

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**MASTER UNIVERSITARIO EN BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE  
PROPIEDADES, TEXTURA Y  
ESTABILIDAD DE MAYONESAS  
COMERCIALES**

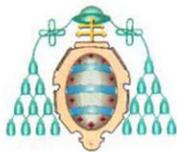
**TRABAJO FIN DE MASTER**

**POR**

**YARIMA DEL CARMEN PÉREZ CHIQUITO**

**JULIO, 2013**





Master en Biotecnología Alimentaria  
Universidad de Oviedo  
C/Julián Clavería s/n. 33071 Oviedo. España  
Tel. 985106226. Fax 985103434. <http://www.unioviedo.es/MBTA>



### PROFESOR TUTOR:

Dr. Dña. M<sup>a</sup> del Carmen Pazos Medina, Catedrática de Ingeniería Química del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Oviedo.

### CERTIFICA:

Que Dña. **Yarima del Carmen Pérez Chiquito** ha realizado bajo mi dirección el Trabajo Fin de Master al que corresponde la presente memoria en el contexto de los estudios del Master Universitario en Biotecnología Alimentaria, 7<sup>a</sup> promoción curso 2012-2013.

Oviedo, 19 de julio de 2013

Dña. M<sup>a</sup> del Carmen Pazos Medina

V<sup>o</sup>B<sup>o</sup>

Mario Díaz Fernández

Coordinador del Master en Biotecnología Alimentaria

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a la Dra. Dña. Carmen Pazos Medina, por ofrecerme este proyecto, y por guiarme y aconsejarme durante la realización del mismo. Así mismo agradezco toda su dedicación, consejo e inestimables correcciones durante la redacción de este trabajo.

De igual forma quiero agradecer a Daniel Pando y a la Dra. Amanda Laca, por toda su colaboración, consejos, paciencia y amabilidad, durante las horas de trabajo en el laboratorio. Hicieron que me sintiera muy cómoda, segura y entretenida durante la realización de los experimentos.

Agradecimientos especiales a mis padres, por permitirme realizar este master, y por ser mi apoyo incondicional desde la distancia. A mi familia acá en España por ofrecerme cobijo, apoyo y cariño. Y a mi novio por todo su amor y fuerza para seguir cumpliendo metas.

Finalmente quiero agradecer a todos mis compañeros del master, así como a los profesores. Son personas que estoy encantada de haber conocido y que hicieron que me sintiera como en casa.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Emulsiones: definiciones y características.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2. Mayonesa.....</b>	<b>9</b>
2.2.1. <i>Mayonesa light</i> .....	14
<b>2.3. Fundamentos de reología.....</b>	<b>15</b>
2.3.1. <i>Clasificación de los fluidos</i> .....	16
2.3.2. <i>Análisis del comportamiento viscoelástico mediante ensayos oscilatorios o dinámicos</i> .....	18
<b>2.4. Fundamentos de texturometría.....</b>	<b>21</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Materiales.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2. Métodos de análisis.....</b>	<b>26</b>
3.2.1. <i>Determinación de la distribución de tamaños de gota o partícula</i> .....	26
3.2.2. <i>Determinación de la estabilidad</i> .....	29
3.2.3. <i>Determinación de las características reológicas</i> .....	31
3.2.4. <i>Determinación de propiedades texturales</i> .....	33
3.2.5. <i>Microscopía óptica</i> .....	37
3.2.6. <i>Diseño factorial de experimentos y análisis estadístico</i> .....	37
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1. Características reológicas.....</b>	<b>40</b>
4.1.1. <i>Curva de flujo</i> .....	40
4.1.2. <i>Barrido de frecuencia</i> .....	42
<b>4.2. Características de las emulsiones.....</b>	<b>43</b>
4.2.1. <i>Estabilidad</i> .....	43
4.2.2. <i>Distribución de tamaños de partícula</i> .....	47
4.2.3. <i>Microestructuras</i> .....	49
<b>4.3. Características texturales.....</b>	<b>50</b>
<b>4.4. Análisis estadístico de resultados.....</b>	<b>53</b>

<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>55</b>
<b>6. SÍMBOLOS.....</b>	<b>57</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>60</b>
<b>8. APENDICE.....</b>	<b>63</b>
<b>A.1. Características reológicas.....</b>	<b>64</b>
<b>A.2. Estabilidad.....</b>	<b>74</b>
<b>A.3. Distribución de tamaños de partícula.....</b>	<b>78</b>
<b>A.4. Análisis estadístico de resultados.....</b>	<b>83</b>

## RESUMEN

La mayonesa es una de las salsas más populares a nivel mundial, estando considerada como la salsa clásica por excelencia, debido a su fácil preparación a nivel doméstico y a su volumen de producción a nivel industrial. En España, el consumo de mayonesa se ha incrementado mucho, gracias a la producción creciente de una gran variedad de mayonesas, que han logrado satisfacer la demanda y necesidades de los consumidores.

En este sentido, el objetivo del presente trabajo era llevar a cabo un estudio comparativo de las propiedades de mayonesas comerciales de diferente tipo. Para ello, se realizaron ensayos a fin de determinar los principales parámetros reológicos, los parámetros texturales y las características de las emulsiones que las constituyen, como estabilidad, tamaño de partícula y microestructura. Los ensayos se programaron a partir de un diseño factorial de experimentos, basado en la comparación del tipo de aceite, contenido calórico y temperatura de la mayonesa. Se seleccionaron cuatro mayonesas que cumplieran con el diseño factorial y un quinto producto cuya característica principal era la ausencia de azúcar en su composición.

Los resultados de los ensayos mostraron que existen diferencias entre las mayonesas estudiadas. Además, se constató que los parámetros estudiados se veían principalmente afectados por el contenido calórico de la mayonesa, más que por el tipo de aceite. Asimismo, la temperatura en el intervalo aplicado no afectaba a los parámetros medidos.

Los resultados de este proyecto pueden ser de utilidad, tanto para consumidores, como para productores, ya que con la tecnología instrumental empleada se han puesto de manifiesto las diferencias físicas de algunas de las mayonesas existentes en el mercado.

## **ABSTRACT**

Mayonnaise is one of the most popular sauces worldwide. It is considered the classical sauce par excellence, due to its easy preparation at home and its volume of production at industrial scale. In Spain, the mayonnaise consumption has increased a lot, as a consequence of the production of different types of mayonnaise, which have made possible to meet consumers' demand and needs.

Therefore, the objective of this work was to carry out a comparative study of the properties of some commercial mayonnaises. To do this, several experiments were performed to determine the main rheological parameters, textural parameters and characteristics of emulsions, as stability, particle size and microstructure. A factorial design of experiments, comparing oil type, caloric content, and temperature of the mayonnaise, was applied. Four mayonnaises that met the factorial design, and also a fifth mayonnaise with the main feature of being sugarless were selected,

Experimental results showed that there are differences between the mayonnaises studied. Furthermore, it was observed that the parameters evaluated are mainly affected by the caloric content of mayonnaise, rather than oil type. In addition, the temperature in the range applied did not affect the measured parameters.

The results of this project might be useful to consumers and producers, since the instrumentation used was able to demonstrate the physical differences of some of the mayonnaises available on the market.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Evolución del consumo de mayonesa en los últimos años.....	3
Figura 2.1.	Emulsiones agua en aceite (W/O) y aceite en agua (O/W).....	6
Figura 2.2.	Fenómenos de desestabilización y ruptura de una emulsión.....	8
Figura 2.3.	Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.....	16
Figura 2.4.	Modelo de muelle y de amortiguador hidráulico.....	18
Figura 2.5.	Vector que representa el modulo complejo $G^*$ , con sus componentes $G'$ y $G''$ .....	20
Figura 3.1.	Malvern Mastersizer 2000.....	26
Figura 3.2.	Esquema del funcionamiento del Malvern Mastersizer 2000.....	27
Figura 3.3.	Esquema del cabezal de lectura del Turbiscan Lab Expert.....	29
Figura 3.4.	Tipos de graficas de análisis de estabilidad del equipo Turbiscan Lab Expert.....	30
Figura 3.5.	Esquema del reómetro HAAKE RS50.....	32
Figura 3.6.	Sensor de placas serradas (PP35).....	32
Figura 3.7.	Analizador TA.XTplus.....	34
Figura 3.8.	Set de ensayo de untabilidad.....	35
Figura 3.9.	Desarrollo del ensayo de untabilidad.....	36
Figura 3.10.	Microscopio óptico automático Olympus BX61.....	37
Figura 4.1.	Curvas de flujo de las mayonesas a 20°C.....	40
Figura 4.2.	Curvas de flujo de las mayonesas a 4°C.....	41
Figura 4.3.	Curvas de flujo de la mayonesa Ybarra Normal a dos temperaturas.....	42
Figura 4.4.	Curvas de barrido de frecuencia de la mayonesa Ybarra Ligeroliva a dos temperaturas.....	42
Figura 4.5.	Curvas de barrido de frecuencia de las mayonesas a 4°C.....	43
Figura 4.6.	Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Ligeroliva a 30°C.....	44

Figura 4.7.	Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Normal Ligera a 4°C.....	44
Figura 4.8.	Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Normal Ligera a 80°C.....	45
Figura 4.9.	Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Oliva después de un ciclo congelación / descongelación.....	46
Figura 4.10.	Mayonesa Ybarra Oliva antes y después del ciclo congelación / descongelación.....	47
Figura 4.11.	Distribución de tamaño de partícula de las mayonesas a 20°C.....	48
Figura 4.12.	Microestructuras de las mayonesas observadas con el microscopio óptico (x 20).....	49
Figura 4.13.	Curvas del ensayo de untabilidad de las mayonesas.....	50

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.	Aditivos autorizados para la elaboración de salsas de mesa.....	10
Tabla 2.2.	Definiciones de los parámetros mecánicos de la textura.....	22
Tabla 2.3.	Clasificación de las propiedades texturales de los alimentos.....	23
Tabla 3.1.	Composición de las mayonesas analizadas.....	25
Tabla 3.2.	Parámetros del ensayo de untabilidad.....	36
Tabla 3.3.	Factores y valores correspondientes a los niveles estudiados.....	38
Tabla 4.1.	Parámetros de la ecuación de Herschel-Bulkley.....	41
Tabla 4.2.	Variación de la retrodispersión de las mayonesas.....	46
Tabla 4.3.	Valores promedio del diámetro medio en superficie de las mayonesas.....	48
Tabla 4.4.	Parámetros texturales de las mayonesas.....	52
Tabla 4.5.	Relación entre factores y variables estudiadas.....	53

## **1. INTRODUCCIÓN**

La alimentación es el acto mediante el cual se ingieren los alimentos que proporcionan a los seres vivos la energía necesaria, las materias primas y los compuestos químicos indispensables para el buen funcionamiento del individuo y la regulación de sus mecanismos vitales.

Sin embargo, la alimentación no solo es vista como una necesidad, sino que el hecho de comer se concibe como un acto social y de disfrute. Por ello, los consumidores exigen variedad de alimentos, para degustar y ampliar su riqueza gastronómica, lo que da lugar a la constante creación de nuevos productos que aportan variedad a la mesa, como es el caso de los aderezos o salsas.

La utilización de aderezos en las comidas se conoce desde hace mucho tiempo, ya que los egipcios utilizaban aceite, vinagre y especias traídas de oriente, para condimentar las verduras. Este uso continuado en nuestra "*historia gastronómica*" ha dado lugar a la aparición de una gran variedad de salsas, aunque solo unas pocas han salido de la cocina para pasar a la industria. Entre éstas, la mayonesa o mahonesa es una de las más populares, y se podría considerar como la salsa clásica por excelencia, tanto desde el punto de vista doméstico, por su fácil preparación, como desde el punto de vista industrial por su volumen de producción (1).

Existen versiones que sitúan el origen de la mayonesa en España, específicamente en Mahon, Menorca. Por lo tanto, se puede decir que la mahonesa ha estado en la gastronomía española desde siempre. Sin embargo, las mayonesas comerciales fueron fabricadas en sus orígenes por empresas de Estados Unidos, para llegar a España con la expansión comercial, donde tuvieron muy buena aceptación.

El consumo de mayonesa en este país ha ido incrementándose constantemente con el pasar de los años, como se observa en la Figura 1.1. En los expositores de los supermercados, se pueden encontrar actualmente infinidad de tipos de mayonesas, fabricadas por distintas empresas, además de distintas variedades de la mayonesa original.

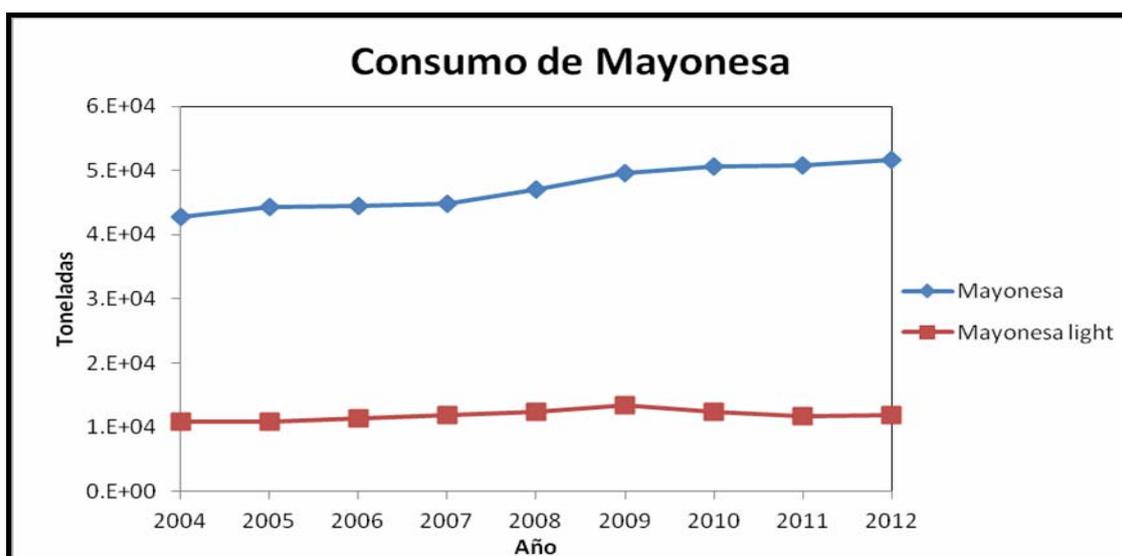


Figura 1.1. Evolución del consumo de mayonesa en los últimos años (2)

Desde hace ya algunos años, la tendencia del mercado de alimentos se orienta a la búsqueda de productos *light*, bajos en calorías y en grasa. Estos productos se pueden fabricar gracias al uso de aditivos alimentarios, cuyo mercado ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, con una previsión para el 2015 de que sus ventas mundiales lleguen a 33.9 millones de dólares (3). Todo esto debido a un esperado incremento en la fabricación y venta de nuevos productos alimenticios, que llenarán el mercado buscando satisfacer las demandas de los consumidores.

El mercado de la mayonesa ofrece actualmente una gran variedad de productos, como *light*, sin azúcar, sin huevo, ecológica, entre otros. En vista de la existencia de esta amplia gama de mayonesas, parece interesante realizar un estudio comparativo de las propiedades de las mismas, utilizando para su medida la instrumentación más moderna disponible.

Debido a que la mayonesa presenta características clave desde el punto de vista reológico, el primer objetivo del presente trabajo es realizar un estudio de las distintas mayonesas a fin de determinar sus principales parámetros reológicos, de forma que se puedan comparar en función del tipo y temperatura del producto.

