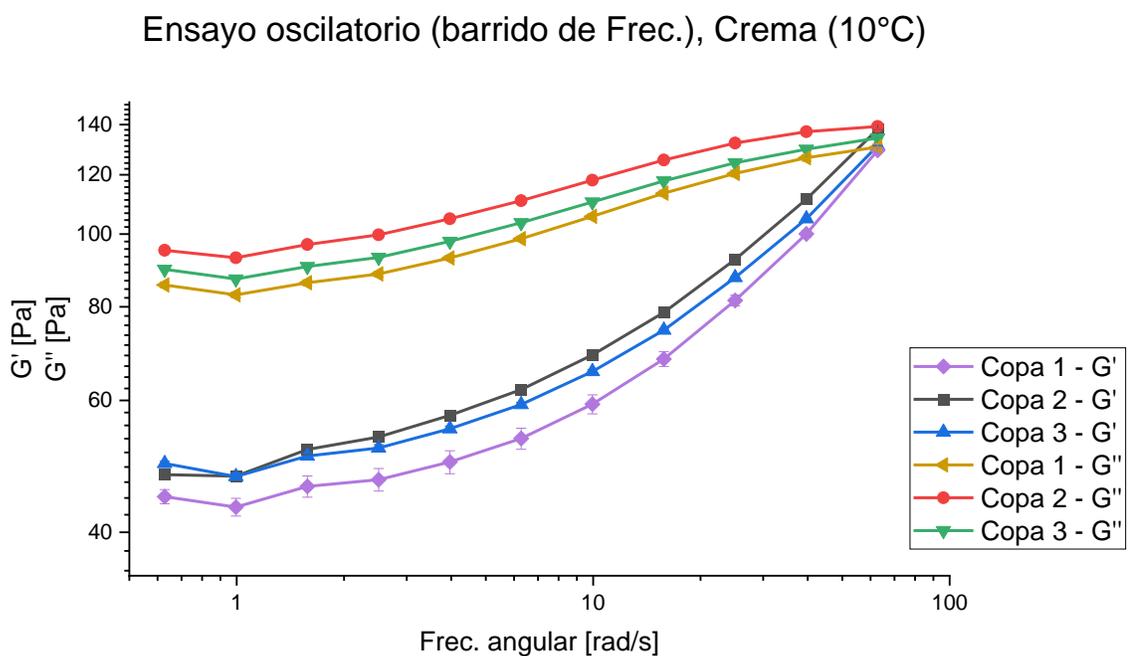
Temp.	Copa	Error %	Ecuación de ajuste	R <sup>2</sup>	Función de corrección
20°C	3	1.98	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 2.06\dot{\gamma} + 41.30$	0.981	-
40°C	1	-	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 1.91\dot{\gamma} + 31.59$	0.893	-
40°C	2	0.51	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 1.85\dot{\gamma} + 32.09$	0.905	-
40°C	3	2.14	$\tau = -0.02\dot{\gamma}^2 + 1.81\dot{\gamma} + 31.41$	0.909	$1 + \frac{0.1\dot{\gamma} + 0.18}{-0.02\dot{\gamma}^2 + 1.81\dot{\gamma} + 31.41}$

Nota: para errores menores a 2% no se consideran funciones de corrección.

**Ensayos oscilatorios con crema Lubriderm.** Para ensayos a 10°C se puede ver como las geometrías desgastada (copa 3) y fabricada (copa 3) presentan un corrimiento hacia arriba, sin embargo, tanto como para el módulo elástico  $G'$ , como para el módulo viscoso  $G''$ , la geometría fabricada arroja datos más próximos a la geometría nueva (copa 1), según lo muestra la figura 49.