El segundo objetivo es analizar las características de las emulsiones, que constituyen las mayonesas evaluadas, con la finalidad de comprobar si en las mismas existen diferencias destacables de estabilidad, tamaño de partícula o estructura interna de la emulsión.

Finalmente, se pretenden determinar los parámetros texturales de las mayonesas, utilizando un analizador de textura. Los experimentos se programarán de manera que los resultados obtenidos permitan un análisis comparativo de las mayonesas, en función del tipo de aceite, del contenido calórico (ligero y normal) y de la temperatura.

## **2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS**

## 2.1. Emulsiones: definiciones y características

Tradicionalmente, la mayonesa es una mezcla de huevo, vinagre, aceite y especias, con un contenido de aceite comprendido entre el 70% y el 80%, que a pesar de su elevado valor forma una emulsión de aceite en agua (O/W) (4).

Una **emulsión** es normalmente un sistema de dos líquidos inmiscibles, uno de los cuales se dispersa en el otro en forma de pequeñas gotas. Las emulsiones de agua y aceite son muy comunes en la industria alimentaria. Cuando se mezcla una fase acuosa y una fase grasa (aceite), en principio, se pueden obtener cualquiera de los dos tipos de emulsiones: agua en aceite (W/O) o aceite en agua (O/W), como las mostradas en la Figura 2.1. La obtención de uno u otro tipo dependerá básicamente del tipo de tensioactivo utilizado y del modo de preparación del sistema (1).

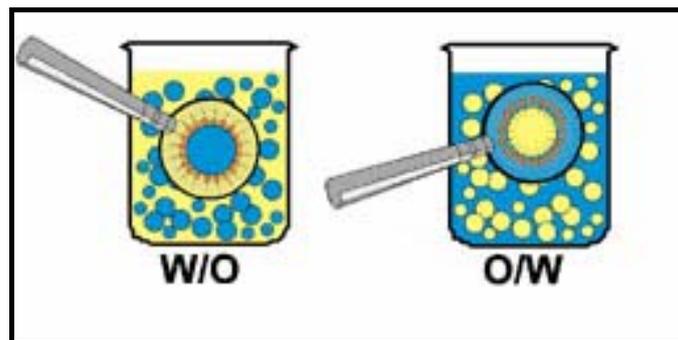


Figura 2.1. Emulsiones agua en aceite (W/O) y aceite en agua (O/W)

Las emulsiones pueden sufrir procesos de desestabilización provocados por distintos factores, los cuales se relacionan con las características de los fluidos o con los tensioactivos, así como con las condiciones en las que se forme o se conserve la emulsión. Los diferentes fenómenos que favorecen la ruptura de la emulsión y la obtención de dos fases separadas se describen a continuación y se representan de manera esquemática en la Figura 2.2 (5).

- **Agregación y coalescencia.** Suelen ser fenómenos encadenados, ya que la coalescencia normalmente va precedida de la agregación. Esta última consiste en la formación de aglomerados de partículas de fase dispersa. La coalescencia se da cuando los aglomerados formados en la agregación se unen dando lugar a partículas macroscópicas. Estos fenómenos en estado

avanzado pueden provocar la separación de las fases emulsionadas. Si únicamente se da la agregación, se puede recuperar la emulsión mediante agitación suave.

- **Sedimentación y flotación.** Tienen que ver con la diferencia de densidad de los dos fluidos emulsionados. La sedimentación ocurre cuando las partículas de la fase dispersa se mueven hacia la parte inferior de la emulsión. Por el contrario, la flotación se da cuando la fase dispersa se desplaza hacia la superficie de la emulsión. Los factores que condicionan la separación quedan definidos en la ley de Stokes:

$$V = \frac{2gr^2(\rho_c - \rho_d)}{9\eta} \quad (2.1)$$

Donde  $V$  es la velocidad de separación,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $r$  el radio de la gota,  $\rho_c$  y  $\rho_d$  la densidad de la fase continua y dispersa, respectivamente, y  $\eta$  viscosidad de la fase continua.

Para conseguir disminuir la velocidad de separación de las dos fases, se puede actuar sobre alguna de las variables de la ecuación. Así, mediante métodos mecánicos se consigue una reducción del tamaño de las gotas de fase dispersa ( $r$ ), o mediante el uso de hidrocoloides espesantes se aumenta la viscosidad de la fase continua ( $\eta$ ).

- **Floculación.** Las gotitas de la fase dispersa pueden poseer una carga superficial del mismo signo que hace que se repelan, pero si por causa de una colisión las fuerzas de atracción superan a las de repulsión, las gotas quedarán unidas. Este fenómeno tiene lugar cuando los dos fluidos no son muy diferentes o cuando la viscosidad es demasiado elevada para provocar una sedimentación o flotación.

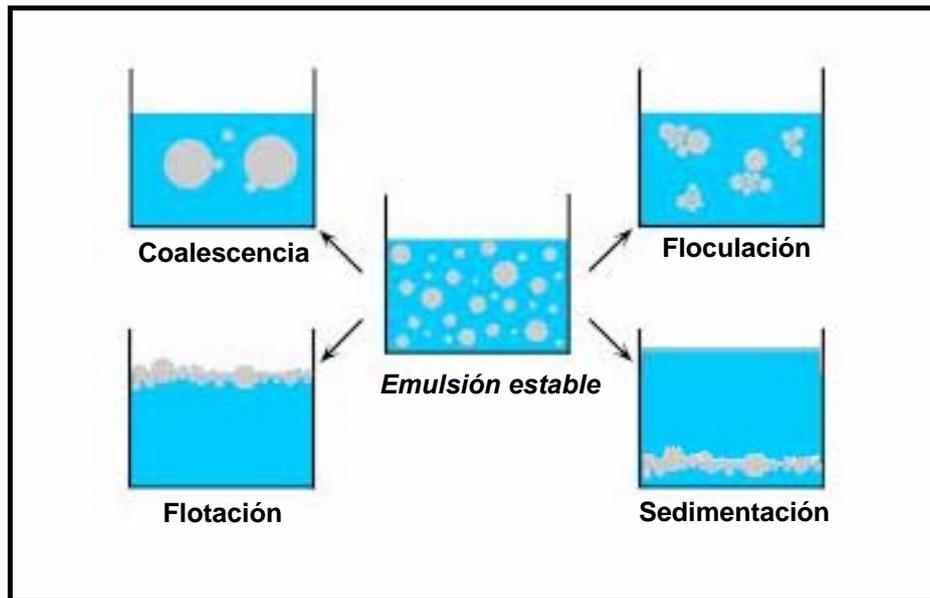


Figura 2.2. Fenómenos de desestabilización y ruptura de una emulsión

Los **tensioactivos**, también denominados surfactantes, son sustancias cuya característica fundamental es su naturaleza anfifílica. Esta propiedad se debe a la dualidad de las moléculas que están compuestas por dos partes claramente diferenciadas, una de carácter hidrófilo (grupo polar soluble en agua) y otra de carácter lipófilo o hidrófobo (soluble en sustancias no polares). Los tensioactivos se clasifican de acuerdo a la naturaleza de la parte hidrófila en, *aniónicos*, *catiónicos*, *anfóteros* y *no iónicos* (6). Los más importantes en alimentos, son las proteínas y moléculas tensioactivas de bajo peso molecular (lípidos y fosfolípidos) (7).

La función de los emulsionantes es impedir o retardar los fenómenos naturales de separación de las dos fases de la emulsión, mediante los siguientes efectos: (5)

- **Formación una película protectora alrededor de las gotas de fase dispersa.** Para ello, el tensioactivo se sitúa en la zona interfacial, proporcionando una película molecular y semirrígida alrededor de las gotas o glóbulos, que impide la coalescencia.
- **Disminución de la tensión interfacial.** Una de las razones que dificulta la formación de emulsiones es la tensión interfacial que existe entre las dos fases a emulsionar. Los emulsionantes disminuyen la energía requerida para conseguir la dispersión de un líquido en otro.
- **Aporte de cargas eléctricas.** Los tensioactivos de tipo iónico proporcionan cargas eléctricas del mismo signo a las gotas de la fase dispersa. De esta

manera, la fuerza de repulsión entre las partículas prevalece sobre las fuerzas atractivas de Van der Waals y las colisiones debidas al movimiento Browniano.

## 2.2. Mayonesa

La mayonesa es una salsa delgada compuesta tradicionalmente de clara de huevo batida con aceite, vinagre y especias. Esta salsa fue una de las cinco principales en la cocina francesa clásica y hoy en día sirve de base para elaborar muchas otras salsas, además de ser un ingrediente principal en muchos platos.

Aunque el origen de esta salsa no está claro, la versión más divulgada la sitúa en la ciudad de Mahón, isla de Menorca (1). Se dice que, en la Guerra de Siete Años, los franceses atacaron el puerto de Mahón, y para celebrar su victoria ofrecieron un banquete, donde se incluyó en el menú esta salsa creada con aceite de oliva y huevo, con gran aceptación por parte de los franceses que, en honor a la victoria en el puerto de Mahón, llamaron a la salsa "*Mahonnaise*", palabra que con el paso de los años se castellanizó derivando a "*Mayonesa*".

En general, la mayonesa se desestabiliza y se daña muy fácilmente, resultando, además, difícil de envasar. Sin embargo, las mayonesas comerciales son muy diferentes de las frescas hechas en casa.

El primer intento conocido de fabricar una mayonesa comercial data de 1907, cuando el propietario de una pastelería, de apellido Schlorer, mezcló la mayonesa preparada por su esposa con conservantes y la registró con el nombre de "*Mrs. Schlorer's Mayonnaise*", comercializándola en su establecimiento. La competencia de Schlorer provino de las grandes compañías, como Hellmann's, Best Foods, Kraft y Blue Plate, que fueron lanzando al mercado sus respectivas mayonesas. El crecimiento fue enorme y éste continuó hasta los años 80, cuando se introdujeron en el mercado americano las mayonesas *light* (8).

Según la legislación española, en el Real Decreto 858/1984, de 28 de marzo, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de salsas de mesa, se puede denominar mayonesa a (9):

"Los productos en forma de emulsión, constituidos, básicamente, por aceites vegetales comestibles, huevos o yemas de huevo, vinagre y zumo de limón, con la adición facultativa de los ingredientes citados en la Tabla 2.1, envasado en recipientes cerrados y adecuadamente conservados".

Tabla 2.1. Aditivos autorizados para la elaboración de salsas de mesa

<b>Aditivo</b>	<b>Número E</b>	<b>Dosis máxima de uso</b>
<b>1. Colorantes</b>		
Curcumina	E-100	200 mg/kg
Lactoflavina (Riboflavina)	E-101	
Clorofilas	E-140	B.P.F.
Complejos cúpricos de clorofilas y clorofilinas	E-141	
Caramelo	E-150	
Carotenoides	E-150	
a) Alfa, beta, gamma, caroteno		
b) Bixina, norbixina, rocou annato		
c) Capsantina, capsorubina		
d) Licopenos		
e) Beta-apo-8'-carotenal		
f) Ester etílico del ácido beta-apo-8-carotenoico		
Xantofilas	E-161	B.P.F.
a) Flavoxantina		
b) Luteina		
c) Criptoxantina		
d) Rubixantina		
e) Violoxantina		
f) Rodoxantina		
g) Cantaxantina		

Tabla 2.1. Aditivos autorizados para la elaboración de salsas de mesa (continuación)

<b>Aditivo</b>	<b>Número E</b>	<b>Dosis máxima de uso</b>
<b>2. Conservantes</b>		
Ácido sórbico	E-200	1000 mg/kg, aislados o en conjunto, expresado en el ácido correspondiente
Sorbato sódico	E-201	
Sorbato potásico	E-202	
Ácido benzoico	E-210	
Benzoato sódico	E-211	
Benzoato potásico	E-212	
Para-hidroxibenzoato de etilo	E-214	
Derivado sódico del éster etílico del ácido parahidroxibenzóico	E-215	
Para-hidroxibenzoato de propilo	E-216	
Derivado sódico del éster propílico del ácido para hidroxibenzóico	E-217	
<b>3. Antioxidantes y sinérgicos</b>		
Los autorizados para las grasas comestibles que se utilizan como ingredientes y en las mismas dosis, referidos al contenido graso del producto		
Etilendiamino tetracetato cálcico disódico (EDTA Ca Na <sub>2</sub> )	H-3.246	75 mg/kg

Tabla 2.1. Aditivos autorizados para la elaboración de salsas de mesa (continuación)

<b>Aditivo</b>	<b>Número E</b>	<b>Dosis máxima de uso</b>
<b>4. Estabilizantes, emulgentes, espesantes y gelificantes</b>		
Ácido algínico	E-400	B.P.F.
Alginato amónico	E-403	
Alginato cálcico	E-404	
Alginato de propilenglicol	E-405	
Agar-agar	E-406	
Carragenatos	E-407	
Goma de garrofín	E-410	
Goma guar	E-412	
Goma de tragacanto	E-413	
Goma arábica	E-414	
Goma xantana	E-415	
Pectina (no amidada)	E-440 a)	
Celulosa microcristalina	E-460 i)	
Metilcelulosa	E-461	
Hidroxipropil metil celulosa	E-464	
Carboxi-metil celulosa (sal sódica del éter carboximetílico de la celulosa)	E-466	
Cloruro cálcico (como coadyuvante de la pectina)	H-10.056	B.P.F.
Mono y diglicéridos de ácidos grasos no polimerizados de cadena lineal, saturados e insaturados, presentes en aceites y grasas comestibles	E.471	1 g por 100 g, aislados o en conjunto
Sucroésteres	E-473	
Sucroglicéridos	E-474	

Tabla 2.1. Aditivos autorizados para la elaboración de salsas de mesa (continuación)

<b>Aditivo</b>	<b>Número E</b>	<b>Dosis máxima de uso</b>
<b>5. Potenciadores del sabor</b>		
Ácido glutámico	H-5.801	2 g/kg, aislados o en conjunto
Glutamato potásico	H-5.804	
Glutamato sódico	H-5.805	
Ácido guanílico	H-5.810	50 mg/kg, aislados o en conjunto
Guanilato sódico	H-5.812	
Guanilato potásico	H-5.813	
Ácido inosínico	H-5.814	50 mg/kg, aislados o en conjunto.
Inosinato sódico	H-5.816	
Inosinato potásico	H-5.817	
<b>6. Reguladores del pH</b>		
Acetato potásico	E-261	B.P.F.
Ácido láctico	E-270	
Lactato sódico	E-325	
Lactato potásico	E-326	
Lactato cálcico	E-327	
Ácido cítrico	E-330	
Citrato sódico	E-331	
Citrato potásico	E-332	
Citrato cálcico	E-333	
Acido tartárico	E-334	
Tartrato sódico	E-335	
Tartrato potásico	E-336	
Tartrato cálcico	H-8.162	
Bicarbonato sódico	H-8.186	0.2 por 100 mm, aislados o en conjunto
Bicarbonato potásico	H-11.185	

Físicamente, la mayonesa consiste en una fase interna, discontinua, de gotas de aceite que se encuentran dispersas en una fase acuosa externa, continua, de vinagre, yema de huevo y otros ingredientes (emulsión O/W). El vinagre, el azúcar, la sal y las especias determinan el sabor del producto (10). La yema de huevo contribuye también

al sabor, pero su principal función es la de agente emulsionante, debido a los fosfolípidos, como la lecitina, que contiene.