**Figura 49**

*Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia (crema a 10°C)*

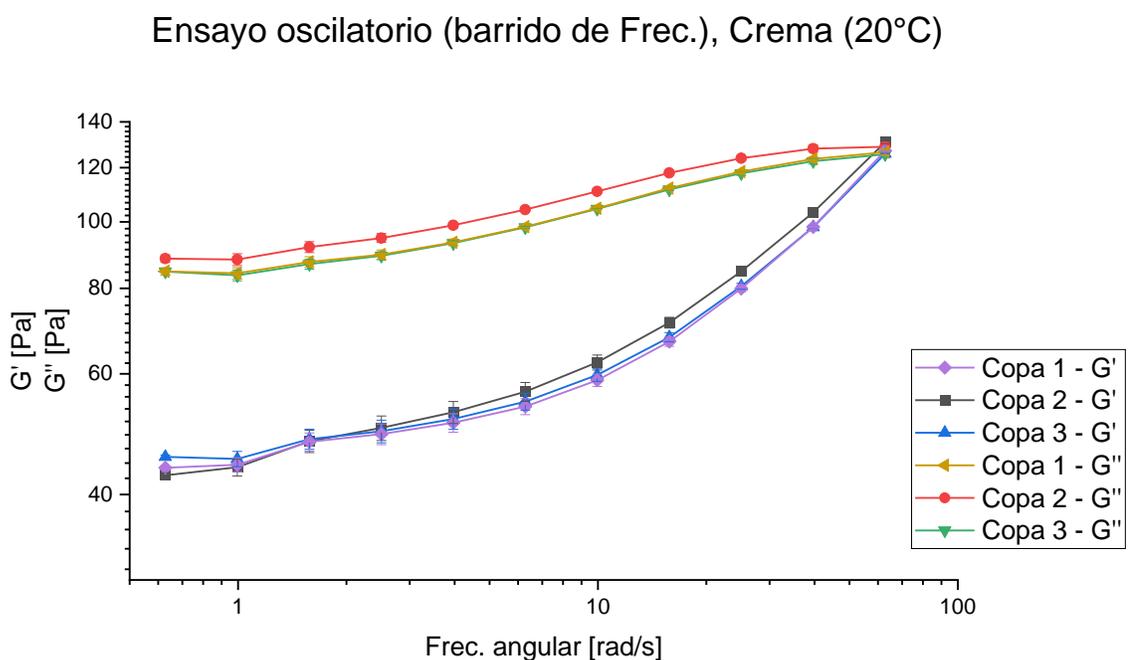


Nota: Ensayo oscilatorio (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperatura de: 10°C.

Para ensayos a 20°C se mantiene la desviación de la geometría desgastada respecto de los datos de las otras geometrías, como se puede ver en la figura 50.

### Figura 50

Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia (crema a 20°C)

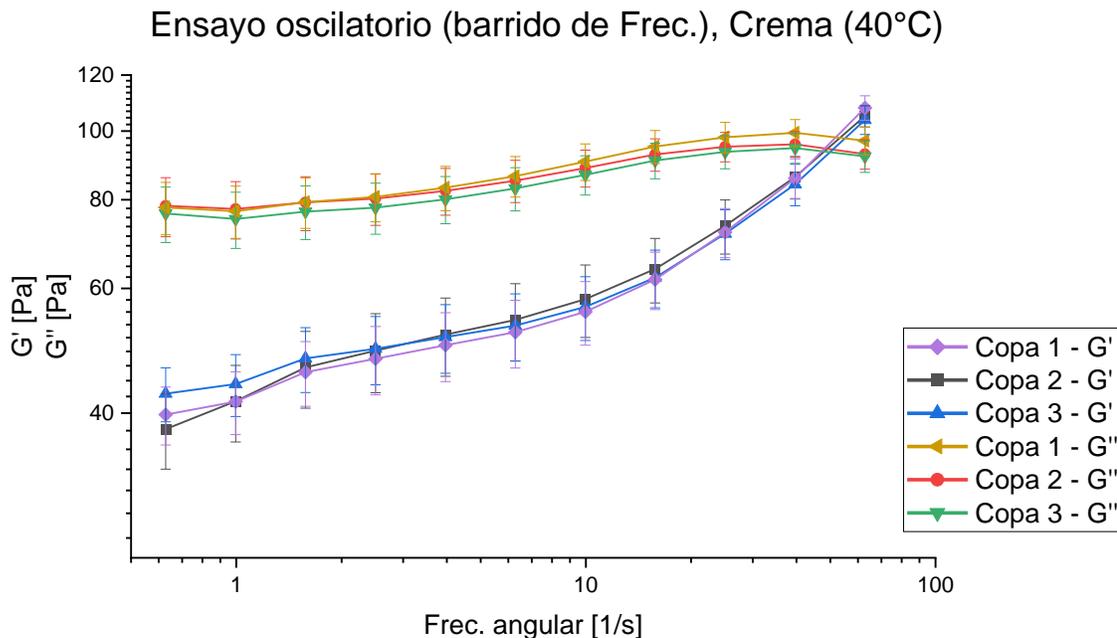


Nota: Ensayo oscilatorio (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperatura de: 20°C.

Para los ensayos con barrido de frecuencia a una temperatura de 40°C puede apreciarse un incremento en las barras de error, tal como ocurrió en los ensayos de CFE, así lo muestra la figura 51.

### Figura 51

Ensayo oscilatorio con barrido de frecuencia (crema a 40°C)



Nota: Ensayo oscilatorio (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperatura de: 40°C.

Al incrementar la temperatura del ensayo las gráficas se agrupan, por lo que se disminuyen los porcentajes de error, sin embargo, para una temperatura de 40°C las barras de error se incrementan de forma notable según muestra la tabla.

**Tabla 19**

*Error ensayos oscilatorio con barrido de frecuencia (crema)*

Temperatura	Copa	Módulo	Error %	Factor de corrección
10°C	2	$G'$	12.51%	0.87
10°C	3	$G'$	8.71%	0.91
10°C	2	$G''$	11.0%	0.90
10°C	3	$G''$	4.34%	0.96

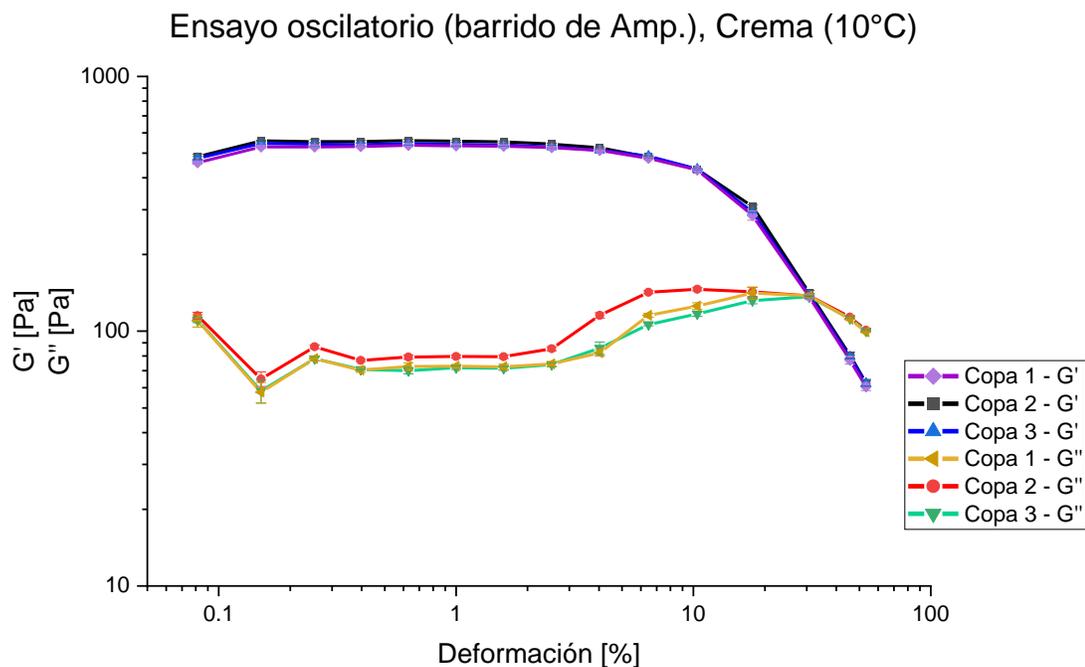
Temperatura	Copa	Módulo	Error %	Factor de corrección
20°C	2	G'	3.73%	0.97
20°C	3	G'	1.41%	-
20°C	2	G''	4.82%	0.95
20°C	3	G''	0.46%	-
40°C	2	G'	2.67%	0.98
40°C	3	G'	2.08%	0.98
40°C	2	G''	1.82%	-
40°C	3	G''	3.78%	1.04