Las lecitinas, aunque estructuralmente similares a los ácidos grasos, contienen ácido fosfórico, y lo más importante es que poseen un extremo polar y otro no polar. El extremo polar de ésta y otras moléculas similares es hidrófilo y se disuelve fácilmente en agua. El extremo no polar es hidrófobo, por lo que se disuelve fácilmente en grasa o aceite (11). Las lecitinas poseen, por tanto, naturaleza anfífila y actúan como tensioactivos.

### 2.2.1. Mayonesa light

Los alimentos *light* o ligeros aparecen en el mercado en la década de los 80, del pasado siglo. El primer edulcorante utilizado como sustituto del azúcar fue la sacarina, ya que estos alimentos estaban dirigidos principalmente a las personas diabéticas o a aquellas que querían disminuir su peso y volumen corporal. Su introducción en el mercado perseguía satisfacer a las personas, cada vez más numerosas, que deseaban controlar su peso y cuidar su alimentación, sin por ello renunciar al disfrute de ciertos placeres gastronómicos. Los primeros alimentos *light* fueron las bebidas gaseosas, como la Coca-Cola Diet (12).

A partir de ese momento, los productos ligeros comenzaron a tener un desarrollo y crecimiento en el mercado realmente impresionantes. Como consecuencia, se empezaron a desarrollar y a utilizar diversas sustancias y aditivos, los cuales aportan a los alimentos diferentes texturas, sabores y colores. Asimismo, se empezó a dar una gran importancia al etiquetado nutricional, como respuesta a la demanda de los consumidores que requerían información clara y precisa sobre los productos que consumían.

La reglamentación actual en España establece que para poder etiquetar un producto como *light*, éste debe tener como mínimo un contenido calórico un 30% inferior al del mismo producto en su versión estándar. La reducción energética se consigue disminuyendo o sustituyendo la cantidad de azúcares y/o grasas por componentes menos calóricos (13).

### 2.3. Fundamentos de reología

Se denomina *reología*, palabra introducida por Eugene C. Bingham en 1929, a la ciencia que se dedica al estudio de la deformación y el flujo de la materia, es decir, a la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales capaces de fluir (14).

La aplicación de fuerzas externas de intensidad suficiente puede provocar una deformación de la materia, realizándose un trabajo que se acumula como energía interna de deformación. Cuando estas transformaciones son reversibles y las fuerzas externas dejan de actuar, el sistema recupera instantáneamente la forma y dimensiones originales, mientras que la energía acumulada retorna en forma de trabajo. Se habla entonces de *comportamiento elástico*. En otras ocasiones, la materia también se deforma bajo la acción de las fuerzas aplicadas, pero el trabajo realizado se disipa completamente en forma de calor. Por ello, cuando la acción de dichas fuerzas cesa, el estado de deformación permanece. Se habla entonces de un *comportamiento viscoso* (15).

El estudio de la reología se incluye dentro de la rama de la física denominada *mecánica de los medios continuos*, que a su vez se subdivide en mecánica de sólidos (rígidos o deformables) y mecánica de fluidos (líquidos y gases). La *componente elástica* es la dominante en los sólidos, por tanto, sus propiedades pueden describirse mediante la ley de Hooke: *el esfuerzo aplicado es proporcional a la deformación resultante ( $\epsilon$ ), pero es independiente de la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ )*:

$$\sigma = G \epsilon \quad (2.2)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de deformación por unidad de superficie ( $F/A$ ),  $\epsilon$  es la deformación sufrida por el esfuerzo aplicado y  $G$  es el *módulo de Young* (16).

La *componente viscosa* es la dominante en los fluidos y, por tanto, sus propiedades se pueden describir mediante la ley de Newton: *el esfuerzo aplicado es proporcional a la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), pero es independiente del alargamiento o del gradiente de velocidades aplicado* (16):

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

$\eta$  es la viscosidad dinámica, que se puede considerar como una medida del rozamiento interno del fluido, y tiene dimensiones de  $ML^{-1}t^{-1}$ . Las unidades en las que habitualmente se expresa son Pa·s y centipoise (cP) que es igual a 1 mPa·s ( $10^{-3}$  Pa·s).

### 2.3.1. Clasificación de los fluidos

Existen tres tipos de fluidos, *newtonianos*, *no newtonianos* y *viscoelásticos*. En la Figura 2.3, se muestra un esquema de la clasificación reológica de los fluidos (16).

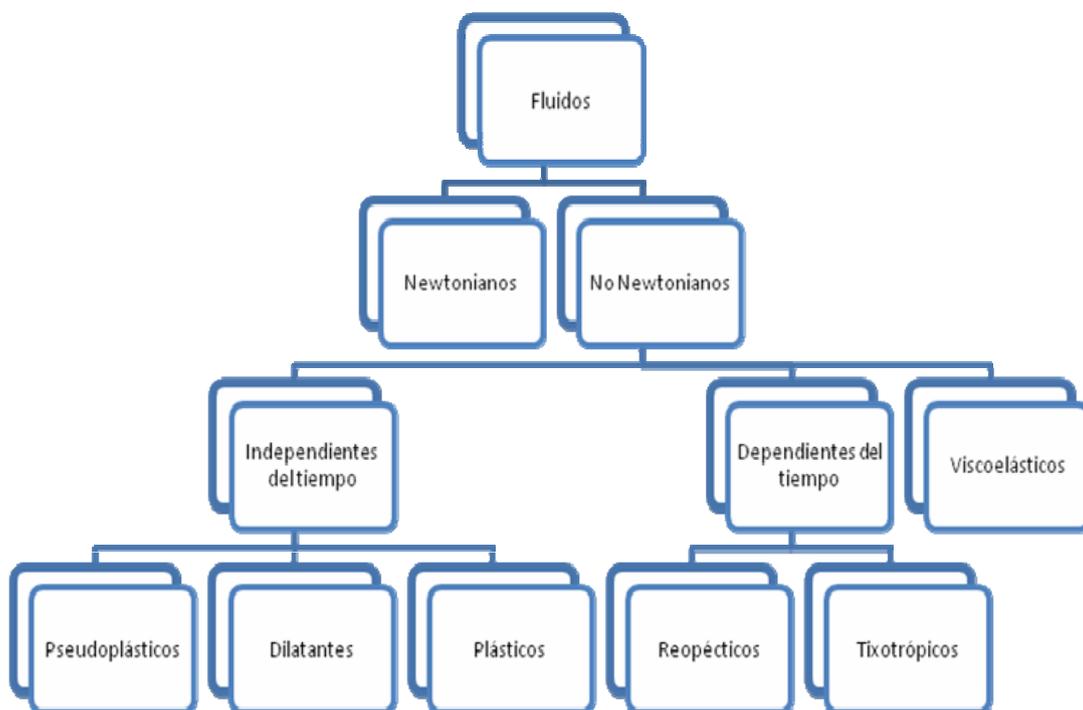


Figura 2.3. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico

- **Fluidos newtonianos.** Son aquellos en los que la viscosidad se mantiene constante para cualquier valor de la velocidad de deformación, dependiendo únicamente de la presión y temperatura para una sustancia dada.
- **Fluidos no newtonianos.** Son todos aquellos que siguen la ley de Newton de la viscosidad. La viscosidad que presentan en unas condiciones determinadas se denomina *viscosidad aparente*. La viscosidad aparente de un fluido no newtoniano depende, además de su composición, presión y temperatura, del esfuerzo cortante al que se le somete, y/o al que ha sido sometido en el pasado.

Como se muestra en la Figura 2.3 los fluidos no newtonianos pueden clasificarse en tres grandes grupos (15):

- Independientes del tiempo. Pueden ser *pseudoplásticos*, si la viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo cortante; *dilatantes*, si la viscosidad aparente aumenta al aumentar dicho esfuerzo; o *plásticos*, si no fluyen hasta que se les aplica un esfuerzo cortante mínimo denominado *limite de fluencia* o *esfuerzo umbral*.

Tanto el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos, como dilatantes, puede describirse mediante la Ley de la Potencia:

$$\sigma = K \gamma^n \quad (2.4)$$

La Ley de la Potencia es un caso particular de la ecuación general de Herschel-Bulkley:

$$\sigma = \sigma_0 + K \gamma^n \quad (2.5)$$

Donde  $\sigma$  es el valor del esfuerzo aplicado,  $\gamma$  la velocidad de deformación medida,  $\sigma_0$  el esfuerzo umbral,  $K$  el llamado *índice de consistencia* del fluido y  $n$  el *índice de comportamiento* al flujo.

- Dependientes del tiempo. Se denominan *tixotrópicos* aquellos fluidos cuya viscosidad aparente disminuye con el tiempo que ha sido aplicado el esfuerzo cortante, en condiciones de temperatura y esfuerzo cortante constantes. En los fluidos *reopécticos* dicha viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación del esfuerzo.
- Viscoelásticos. Son fluidos que, además de tener un comportamiento viscoso, presentan cierto grado de elasticidad. Su comportamiento resulta realmente complejo, ya que bajo la acción de fuerzas tangenciales parte del trabajo se disipa en forma de calor (componente viscosa) y parte se almacena en forma de energía interna (componente elástica).

### 2.3.2. Análisis del comportamiento viscoelástico mediante ensayos oscilatorios o dinámicos

Para ilustrar las deformaciones de un sólido elástico y de un fluido newtoniano ideal es conveniente usar un elemento elástico ideal que obedece la ley de Hooke, con un módulo de elasticidad  $G$ , y un émbolo o amortiguador hidráulico sencillo con un líquido de viscosidad  $\eta$ . Sin embargo, como un fluido viscoelástico presenta tanto características viscosas, como elásticas, se precisa la combinación de los dos modelos anteriores, para ilustrar las deformaciones resultantes de la aplicación de esfuerzos a un fluido viscoso.

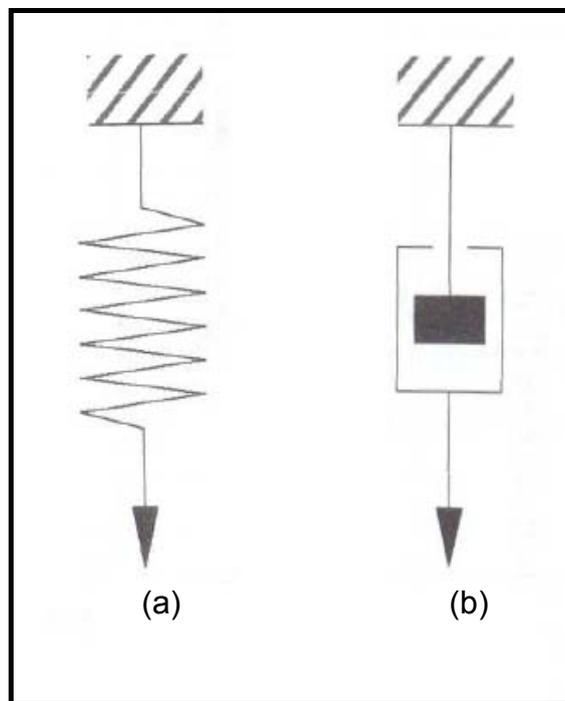


Figura 2.4. Modelo de muelle (a) y de amortiguador hidráulico (b)

Los ensayos oscilatorios permiten caracterizar los fluidos viscoelásticos, mediante la aplicación de un esfuerzo sobre la muestra de manera oscilatoria. Estos ensayos aportan información relacionada con la viscosidad y la elasticidad en función de la frecuencia aplicada (17).

En el modelo del muelle, si la velocidad angular es  $\omega$  y  $\varepsilon_0$  es la deformación máxima ejercida sobre el muelle, la deformación en función del tiempo vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \text{ sen } (\omega t) \quad (2.6)$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (2.2), se llega a:

$$\sigma = G \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2.7)$$

Para el modelo del muelle, la deformación y el esfuerzo se encuentran en fase, de manera que, cuando el esfuerzo está en su máximo, también lo está la deformación.

En el caso del amortiguador hidráulico, se debe primero derivar la ecuación (2.6), en función del tiempo.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega \varepsilon_0 \cos(\omega t) = \gamma \quad (2.8)$$

Luego, se sustituye este parámetro en la ecuación de la Ley de Newton (2.3), obteniéndose:

$$\sigma = \eta \omega \varepsilon_0 \cos(\omega t) \quad (2.9)$$

Para el modelo del amortiguador hidráulico, la respuesta del esfuerzo está desfasada 90° respecto a la deformación. Esto se puede expresar en función de un *ángulo de desfase*, ( $\delta$ ), de modo que la ecuación 2.9 quedaría en la forma siguiente:

$$\sigma = \eta \omega \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.10)$$

Si una sustancia es puramente elástica,  $\delta$  tendrá el valor de 0° y si es puramente viscosa, tendrá el valor de 90°. Cuando el ángulo de desfase se encuentre entre 0° y 90°, la respuesta será viscoelástica (17).

En los ensayos oscilatorios, para obtener resultados absolutos es necesario trabajar en la región viscoelástica lineal, donde el módulo complejo  $G^*$  es constante. Este módulo representa la resistencia de una sustancia frente a la deformación aplicada.

$$|G^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.11)$$

El módulo complejo  $G^*$ , como todos los números complejos, consta de un componente real  $G'$ , que está en fase, y un componente imaginario  $G''$ , que se encuentra desfasado  $90^\circ$ , como se muestra en la Figura 2.5. El *módulo de almacenamiento*  $G'$  mide el componente elástico, es decir la energía almacenada en el material y recuperada durante la deformación.  $G''$  se conoce como el *módulo de pérdida* y es una medida de la energía disipada como calor por la fricción viscosa (18).

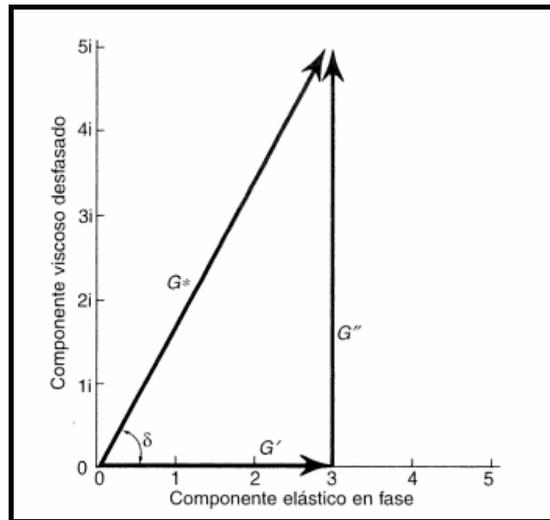


Figura 2.5. Vector que representa el módulo complejo  $G^*$ , con sus componentes  $G'$  y  $G''$

El vector que representa el módulo complejo  $G^*$  es el siguiente:

$$G^* = G' + iG'' \quad (2.12)$$

La tangente de pérdida,  $\tan(\delta)$ , es un parámetro muy útil debido a que mide la relación entre la energía disipada como calor y la energía almacenada elásticamente durante la deformación.

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad (2.13)$$

De manera que se pueden expresar los módulos  $G'$  y  $G''$  de la siguiente manera:

$$G' = |G^*| \cos(\delta) \quad (2.14)$$

$$G'' = |G^*| \sin(\delta) \quad (2.15)$$

Donde  $|G^*|$  representa la longitud o magnitud del vector  $G^*$ , y  $\delta$ , como ya se mencionó, es un ángulo que va de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , desde un material puramente viscoso a uno puramente elástico.

## 2.4. Fundamentos de texturometría

El concepto *carácter organoléptico* de un alimento incluye el conjunto de propiedades físicas y químicas del mismo que pueden ser percibidas por los sentidos. En función del órgano u órganos receptores, pueden distinguirse textura, aroma, color y sabor (1).