Nota: Para los datos con un error menor a 2% no se considera un factor de corrección.

En los ensayos oscilatorios con barrido de amplitud a 10°C se nota una desviación localizada en el módulo viscoso G'' de la copa desgastada como puede verse en la figura 52.

**Figura 52**

*Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud (crema a 10°C)*

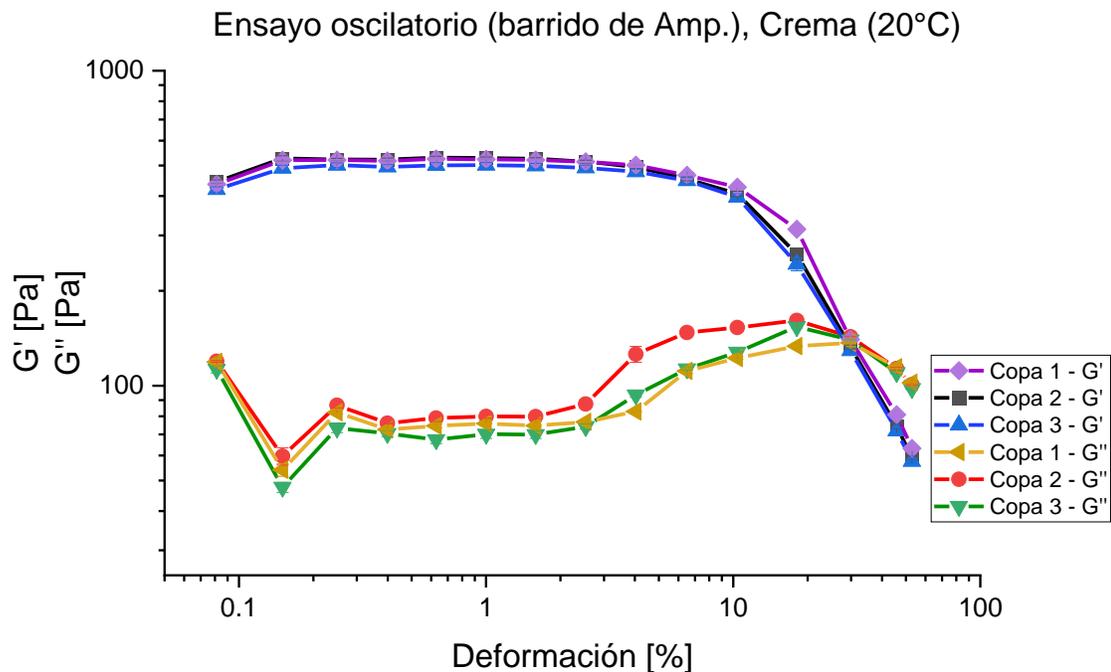


Nota: Ensayos oscilatorios (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperaturas de: a) 10°C, b) 20°C y c) 40°C.

Al comparar los datos obtenidos por las tres copas en los ensayos a temperatura de 20°C, mostrados en la figura 53, muestran una tendencia a dispersarse, mientras que en los ensayos a 10°C las curvas se encontraban sobrepuestas.