La textura percibida sensorialmente se puede definir como "*el atributo de una sustancia resultante de la combinación de las propiedades físicas y percibida por los sentidos del tacto, la vista y el oído*" (1).

La textura es un atributo multivariable y para poder entenderla es importante definir las propiedades texturales, así como sus magnitudes, lo que no resulta una tarea fácil. Por tanto, se necesitaría una nomenclatura internacional estándar para asegurar que todas las investigaciones llevadas a cabo en diferentes países se refieran a las mismas propiedades. Sin embargo, esto no es sencillo, ya que se debe tener en cuenta la traducción a distintos idiomas (19).

Una de las clasificaciones de las propiedades de la textura más aceptada es la desarrollada por Szczesniak, que define distintos parámetros mecánicos como propiedades texturales, los cuales se indican en la Tabla 2.2 (20).

Otra forma de clasificar las propiedades texturales, propuestas por Szczesniak, es la mostrada en la Tabla 2.3, donde se indican además las palabras comunes para describir texturas (1).

A pesar del conocimiento, tradicionalmente y aun hoy en día, la evaluación de la textura se lleva a cabo mayoritariamente mediante paneles de cata. No obstante, los métodos sensoriales están sujetos a una amplia variabilidad, aunque este aspecto puede reducirse mediante la evaluación con paneles de cata entrenados. En cualquier caso, a veces resulta preferible el uso de métodos instrumentales, ya que facilitan la

realización de las evaluaciones bajo condiciones más estrictamente definidas y controladas (19).

Tabla 2.2. Definiciones de los parámetros mecánicos de la textura

<b>Propiedades</b>	<b>Definición</b>	
	<b>Física</b>	<b>Sensorial</b>
<b>Primarias</b>		
Dureza	Fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada.	Fuerza requerida para comprimir una sustancia entre los molares (en caso de sólidos) o entre la lengua y el paladar (en caso de semisólidos).
Cohesividad	Extensión a la que un material puede ser deformado antes de que rompa.	Grado en que puede ser comprimida una sustancia entre los dientes antes de romper.
Viscosidad	Velocidad de flujo por unidad de fuerza.	Fuerza requerida para llevar un líquido de la cuchara a la lengua.
Elasticidad	Velocidad a la que un material deformado vuelve a su condición inicial después de cesar la fuerza que causa la deformación.	Grado en que un producto vuelve a su forma original después de ser comprimido entre los dientes.
Adhesividad	Trabajo necesario para superar las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento y otra superficie con la que el alimento entra en contacto.	Fuerza requerida para retirar el alimento que se adhiere a la boca (generalmente el paladar) durante el proceso normal de masticación.
<b>Secundarias</b>		
Fracturabilidad	Fuerza necesaria para fracturar un alimento con alta dureza y bajo grado de cohesividad.	Fuerza con la que un alimento se desmigaja, agrieta o se hace pedazos.
Masticabilidad	Energía requerida para masticar un alimento sólido hasta el estado adecuado para ser deglutido. Se mide en alimentos con dureza, cohesividad y elasticidad.	Periodo de tiempo requerido para masticar la muestra, a una velocidad constante de fuerza aplicada, para reducirla a una consistencia adecuada para la deglución.
Gomosidad	Energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado apto para su deglución. Se mide en alimentos con baja dureza y alta cohesividad.	Espesura que persiste durante la masticación. Energía necesaria para desintegrar un semisólido a una consistencia adecuada para la deglución.

Tabla 2.3. Clasificación de las propiedades texturales de los alimentos

<b>Características</b>	<b>Propiedades</b>	<b>Términos comunes relacionados</b>	
Mecánicas	Dureza	Blando, firme, duro	
	Cohesividad	Fracturabilidad	Desmenuzable, crujiente, quebradizo
		Masticabilidad	Tierno, masticable, correoso
		Gomosidad	Crujiente, quebradizo, harinoso, pastoso, gomoso
	Viscosidad	Fino, viscoso	
	Elasticidad	Plástico, elástico	
	Adhesividad	Pegajoso	
Geométricas	Tamaño y forma de partícula	Arenoso, granular	
	Forma y orientación de partícula	Fibroso, cristalino	
Otras	Humedad	Seco, húmedo, acuoso	
	Contenido graso	Oleoso, untuoso	

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3.1. Materiales

En este proyecto, se utilizaron mayonesas comerciales de la marca Ybarra, adquiridas en un establecimiento comercial. A continuación, en la Tabla 3.1, se describe la composición de las mismas.

Tabla 3.1. Composición de las mayonesas analizadas

<i>Nombre Comercial</i>	<i>Composición</i>	<i>Imagen del producto</i>
Ybarra. La Mayonesa de Toda la Vida	Aceite vegetal (70%), agua, huevo y yema de huevo, vinagre de vino, azúcar, sal, zumo de limón, especias, estabilizante: goma xantana. Puede contener mostaza.	
Ybarra Mayonesa Ligera	Aceite vegetal (30%), agua, huevo y yema de huevo, vinagre de vino, azúcar, almidón de maíz modificado, sal, zumo de limón, especias, estabilizantes: goma de garrofin y pectinas, conservador: sorbato potásico, colorante: betacaroteno, antioxidantes: EDTA (E-385).	
Ybarra Mayonesa 100% Aceite de Oliva	Aceite de oliva (78%), agua, yema de huevo, vinagre de vino, azúcar, sal, zumo de limón y especias.	
Ybarra Mayonesa Ligeroliva	Aceite de oliva (23%), agua, yema de huevo, vinagre de vino, azúcar, almidón de maíz modificado, sal, zumo de limón, especias, estabilizantes: goma de garrofin y pectinas, conservador: sorbato potásico, colorante: betacaroteno. Puede contener mostaza y proteínas lácteas.	
Ybarra Mayonesa Ligera Sin Azúcares	Aceite vegetal (26%), aceite de oliva virgen extra (4%), agua, huevo y yema de huevo, vinagre de vino, almidón de maíz modificado, sal, zumo de limón, especias, estabilizantes: goma de garrofin y pectinas, conservador: sorbato potásico, colorante: betacaroteno. Puede contener mostaza y proteínas lácteas.	

Para una sencilla identificación, las muestras se catalogaron utilizando las iniciales del producto, seguidas de la temperatura del ensayo (temperatura ambiente = 20C, refrigeración = 4C) y finalizando con el número de la repetición realizada.

- Ybarra *la mayonesa de toda la vida*: YN
- Ybarra *mayonesa ligera*: YNL
- Ybarra *mayonesa 100% aceite de oliva*: YO
- Ybarra *ligeroliva*: YOL
- Ybarra *mayonesa ligera sin azúcar*: YSA

### 3.2. Métodos de análisis

#### 3.2.1. Determinación de la distribución de tamaños de gota o partícula

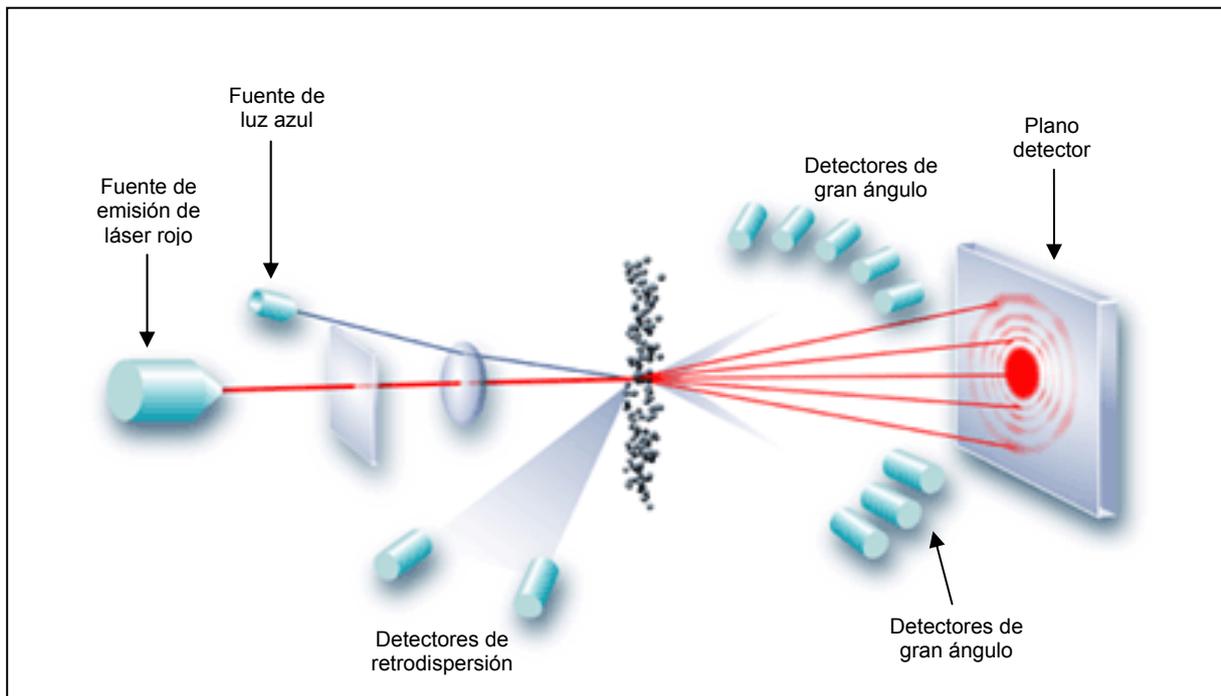
Tanto la apariencia, como el sabor, de las emulsiones alimentarias depende del tamaño medio de las partículas o gotas de la fase interna. Por lo tanto para la caracterización de las mayonesas es necesario conocer la distribución de tamaño de los glóbulos grasos de la emulsión.

El equipo empleado para realizar este análisis es el Malvern Mastersizer 2000, con el accesorio Hydro 2000SM (Malvern Instruments Ltd, UK), mostrado en la Figura 3.1, cuyo funcionamiento se describe brevemente a continuación.



Figura 3.1. Malvern Mastersizer 2000

El Malvern Mastersizer 2000 usa la técnica de la difracción láser para medir el tamaño de las gotas o partículas. Durante la medición de la difracción láser, las gotas o partículas atraviesan un haz de láser enfocado, generando una dispersión de la luz en un ángulo que es inversamente proporcional al tamaño de las partículas. La intensidad de la luz dispersada se mide mediante una serie de detectores fotosensibles. La Figura 3.2 muestra un esquema de los principales elementos del equipo. La intensidad de la luz dispersada se relaciona con el tamaño y la forma de las partículas, concretamente con el área de la sección transversal de las mismas.



*Figura 3.2. Esquema del funcionamiento del Malvern Mastersizer 2000*

El equipo consta de una fuente de luz azul LED de 0.3mW máximo y de una fuente de radiación formada por un tubo láser de He-Ne de 4mW de potencia máxima. Permite medir partículas con tamaños comprendidos entre 0.02 y 2000 $\mu\text{m}$ , utilizando la teoría de difusión de Mie.

La teoría Mie es una solución completamente analítica de las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de la radiación electromagnética por partículas esféricas. Permite el cálculo de la distribución de tamaños de partículas asumiendo las siguientes hipótesis:

:

- Las partículas son esféricas y homogéneas ópticamente.
- La suspensión está diluida, para asegurar que la medición de la luz dispersada se produce antes de que ésta sea re-dispersada por otras partículas.
- Se conocen las propiedades ópticas (índice de refracción), tanto de las partículas, como del medio que las rodea.

La teoría Mie permite, entonces, determinar la distribución de tamaño de todas las partículas de la dispersión.

Se debe tener en cuenta que el equipo asume que todas las partículas son esféricas, aunque en realidad son objetos tridimensionales con tres parámetros característicos, longitud, anchura y altura. Por lo tanto, el tamaño medio de las partículas se expresa como el diámetro de la esfera con análoga respuesta a la de la partícula que se está midiendo.

Existen distintos parámetros para estimar el tamaño de la partícula en base al diámetro de la esfera, pero los más habituales son los siguientes:

- *Diámetro medio en volumen* ( $D_{4,3}$ ), que corresponde al diámetro de la esfera con el mismo volumen que la partícula analizada.
- *Diámetro medio en superficie* ( $D_{3,2}$ ), que consiste en el diámetro de la esfera de área superficial equivalente al de la partícula analizada.

Estos parámetros se calculan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$D_{4,3} = \frac{\sum n_i D_i^4}{\sum n_i D_i^3} \quad (3.1)$$

$$D_{3,2} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (3.2)$$

Donde  $D_i$  es el diámetro de partícula o gota y  $n_i$  es el número de partículas o gotas de diámetro  $D_i$ .

Para llevar a cabo el análisis de las muestras de mayonesa fue necesario diluirlas previamente. Para ello, se disolvieron 0.04 g de mayonesa en 150 mL de disolución de

dodecilsulfato sódico (SDS) al 0.1% en peso, con ayuda de un agitador magnético durante 10 minutos. Se realizaron mediciones de las disoluciones a temperatura ambiente y a baja temperatura, después de mantener las disoluciones refrigeradas a 4°C, durante 24 h.

### 3.2.2. Determinación de la estabilidad

Una emulsión es, por definición, un sistema termodinámicamente inestable y más tarde o más temprano se separa en dos fases. La tendencia a la reorganización hacia su estado inicial conlleva cambios locales de tamaño o concentración de las partículas o gotas. Por lo tanto, los análisis de estabilidad se fundamentan en la medición de estos cambios.

Para la determinación de la estabilidad de las mayonesas, se emplea el *Turbiscan Lab Expert* (Formulation, Francia), que está acoplado a una estación de envejecimiento AGS. El cabezal de medición del equipo consiste en una fuente de radiación, que emite en la región del infrarrojo cercano a una longitud de onda de 880 nm, y dos detectores sincrónicos. Un detector de transmisión, que recibe el haz de luz transmitida a través del producto, y un detector de retrodispersión, que mide la luz retrodispersada por el producto. El cabezal de lectura adquiere datos de transmisión y de retrodispersión, ya sea en una posición específicamente elegida en la celda que contiene la muestra, o cada 40  $\mu\text{m}$  en un barrido de toda la altura de la celda de cristal.

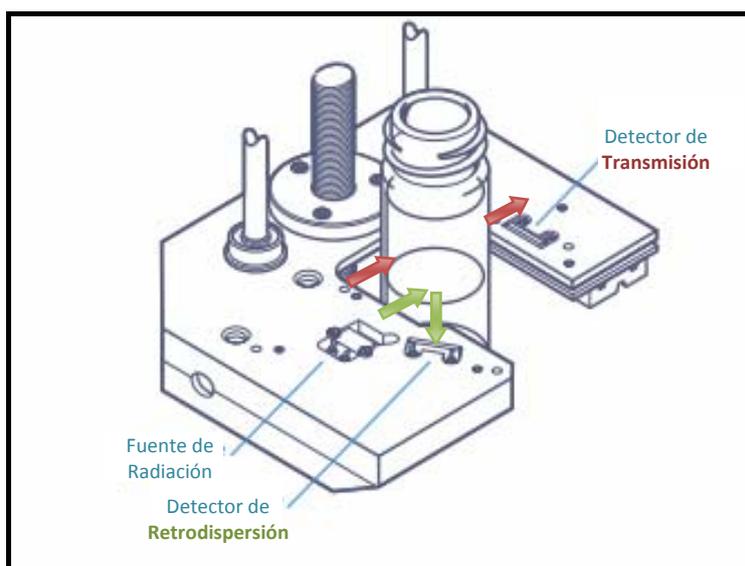


Figura 3.3. Esquema del cabezal de lectura del Turbiscan Lab Expert

Para el estudio de la estabilidad de la mayonesa, el equipo realiza mediciones de la muestra a intervalos definidos de tiempo, en toda la altura de la celda de cristal que contiene la muestra, registrando valores de transmisión y retrodispersión, que se almacenan en el software y se muestran de forma grafica.