### Figura 53

Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud (crema a 20°C)



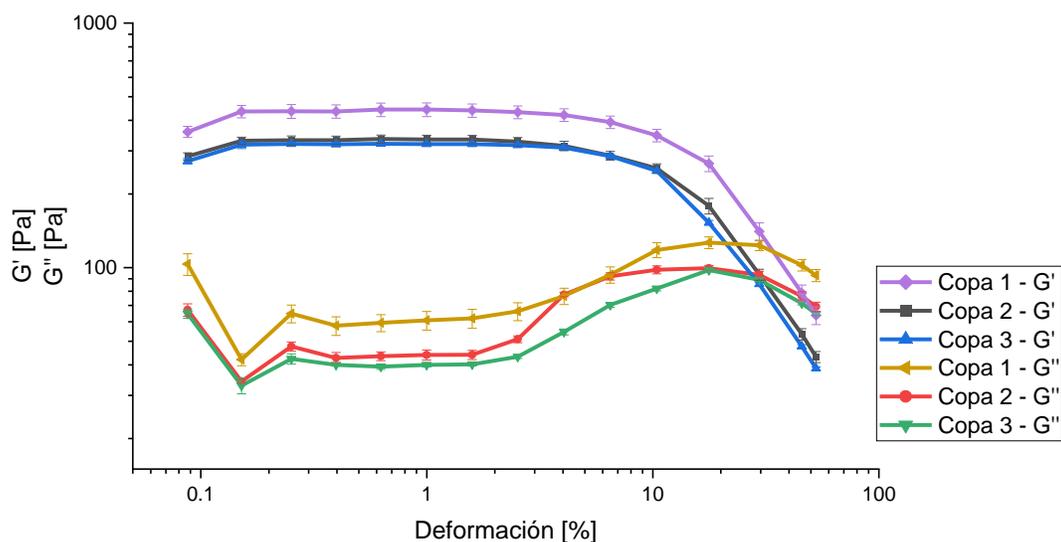
Nota: Ensayos oscilatorios (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperaturas de: a) 10°C, b) 20°C y c) 40°C.

En los ensayos a 40°C, se puede observar que los valores obtenidos por las copas 2 y 3 se han alejado de los datos obtenidos al emplear la geometría nueva (copa 1), como se puede ver en la siguiente figura.

#### **Figura 54**

*Ensayo oscilatorio con barrido de amplitud (crema a 40°C)*

### Ensayo oscilatorio (barrido de Amp.), Crema (40°C)



Nota: Ensayos oscilatorios (barrido de frecuencia) realizados a muestras de 70 ml de crema Lubriderm con temperaturas de: a) 10°C, b) 20°C y c) 40°C.

La tabla muestra los valores de error y factores de corrección para los datos obtenidos en los ensayos con barrido de amplitud a muestras de crema Lubriderm.

**Tabla 20**

*Error ensayos oscilatorio con barrido de amplitud (crema)*

Temperatura	Copa	Módulo	Error %	Factor de corrección
10°C	2	$G'$	4.07%	0.96
10°C	3	$G'$	1.98%	-
10°C	2	$G''$	10.97%	0.89
10°C	3	$G''$	1.69%	-
20°C	2	$G'$	1.12%	-
20°C	3	$G'$	4.30%	1.04
20°C	2	$G''$	12.67%	0.88

Temperatura	Copa	Módulo	Error %	Factor de corrección
20°C	3	G''	6.77%	1.07
40°C	2	G'	26.62%	1.25
40°C	3	G'	30.43%	1.30
40°C	2	G''	21.99%	1.22
40°C	3	G''	30.49%	1.30

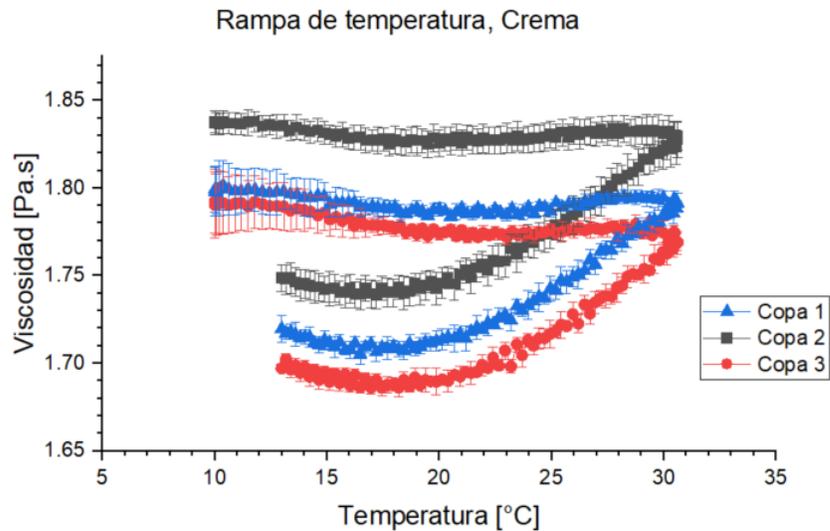
Nota: no se consideran factores de corrección para errores menores al 2%.

**Rampa de temperaturas con crema Lubriderm.** Para estos ensayos se reduce la temperatura máxima, para prevenir datos dispersos como en los ensayos anteriores, por lo que la variación de temperatura se realiza entre los 10°C y los 30°C.

La copa 2 presenta una mayor repetibilidad en los datos iniciales, sin embargo, las mediciones con esta geometría presentan un error del 2.07%, mientras la copa 3 tiene un error del 0.96%, como se puede apreciar en la figura.

### Figura 55

*Rampa de temperaturas (crema)*



Nota: Se puede apreciar mayor proximidad entre los resultados de la copa fabricada y la copa nueva.

### Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

El proceso de fabricación, permitió reducir los costos de adquisición de este accesorio, a un valor cinco veces menor al original, teniendo una excelente relación costo-beneficio.

La metodología experimental desarrollada y aplicada en este trabajo permitió evaluar, de manera satisfactoria, el desempeño de la geometría fabricada y de la geometría que presenta desgaste.

La geometría fabricada reportó datos con un error porcentual menor a los obtenidos con la geometría que presenta desgaste en su pared interna, la cual mostró porcentajes de error más elevados, sobre todo en ensayos oscilatorios, donde la superficie de la copa tiene una fuerte influencia.

Para ensayos de rampa de temperaturas la geometría fabricada presenta buenas aproximaciones, con errores menores al 1%, lo que sugiere que, el material seleccionado para fabricar la copa, permite una transferencia de calor apropiada para realizar este tipo de pruebas.

En función de los datos obtenidos se puede recomendar que la geometría de cilindros concéntricos que ha sido fabricada reemplace a la geometría que presenta desgaste en sus paredes internas, y esta, sea empleada preferentemente para ensayos de CFE y rampa de temperaturas.

Se puede recomendar proponer el desarrollo de los siguientes proyectos a futuro:

- Estudio de la factibilidad para el desarrollo de geometrías inferiores descartables aplicadas al análisis de sustancias abrasivas en el reómetro Discovery HR-2.
- Diseño, construcción y validación de aditivos removibles para la mitigación del efecto de deslizamiento en la pared de geometrías inferiores de cilindros concéntricos.
- Estudio de la influencia de diferentes grados de rugosidad en la mitigación del efecto de deslizamiento de la pared mediante el proceso de chorro de arena.
- Estudio de las propiedades reológicas del fluido de transmisión automática Havoline MD-3