Las graficas que muestra el equipo pueden ser de tres formas básicas, según el fenómeno generador de la inestabilidad, como se indica de manera esquemática en la Figura 3.4.

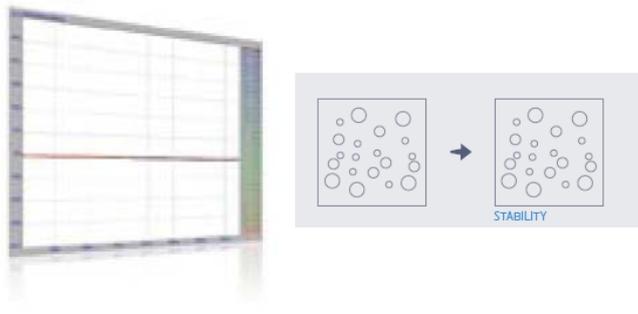
<p style="text-align: center;"><b>ESTABLE</b></p> 	<p>El tamaño y la concentración de las partículas no varían con el tiempo. No se detectan variaciones ni en transmitancia ni en retrodispersión</p>
<p style="text-align: center;"><b>MIGRACIÓN DE PARTICULAS</b></p> 	<p>Como consecuencia de los procesos de sedimentación y flotación de las partículas, se observan picos locales en la grafica, que indican grandes variaciones de la transmitancia o de la retrodispersión en la parte superior o inferior de la celda.</p>
<p style="text-align: center;"><b>VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA</b></p> 	<p>Debido a fenómenos de coalescencia o floculación, se produce una variación en el tamaño de las partículas con el tiempo. Se observan variaciones de transmitancia y retrodispersión en toda la altura de la celda.</p>

Figura 3.4. Tipos de graficas de análisis de estabilidad del equipo Turbiscan Lab Expert

Para medir la estabilidad, se llenaron las celdas con la mayonesa en su estado original, hasta alcanzar un tope determinado. Se realizaron ensayos a la mínima temperatura a la que opera el equipo (30°C) y a la temperatura de refrigeración, sacando la muestra del frigorífico y colocándola en el equipo justo cuando se iba a realizar la medición.

Adicionalmente, se programaron ensayos de desestabilización, sometiendo la mayonesa contenida en la celda a calentamiento a alta temperatura y a enfriamiento a temperatura de congelación, antes de realizar el análisis de estabilidad.

### 3.2.3. Determinación de las características reológicas

El comportamiento reológico de las emulsiones está altamente relacionado con la estructura interna de estos sistemas. Por lo tanto, este comportamiento resulta una herramienta importante en la caracterización y comparación de las mayonesas objeto de estudio.

Para la determinación de las propiedades reológicas de las mayonesas, se utilizó un reómetro RS50 RheoStress (Haake, Alemania), el cual está integrado por distintos componentes como se muestra en la Figura 3.5. Los principales elementos que lo integran son:

- *Toma de aire comprimido*, para evitar rozamientos entre las partes móviles que podrían transmitirse al fluido objeto de estudio.
- *Soporte del elemento sensor de medida*.
- *Placa base* sobre la que se distribuye la muestra.
- *Criostato digital de circulación*, modelo F3-K (Haake, Alemania), que permite mantener la temperatura de operación en el valor deseado.
- *Controlador*
- *Ordenador e impresora*.

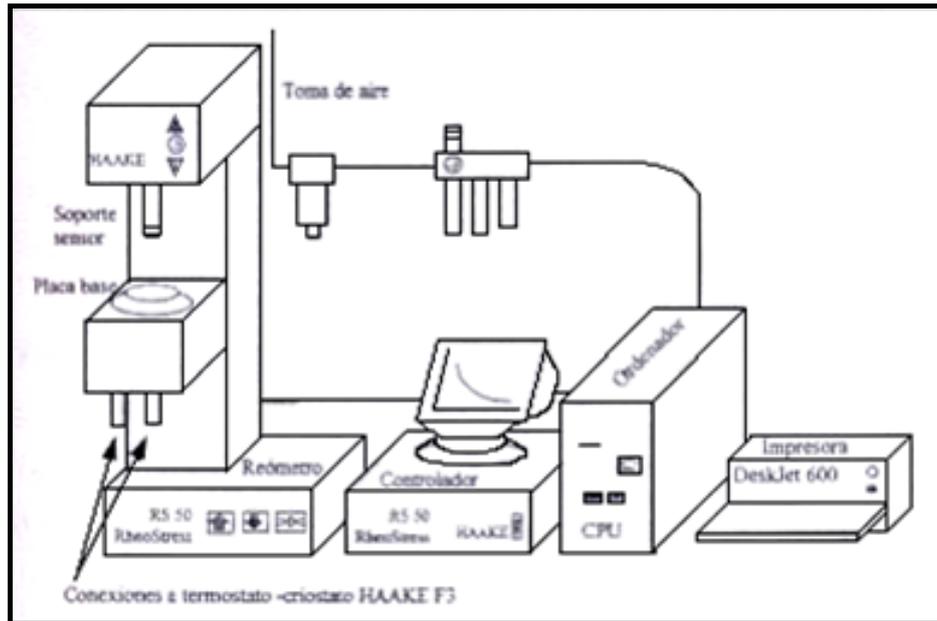


Figura 3.5. Esquema del reómetro HAAKE RS50

Para realizar las determinaciones, se utilizó, como se observa en la Figura 3.6, el sensor de placas serradas de 35 mm de diámetro (PP35), el cual permite minimizar las deformaciones en la muestra modificando la altura del espacio entre placa y placa. La manipulación de este espacio hace que esta geometría sea adecuada para sustancias con partículas en suspensión y para sustancias que posean una zona lineal limitada.

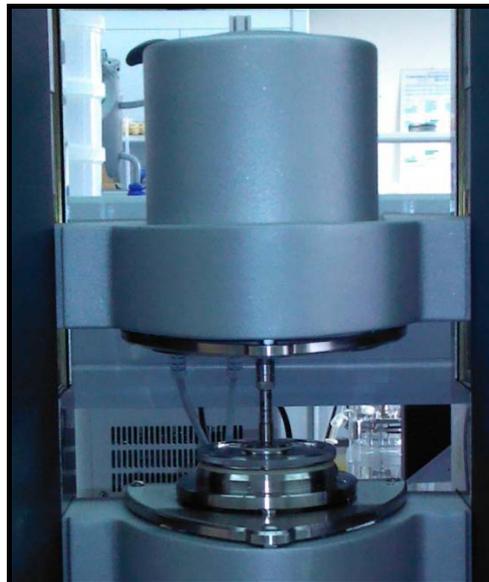


Figura 3.6. Sensor de placas serradas (PP35)

En este equipo se pueden realizar ensayos de tres modos diferentes, dependiendo de la sustancia estudiada y de la información que se pretenda obtener.

- Controlando el esfuerzo de cizalla, “*Controlled Stress*”, (Modo CS).
- Controlando la velocidad de cizalla, “*Controlled Rate*”, (Modo CR).
- Aplicando funciones sinusoidales (Modo Oscilatorio).

Las condiciones comunes a todos los ensayos fueron las siguientes:

- Tiempo de reposo de la muestra en el reómetro previo al ensayo: 15 minutos.
- Ranura entre los platos: 1 mm.
- Ensayos a temperatura constante: 20 °C y 4 °C.
- Se realizaron los ensayos como mínimo por triplicado, para cada mayonesa y para cada temperatura.

➤ *Límite de fluidez*

Se realizó una curva de flujo en modo CS, con un barrido de esfuerzo de 0 a 400 Pa en 300 s, tomando 200 datos equiespaciados.

➤ *Barrido de frecuencia*

Se realizó una rampa inversa de frecuencia de 10 a 0.1Hz y a 10 Pa de esfuerzo (Modo CS), midiendo los módulos  $G'$  y  $G''$ .

### 3.2.4. *Determinación de propiedades texturales*

La textura es un parámetro fundamental en la percepción organoléptica de un alimento directamente relacionado con su estructura. De un modo general se puede definir como un conjunto de atributos que se aprecian por los sentidos de la vista, el tacto y el oído, y que hacen referencia a la impresión percibida de sus características físicas, como resultado de una deformación sufrida por el alimento.

El analizador de textura utilizado en este trabajo es el TA.XTplus (Texture Technologies, USA), el cual permite medir tres parámetros: tiempo, fuerza y distancia. A partir de dichos parámetros, se pueden evaluar las distintas propiedades texturales mediante el software integrado Texture Exponent.

El equipo, como se muestra en la Figura 3.7, está integrado por un brazo y una base. El brazo incorpora la célula de carga y se mueve hacia abajo y hacia arriba para

deformar la muestra, según el ensayo aplicado, retornando después a la posición inicial indicada.



Figura 3.7. Analizador TA.XTplus

El equipo puede utilizarse con distintas células de carga (1, 5, 30, 50 kg), según la fuerza y la sensibilidad que se necesite para el ensayo. En nuestro caso, se utilizó únicamente la célula de 5 kg, que resulta suficiente para la fuerza que se precisa aplicar a las muestras de mayonesa. Al equipo, además, se le puede acoplar una amplia gama de sondas, para llevar a cabo distintos tipos de ensayos, como ensayos de cizalla, fractura, tensión, extracción, entre otros.

Para el estudio de las mayonesas, se utilizó el set de untabilidad, mostrado en la Figura 3.8, el cual está formado por un cono macho y cinco conos hembra, con ángulos de  $90^\circ$ , que se ajustan perfectamente. El material con el que están fabricados los conos es polimetilmetacrilato, también denominado *Perspex*.



Figura 3.8. Set de ensayo de untabilidad

El ensayo de untabilidad utilizado ya viene configurado en el archivo del software, para productos como mayonesa y mantequilla, y permite determinar los parámetros relacionados con la untabilidad, que incluyen la dureza, la pegajosidad, el trabajo de cizalla y el trabajo de adhesión o adhesividad.

La *dureza* se define como la máxima fuerza en un producto, que muestra una resistencia sustancial a la deformación.

La *pegajosidad* se define como la máxima fuerza necesaria para superar las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento y la superficie de la sonda con la que el alimento entra en contacto.

El *trabajo de cizalla* es la fuerza requerida para cizallar un producto (trabajo necesario para untar el producto).

El *trabajo de adhesión* es la fuerza total implicada en la retirada de la sonda de la muestra.

Antes de llevar a cabo este ensayo, se debe calibrar la fuerza y la altura del equipo, y ajustar la sonda, fijando un cono hembra vacío a la plataforma que está en la base del instrumento y bajando la sonda con el cono macho para comprobar que queden ajustados perfectamente. Los conos hembra deben llenarse con las muestras,

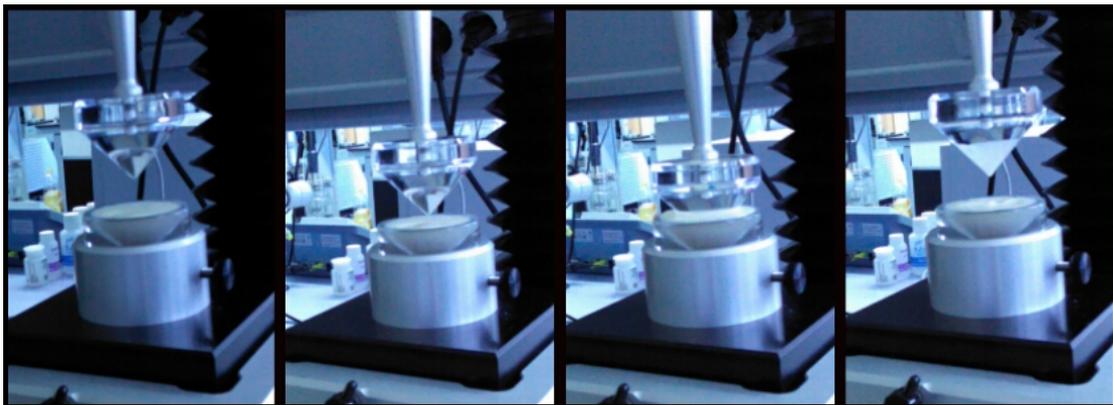
presionando para eliminar las burbujas de aire del interior y nivelando la superficie con un cuchillo plano. Las muestras se conservan 5 horas en reposo refrigeradas o a temperatura ambiente, según corresponda.

Para realizar los ensayos, se tomó una altura del 30 mm como punto de partida del descenso y se configuró el equipo con los parámetros mostrados en la Tabla 3.1.

*Tabla 3.2. Parámetros del ensayo de untabilidad.*

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Velocidad de ensayo	3 mm/s
Velocidad post-ensayo	10 mm/s
Distancia de penetración	23 mm
Tipo de activación	Botón
Adquisición de datos	200 pps

Una vez calibrado el equipo y establecidos los parámetros adecuados para el ensayo, se procede a realizar la prueba, como se muestra en la Figura 3.9, donde el cono macho baja y se introduce en la muestra hasta la distancia especificada en las condiciones. Una vez alcanzada ésta, la sonda se retira hasta la posición de retorno.



*Figura 3.9. Desarrollo del ensayo de untabilidad*

### 3.2.5. Microscopia óptica

Para obtener imágenes a nivel microscópico de las distintas mayonesas, se empleó el microscopio óptico automático Olympus BX61 (Japón), mostrado en la Figura 3.10, el cual dispone de una platina motorizada Prior, lentes ópticas de 4x, 10x, 20x, 40x, y 100x, así como filtros para la fluorescencia UV, azul y verde.



Figura 3.10. Microscopio óptico automático Olympus BX61

Para el estudio específico de las mayonesas se utilizaron ampliificaciones 20x y 40x, y no se empleó ningún filtro de luz. Se tomaron imágenes de las mayonesas a temperatura de refrigeración y a temperatura ambiente.

### 3.2.6. Diseño factorial de experimentos y análisis estadístico

Se realizó un diseño factorial de experimentos, basado en el método de Taguchi, para el cual se utilizó una matriz ortogonal del tipo  $2^3$  ( $L_8$ ), con tres factores y dos niveles distintos para cada factor. Esta matriz se corresponde con un conjunto de 8 experimentos.

Los tres factores que se estudiaron fueron: tipo de aceite (A), contenido calórico (C) y temperatura (T) de la mayonesa. El objetivo era determinar la influencia de dichos factores sobre los parámetros estudiados. La Tabla 3.2 muestra los factores seleccionados con sus correspondientes niveles.

Tabla 3.3. Factores y valores correspondientes a los niveles estudiados

<b>Niveles</b>	<b>Factores</b>		
	<b>Aceite (A)</b>	<b>Contenido calórico (C)</b>	<b>Temperatura (T)</b>
<b>1</b>	Vegetal	Normal	Ambiente
<b>2</b>	Oliva	<i>Light</i>	Refrigeración

Para establecer la relevancia de los factores seleccionados sobre los parámetros medidos, se utilizó el método del análisis de varianza (*ANOVA*) de un factor. *ANOVA* es una herramienta estadística que determina si varios niveles de un factor específico pueden tener diferentes efectos sobre los parámetros que se observan o se miden. Además, *ANOVA* permite establecer si las medias de las medidas realizadas difieren significativamente unas de otras o si las diferencias observadas se deben al azar (21).

En resumen, la base del *ANOVA* consiste en la comparación de dos tipos de variación: *variación entre los grupos*, que refleja el efecto de los niveles de factores, y *variación dentro de los grupos*, que representa el error aleatorio del proceso de muestreo (21).

## **4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN**

## 4.1. Características reológicas

Los resultados de reología se presentan de forma que faciliten la comparación de las distintas mayonesas medidas y permitan determinar qué tipo de fluidos son las mayonesas, así como las variables que las caracterizan.

### 4.1.1. Curva de flujo

Las curvas de flujo obtenidas, tanto a 20°C como a 4°C (Figuras 4.1 y 4.2, respectivamente), muestran que todas las mayonesas son fluidos no newtonianos de comportamiento plástico, que siguen la ecuación de Herschel-Bulkley.

En la Tabla 4.1 se resumen los parámetros de la ecuación de Herschel-Bulkley, calculados a partir de las curvas de flujo obtenidas en el reómetro, para los dos valores de temperatura estudiados.

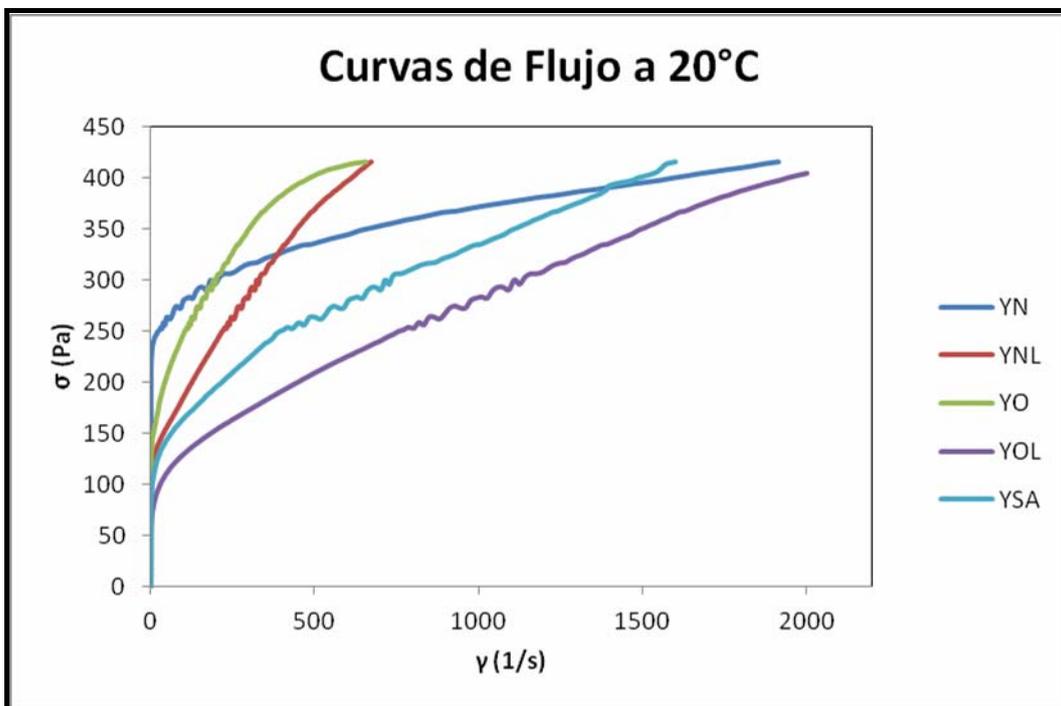


Figura 4.1. Curvas de flujo de las mayonesas a 20°C

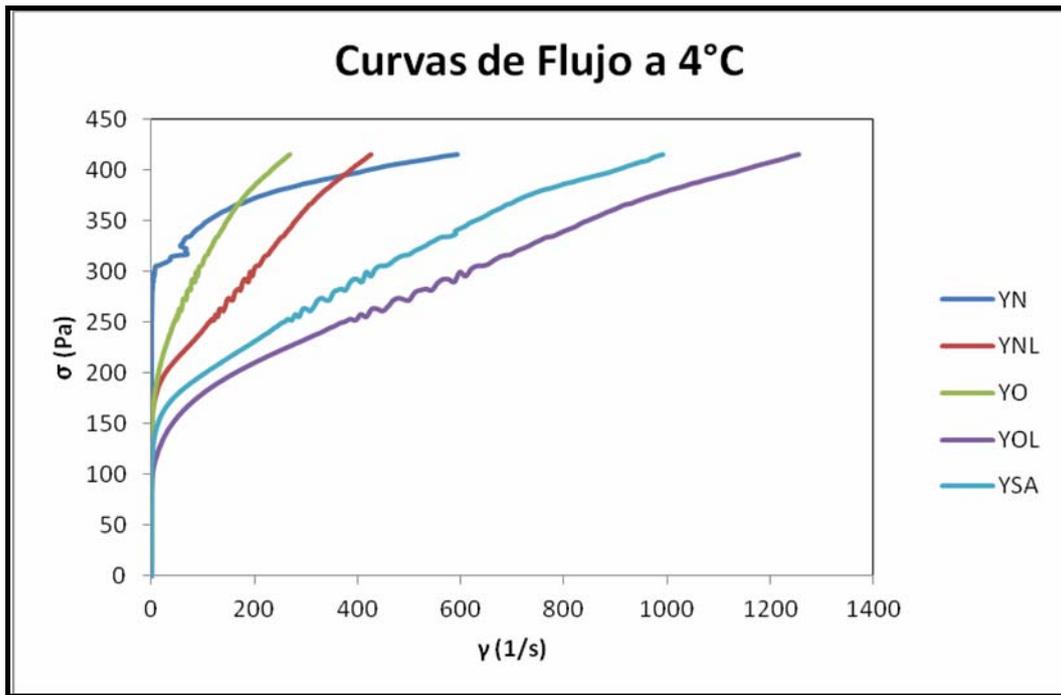


Figura 4.2. Curvas de flujo de las mayonesas a 4°C

Tabla 4.1. Parámetros de la ecuación de Herschel-Bulkley

Mayonesa	20°C			4°C		
	$\sigma_0$ (Pa)	$K$	$n$	$\sigma_0$ (Pa)	$K$	$n$
YN	202.3±1.5	3.1±0.7	0.40±0.10	245.9±18.7	4.3±0.1	0.29±0.04
YNL	95.2±0.7	2.5±0.1	0.54±0.01	112.2±3.7	4.1±0.4	0.37±0.04
YO	107.8±4.7	3.8±0.5	0.41±0.05	120.4±0.6	3.4±1.1	0.50±0.10
YOL	56.4±1.6	2.5±0.1	0.49±0.01	77.2±4.0	3.4±0.3	0.41±0.03
YSA	87.0±8.9	2.4±0.1	0.50±0.01	103.3±1.8	3.2±0.1	0.43±0.01

Se observa que el *índice de comportamiento al flujo* ( $n$ ) es inferior a uno en todos los casos, por lo que se puede concluir que las mayonesas, una vez superado el umbral de fluencia, se comportan como un **fluido pseudoplástico**.

En la Figura 4.3, se observa que, para la mayonesa Ybarra Normal, el umbral de fluencia es menor a temperatura ambiente que a la temperatura de refrigeración. Este comportamiento, totalmente habitual para este tipo de fluidos, resulta similar para las otras mayonesas, como se aprecia en las graficas incluidas el Apéndice I.

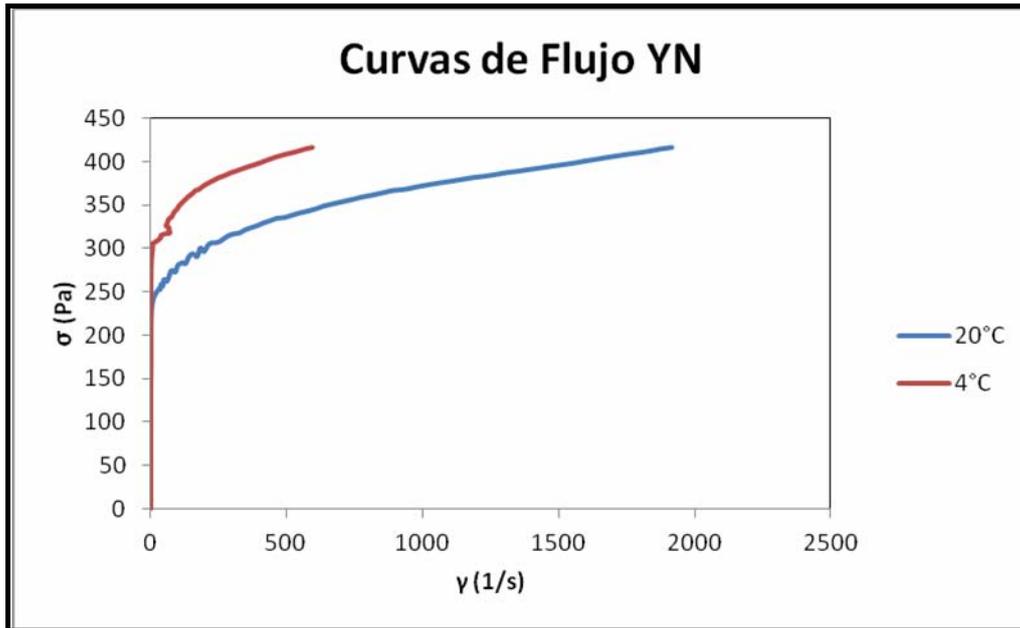


Figura 4.3. Curvas de flujo de la mayonesa Ybarra Normal a dos temperaturas

#### 4.1.2. Barrido de frecuencia

En la Figura 4.4 se presentan las curvas de barrido de frecuencia para la mayonesa Ybarra Ligeroliva. En este ensayo se demuestra el *comportamiento viscoelástico* de este fluido, al ser  $G'$  mayor que  $G''$ , comportamiento que resulta análogo al de las otras mayonesas. Asimismo, se observa una disminución del valor de ambos módulos, si la mayonesa se encuentra a baja temperatura.

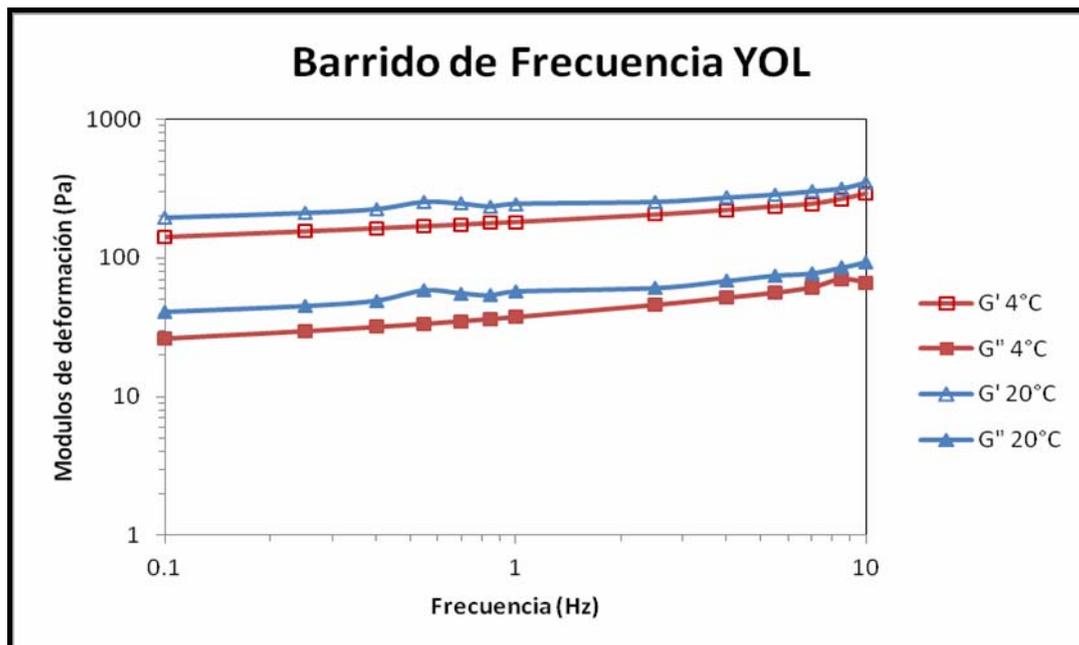


Figura 4.4. Curvas de barrido de frecuencia de la mayonesa Ybarra Ligeroliva a dos temperaturas

En la Figura 4.5, donde se presentan las curvas de barrido de frecuencia para todas las mayonesas a 4°C, se observa que existen diferencias entre los módulos de deformación de los distintos productos. Adicionalmente, el análisis de varianza indica que el valor del módulo de almacenamiento  $G'$  se ve afectado por el tipo de aceite y por el contenido calórico de la mayonesa ( $P < 0.5$ ), mientras que  $G''$  solo está influido por el contenido calórico.

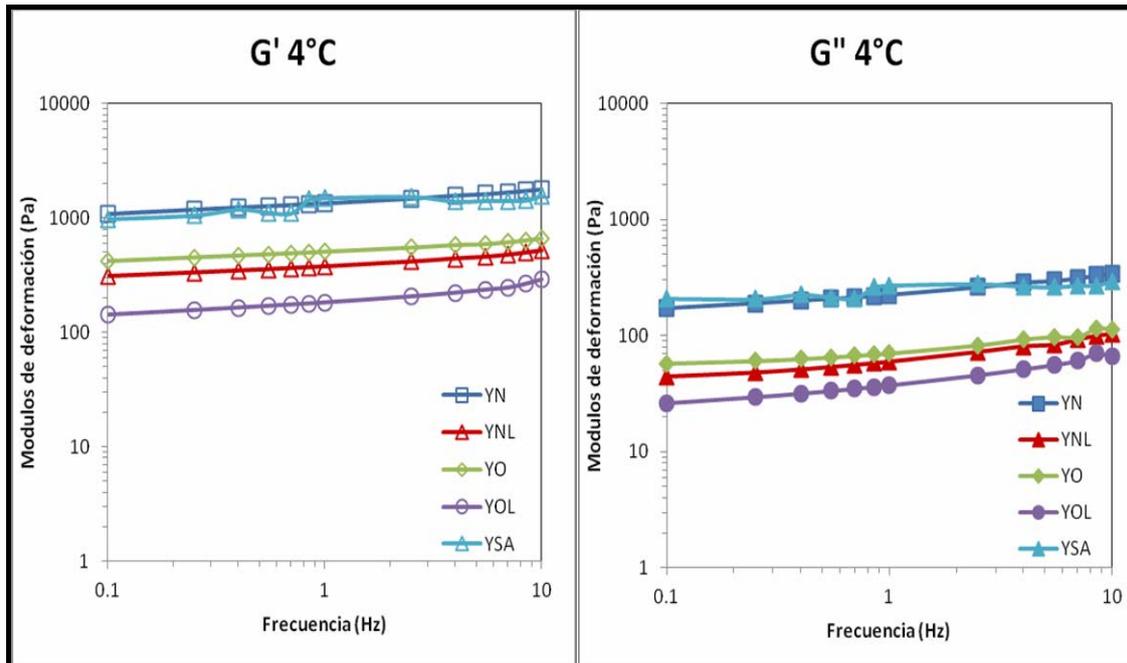


Figura 4.5. Curvas de barrido de frecuencia de las mayonesas a 4°C

## 4.2. Características de las emulsiones

Las mayonesas estudiadas, a pesar de ser todas emulsiones aceite en agua, presentan diferencias entre ellas debido a la concentración de aceite utilizado y al tipo de estabilizante. Las características que han sido objeto de estudio en este Proyecto son las siguientes: estabilidad, tamaño de partícula y microestructura.