### **Bibliografía**

Ancey, C. (2005). *Introduction to Fluid Rheology*. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- Barajas, F., Mojica, J., Vasquez, C., & Estupiñan, H. (2007). Desarrollo de un proceso de anodizado electrolitico sobre duraluminio en H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> con electrodeposicion de niquel. *Scientia Et Technica*, 279-283.
- Barnes, H. (1995). A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers Its cause, character, and cure. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 222-224, 229.
- Barnes, H., Hutton, J., & Walters, K. (1989). *An Introduction to Rheology*. Amsterdam: Elsevier.
- Bohman. (2022). *BOHMAN - PRODUCTOS*. Retrieved from bohman.com.ec:  
<https://bohman.com.ec/shop/product/duraluminio-para-moldes-plasticos-prodax-alumec-89-barra-redonda-27148#attr=23249>
- Chen, Z., Ahmed, R., Miska, S., Takach, N., Yu, M., Pickell, M., & Saasen, A. (2015). Rheology characterization of polymer drilling foams using a novel apparatus. *ANNUAL TRANSACTIONS OF THE NORDIC RHEOLOGY SOCIETY*, 111-119.
- Diaz, R. (2018). *Reología aplicada a sistemas alimentarios*. Guayaquil: Grupo COMPAS.
- Flatt, R., Martys, N., & Bergström, L. (2004). The Rheology of Cementitious Materials. *MRS bulletin*.
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. McGraw-Hill.
- Kaufman, G. (2000). *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. ASM International.
- Marchesini, F., Naccache, M., Abdu, A., Aliche, A., & Mendes, P. (2019). Rheological Characterization of Yield-Stress Materials: Flow Pattern and Apparent Wall Slip. *Applied Rheology*, 5,8,9.

- Meeker, S., Bonnecaze, R., & Cloitre, M. (2004). Slip and flow in pastes of soft particles: Direct observation and rheology. *Journal of Rheology*, 1298-1307.
- Mewis, J., & Wagner, N. (2009). Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science*, 215, 216.
- Mohan, M., Rahul, A., Van Tittelboom, K., & De Schutter, G. (2021). Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. *Cement and Concrete Research*, 1, 5-8.
- Morrison, F. A. (2001). *Understanding Rheology*. New York: Oxford University Press.
- Murugaiya, S., Mutalikdesai, A., & Ramasesha, S. (2015). Anodization of Aluminium using a fast two-step process. *Indian Academy of Sciences*.
- Pandey, G., Linga, P., & Sangwai, J. (2016). High pressure rheology of gas hydrate formed from multiphase systems using modified Couette rheometer. *Scientific Instruments*, 2-5.
- Park, C., Noh, M., & Park, T. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 842-845, 848.
- Perrot, A., Rangeard, D., Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2019). Extrusion of cement-based materials - an overview. *RILEM Technical Letters*, 91-94, 96.
- Raja, V., & Fernandes, K. (2007). *Reverse Engineering – An Industrial Perspective*. London: Springer.
- Schey, J. (2000). *Procesos de manufactura*. Ontario: McGraw-Hill.
- Shamua, T., & Håkansson, U. (2019). Rheology of cement grouts: On the critical shear rate and no-slip regime in the Couette geometry. *Cement and Concrete Research*, 3,10-12.

- TA Instruments. (2021, Junio). *DISCOVERY HYBRID RHEOMETERS TEMPERATURE SYSTEMS AND ACCESSORIES*. Retrieved from TA Instruments: <https://www.tainstruments.com/products/rheology/discovery-hybrid-accessories/>
- TA Instruments. (2021, Septiembre 26). *tainstruments.com/products*. Retrieved from TA Instruments: <https://www.tainstruments.com/products/rheology/>
- Ulrich, K., & Eppinger, S. (2012). *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw-Hill.
- Várady, T., Martin, R., & Cox, J. (1997). Reverse engineering of geometric models - An introduction. *Computer-Aided Design*.
- VIWA S.A. (2016). *www.viwa.com.mx*. Retrieved from Tornos CNC: <http://viwacnc.com/index.php?seccion=detalle&producto=45>
- Wang, S.-Q., Ravindranath, S., & Boukany, P. (2011). Homogeneous Shear, Wall Slip, and Shear Banding of Entangled Polymeric Liquids in Simple-Shear Rheometry: A Roadmap of Nonlinear Rheology. *Macromolecules perspective*, 183-185.
- Waterman, N., & Dickens, P. (1994). Rapid Product Development in the USA, Europe and Japan. *World Class Design to Manufacture*, 27-35.