### 4.2.1. Estabilidad

Los análisis de estabilidad de las mayonesas, realizados en el Turbiscan durante dos semanas, tanto a temperatura ambiente, como de refrigeración, indican sin lugar a duda que todas las emulsiones son altamente estables, en las condiciones evaluadas.

Las Figuras 4.6 y 4.7, muestran a modo de ejemplo dos perfiles de retrodispersión proporcionados por el equipo de medida de estabilidad. Se constata que no se producen cambios en toda la altura de la celda durante las dos semanas de duración del experimento.

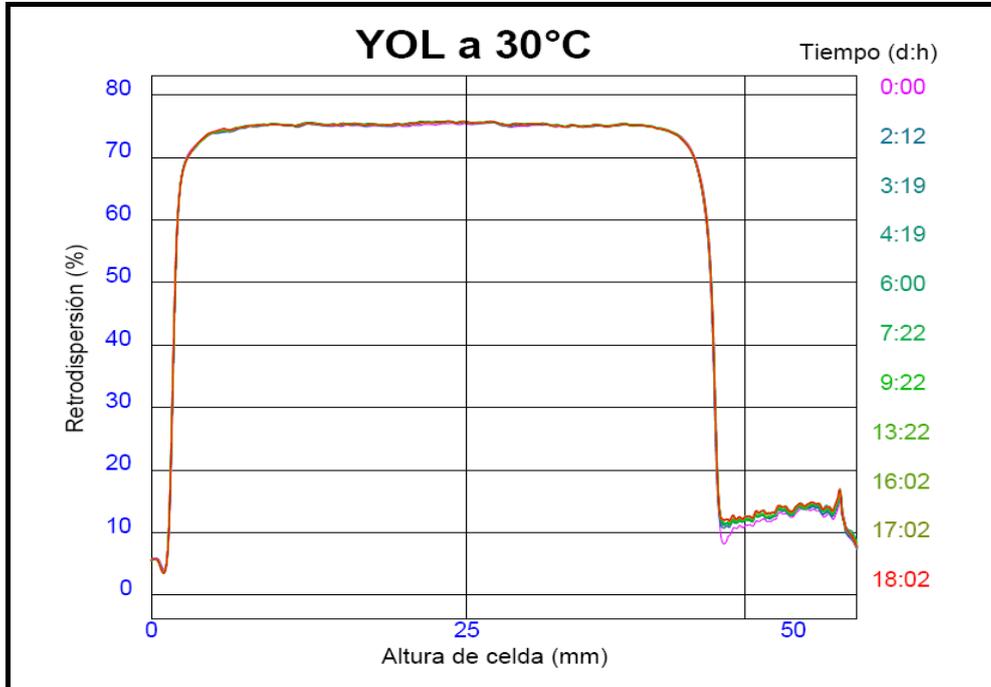


Figura 4.6. Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Ligeroliva a 30°C

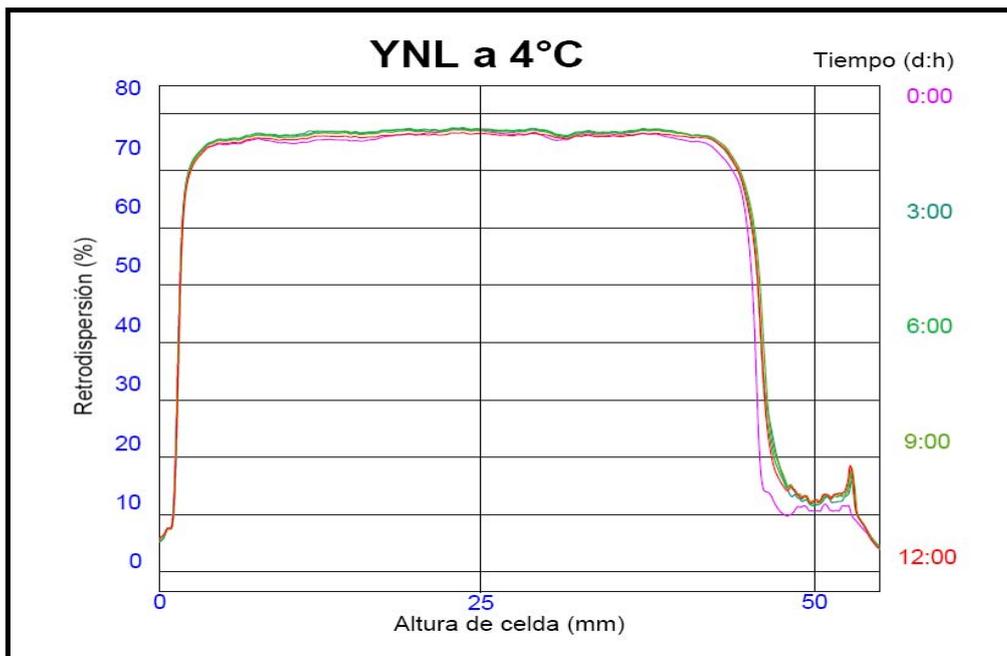


Figura 4.7. Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Normal Ligera a 4°C

Al comprobar que las temperaturas estudiadas, 30°C y 4°C, no producían desestabilización de las mayonesas, probablemente debido al uso de estabilizantes para evitar la ruptura de la emulsión durante su almacenamiento y comercialización, se aplicaron condiciones de temperatura más extremas al producto para estudiar su respuesta.

Primeramente, se calentó la mayonesa hasta 80°C, durante dos horas, y se midió la variación de la retrodispersión ( $\Delta BS$ ). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.2. Asimismo, a modo de ejemplo, en la Figura 4.8 se muestran los perfiles de retrodispersión para la mayonesa YNL, que es la que dio lugar a una desestabilización más acusada durante este calentamiento.

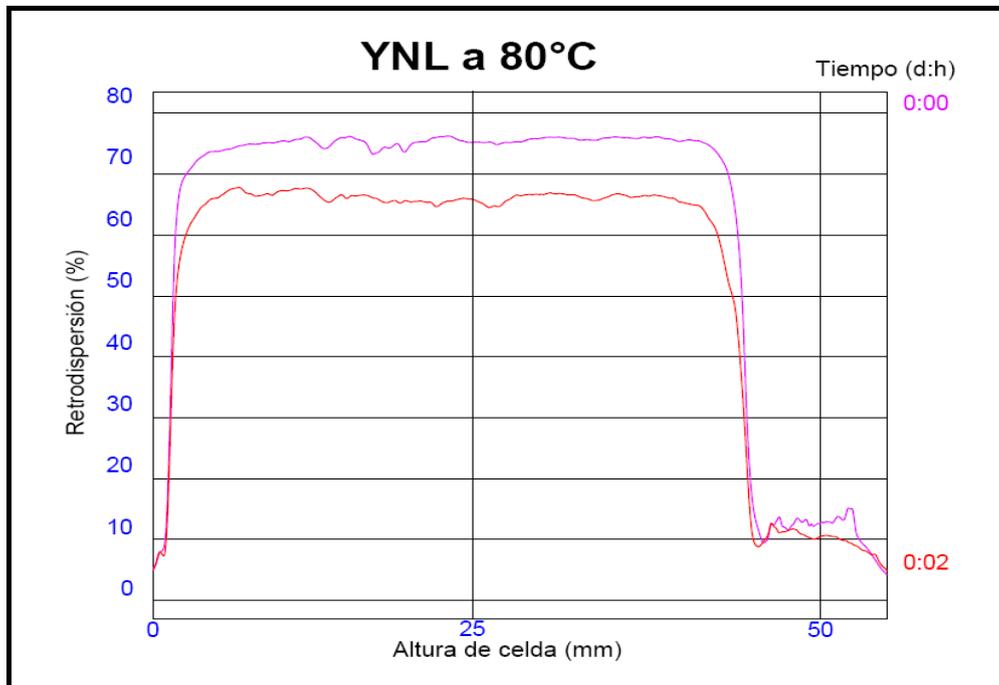


Figura 4.8. Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Normal Ligera a 80°C

Durante este experimento, se observa la coalescencia de las gotas de aceite y la eventual separación de las mismas hacia la parte superior de la celda.

Tung y Jones (1981) encontraron que, a medida que las mayonesas envejecían, la distribución de tamaños de gota variaba a un número reducido de gotas de gran tamaño, lo que finalmente conducía a la separación de las fases de la mayonesa (22). Cuando la mayonesa se almacena a temperaturas elevadas, el aumento del

movimiento browniano de las gotas, la disminución de la viscosidad de la fase continua y la mayor solubilidad de los tensioactivos contribuyen a la ruptura de la emulsión (4).

Las mayonesas se sometieron también a un proceso de congelación a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 h, seguido de una descongelación a temperatura ambiente, realizando a continuación medidas de retrodispersión. A modo ilustrativo, la Figura 4.9 muestra las curvas de retrodispersión de la mayonesa YO, que fue la que presentó una mayor desestabilización, con un  $\Delta\text{BS}$  igual a 45 (Tabla 4.2) y llegando incluso a la ruptura completa de la emulsión, como se puede observar en la Figura 4.10.

Tabla 4.2. Variación de la retrodispersión de las mayonesas

Condición	$\Delta\text{BS}$				
	YN	YNL	YO	YOL	YSA
80°C	4.5	9	5.3	4.4	1.8
Congelación / descongelación	1.2	9	45	15	26

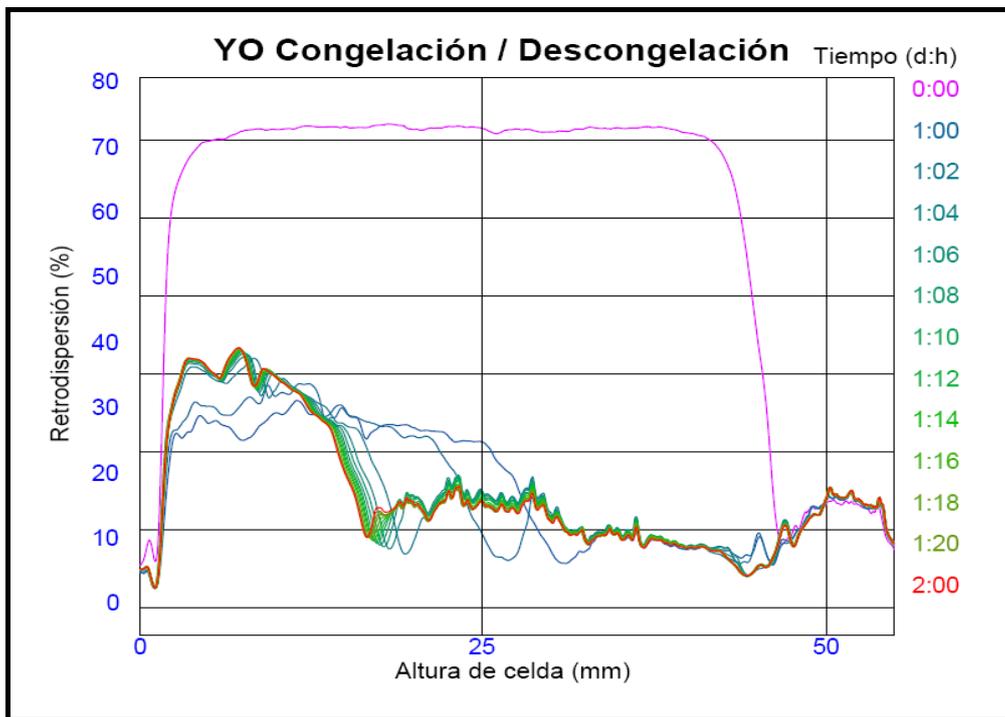


Figura 4.9. Curvas de retrodispersión de la mayonesa Ybarra Oliva después de un ciclo congelación / descongelación

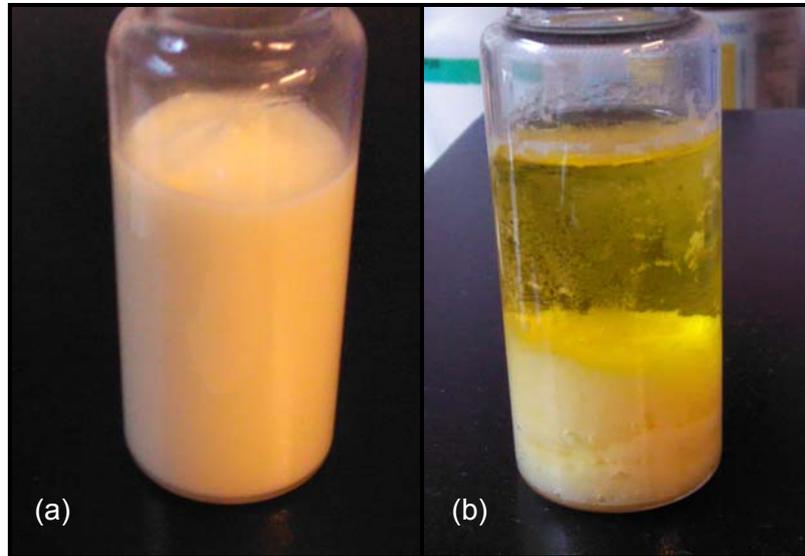


Figura 4.10. Mayonesa Ybarra Oliva antes (a) y después (b) del ciclo congelación / descongelación

Sobre los efectos de la congelación / descongelación de las mayonesas, Magnusson, Rosén y Nilsson (2010) comprobaron que la inestabilidad estaba relacionada con el alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados (ácido oleico) en el aceite y con un elevado porcentaje de triglicéridos cristalizados a  $-25^{\circ}\text{C}$ . Además, la formación de grandes cristales contribuía a la desestabilización de la emulsión (23). Esto se corresponde con los resultados obtenidos, ya que la mayonesa YO es la que más ácido oleico contiene, como consecuencia del mayor porcentaje de aceite de oliva, de todas las mayonesas estudiadas, que se encuentra presente.

#### 4.2.2. Distribución de tamaños de partícula

En la Figura 4.11 se muestra una comparación de la distribución de tamaños de partícula para todas las mayonesas estudiadas, a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ . Se observa que la distribución resulta más estrecha para las mayonesas con alto contenido calórico, como la YN y la YO. Se puede afirmar que el tamaño de partícula es más homogéneo en las mayonesas sin sustitución parcial de grasa por otros compuestos, como almidón de maíz modificado.

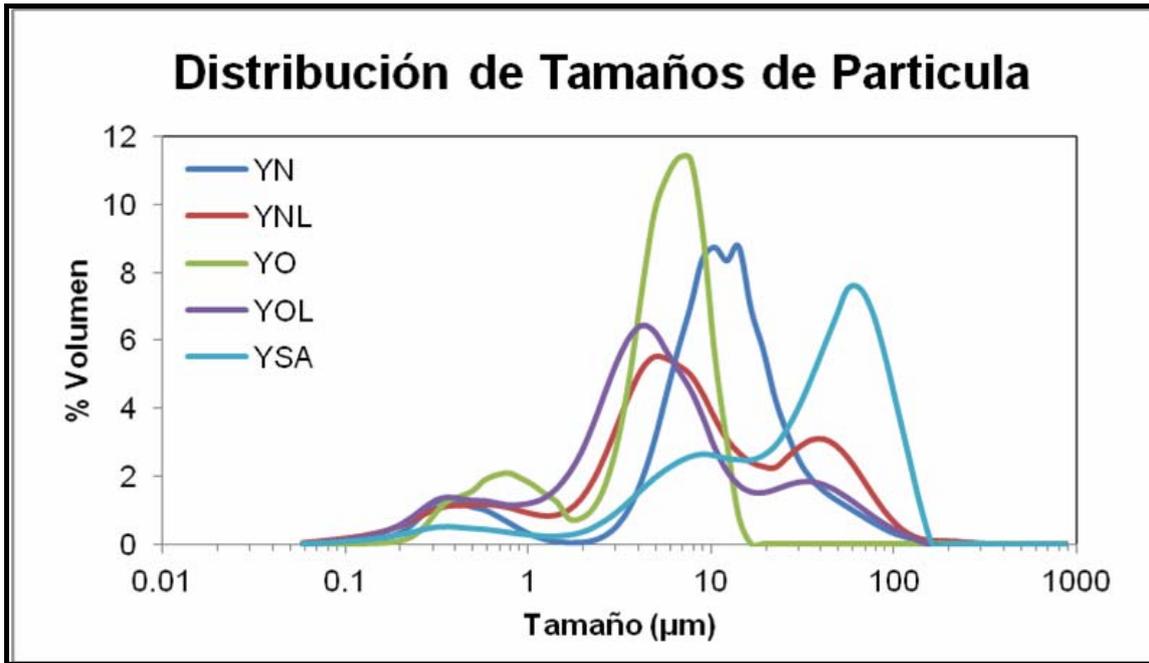


Figura 4.11. Distribución de tamaño de partícula de las mayonesas a 20°C

Adicionalmente, en la Figura 4.11 se observa que la distribución de tamaños de partícula se ve afectada por la modificación de los factores que han sido objeto de estudio en este trabajo, tipo de aceite y contenido calórico, lo que está confirmado además por el análisis de la varianza realizado a la variable *diámetro medio en superficie* ( $D_{3,2}$ ). Los valores promedio obtenidos de  $D_{3,2}$  para las mayonesas estudiadas se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Valores promedio del diámetro medio en superficie ( $D_{3,2}$ ) de las mayonesas

Mayonesa	$D_{3,2}$	
	Temperatura Ambiente	Temperatura Refrigeración
YN	1.95±0.09	2.40±0.40
YNL	1.90±0.10	1.91±0.08
YO	1.93±0.06	1.50±0.20
YOL	1.50±0.05	1.38±0.06
YSA	3.90±0.40	3.60±0.90

Según los resultados del ANOVA, el diámetro medio en superficie no se ve afectado por el cambio de temperatura en el intervalo estudiado, el cual no parece influir de manera apreciable sobre las partículas.

Se debe destacar, además, la dificultad de mantener la baja temperatura en el Mastersizer, durante el análisis de las muestras refrigeradas. Estas, al entrar en contacto con el fluido de transporte, se calentaban hasta alcanzar 14°C, en la mayoría de los casos.

#### 4.2.3. Microestructuras

Las microestructuras de las mayonesas, observadas con el microscopio óptico, se muestran en la Figura 4.12.

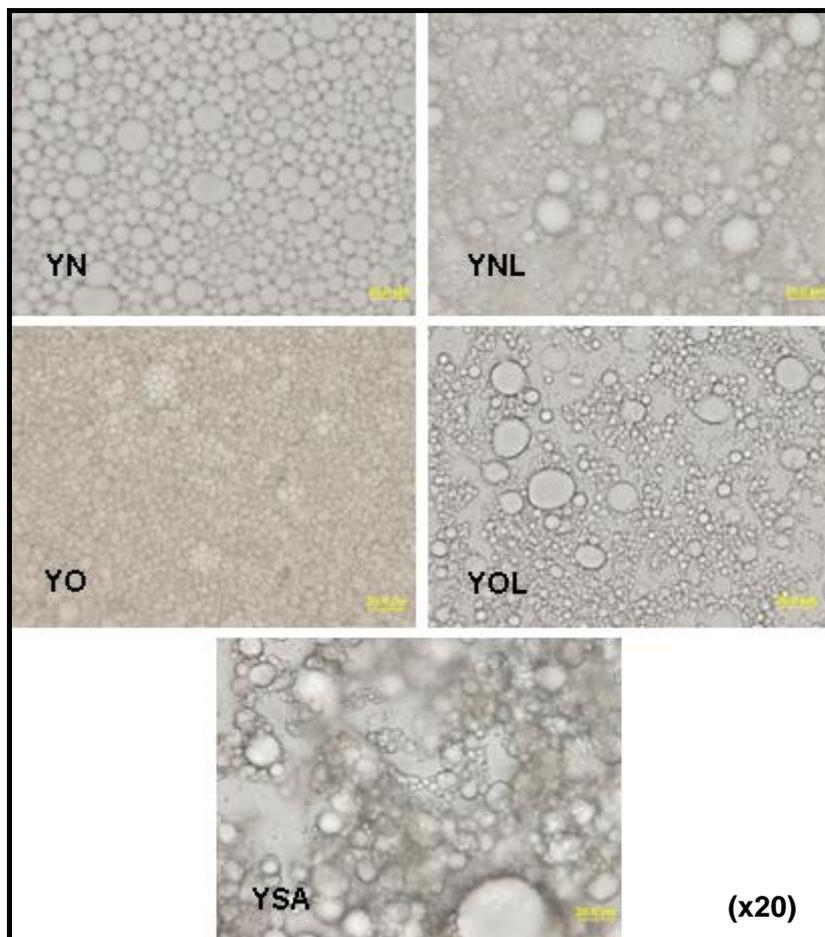


Figura 4.12. Microestructuras de las mayonesas observadas con el microscopio óptico

Se aprecia que las mayonesas con un porcentaje elevado de aceite presentan mayor uniformidad en el tamaño de gota, es decir son monodispersas. Por el contrario, las mayonesas ligeras y sin azúcar presentan gotas de distinto tamaño, es decir son polidispersas, pudiendo apreciarse como las gotas pequeñas ocupan los espacios alrededor de las grandes.

Worrasinchai et al. (2005) encontraron que las mayonesas con menor porcentaje de aceite en la emulsión, presentaban una red de gotas agregadas con espacios vacíos de distintos tamaños, los cuales contenían la fase acuosa (24).

Además, Li et al. (2007) constataron que las mayonesas con una microestructura más compacta tenían un módulo de almacenamiento ( $G'$ ) mayor, y que esta estructura de gotas compacta era la responsable de la elevada resistencia a la deformación que presentaban las mayonesas (25).

Por otra parte, la observación minuciosa de las fotografías de la Figura 4.12 permite afirmar la concordancia existente con los datos del análisis de distribución de tamaño de partícula. Así, efectivamente se aprecia que las mayonesas YN y YO presentan una distribución de tamaños más homogénea y que en la mayonesa sin azúcar se encuentran las partículas de mayor tamaño.

### **4.3. Características texturales**

Las características texturales permiten comparar las mayonesas estudiadas en base a los múltiples parámetros que intervienen en la textura del producto.

En la Figura 4.13 se presentan las curvas resultantes de los ensayos de untabilidad realizados a 4°C. Se observa que las gráficas presentan dos zonas, la de la izquierda, que corresponde a la zona de descenso de la sonda, y la de la derecha que representan la zona de ascenso.

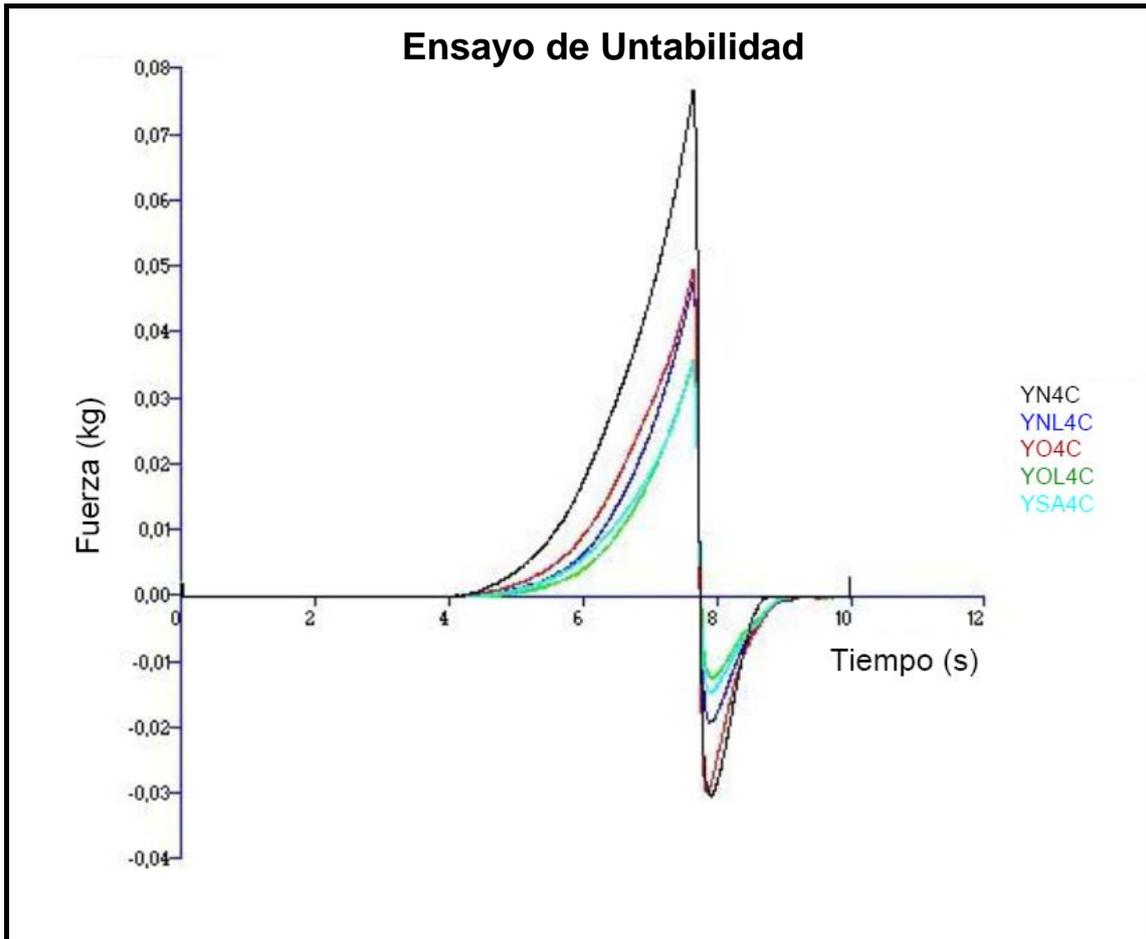


Figura 4.13. Curvas del ensayo de untabilidad de las mayonesas

Los ensayos de untabilidad muestran que todas las mayonesas tienen respuestas distintas, ya que unas presentan valores mayores que otras. Así, la mayonesa YN presenta los parámetros texturales más elevados, siendo las mayonesas YOL y YSA las que los tienen más bajos.

Los resultados del análisis de la varianza indican que el contenido calórico afecta a todos los parámetros texturales estudiados, en cambio el tipo de aceite solo afecta a la dureza y al trabajo de cizalla. Finalmente, la temperatura en el intervalo evaluado no produce variación relevante en los parámetros texturales.

Los parámetros que definen las características texturales de las mayonesas, se muestran en la Tabla 4.4, para las dos temperaturas seleccionadas.

Tabla 4.4. Parámetros texturales de las mayonesas

Mayonesa	Parámetro	Temperatura	
		4°C	20°C
YN	Dureza (g)	82.2 ± 6.6	66.3 ± 2.5
	Trabajo de cizalla (g·s)	89.2 ± 6.6	70.6 ± 2.5
	Pegajosidad (g)	32.4 ± 1.5	29.1 ± 1.6
	Trabajo de adhesión (g·s)	16.0 ± 1.1	14.8 ± 0.6
YNL	Dureza (g)	50.0 ± 1.5	35.6 ± 0.6
	Trabajo de cizalla (g·s)	48.3 ± 2.7	34.5 ± 0.7
	Pegajosidad (g)	20.7 ± 1.0	16.5 ± 0.3
	Trabajo de adhesión (g·s)	12.1 ± 0.6	10.1 ± 0.5
YO	Dureza (g)	51.1 ± 1.3	38.3 ± 2.1
	Trabajo de cizalla (g·s)	52.9 ± 2.0	39.5 ± 2.6
	Pegajosidad (g)	31.3 ± 1.0	24.4 ± 1.1
	Trabajo de adhesión (g·s)	16.1 ± 0.4	13.2 ± 0.5
YOL	Dureza (g)	37.8 ± 1.4	24.1 ± 0.8
	Trabajo de cizalla (g·s)	34.9 ± 2.5	21.1 ± 1.0
	Pegajosidad (g)	13.5 ± 0.7	9.9 ± 0.3
	Trabajo de adhesión (g·s)	8.6 ± 0.6	6.6 ± 0.3
YSA	Dureza (g)	37.4 ± 1.1	21.1 ± 0.7
	Trabajo de cizalla (g·s)	36.1 ± 1.1	19.3 ± 0.8
	Pegajosidad (g)	15.2 ± 0.5	10.8 ± 0.5
	Trabajo de adhesión (g·s)	9.3 ± 0.4	7.1 ± 0.3

Liu et al. determinaron que la dureza de la mayonesa esta directamente relacionada con su viscosidad. En la mayonesa, la superficie de contacto entre las gotas de aceite conduce a una importante fuerza de fricción, que se opone al libre flujo de la emulsión frente a una fuerza de cizallamiento. Por lo tanto, un menor diámetro de las gotas de aceite conduce a una mayor área de contacto entre las mismas y a un aumento de la viscosidad y la dureza del producto (25).

En nuestro caso esto no parece cumplirse totalmente, ya que la mayonesa YOL, con el menor valor de diámetro  $D_{3,2}$ , es la que presenta valores muy bajos de dureza. Sin

embargo, observando la Figura 4.12, se puede decir que la mayonesa YOL, a pesar de tener partículas muy pequeñas, tiene también unas pocas de mayor tamaño, es decir presenta una distribución polidispersa, como ya se comentó.

En cambio, las mayonesas YN e YO presentan un diámetro pequeño y una distribución monodispersa, por lo que se puede decir que la distribución de tamaño de las gotas afecta a la fuerza de fricción entre ellas, ya que cuando existen partículas muy grandes éstas probablemente no puedan ser frenadas por las más pequeñas al cizallar la emulsión. Además, se aprecia que la mayonesa SA si se corresponde con el comportamiento demostrado por Lui et al., ya que ésta presenta el diámetro mayor y la menor dureza, lo que posiblemente también se encuentra relacionado con las grandes zonas continuas que existen entre las gotas (Figura 4.12).

#### 4.4. Análisis estadístico de resultados

El análisis estadístico llevado a cabo en este trabajo permitió determinar si cada uno de los tres factores evaluados afectaban o no a las variables seleccionadas. En la Tabla 4.5 se presentan de manera resumida los resultados obtenidos, de forma que resulte sencillo conocer qué variables se encuentran afectadas por los factores y cuáles no.

Tabla.4.5. Relación entre factores y variables estudiadas

Variable	Factor		
	Aceite (A)	Contenido Calórico (C)	Temperatura (T)
G'	+	+	-
G''	-	+	-
D <sub>3,2</sub>	+	+	-
Dureza	+	+	-
Trabajo de cizalla	+	+	-
Pegajosidad	-	+	-
Trabajo de adhesión	-	+	-

+ Afecta      - No afecta

Se observa que efectivamente, como ya se ha comentado, la temperatura en el intervalo aplicado no afecta a ninguna de las variables. En cambio, el contenido calórico afecta a todas las variables analizadas, es decir que las mayonesas normales y ligeras presentan notables diferencias entre ellas, al compararlas en base a las variables mencionadas. Finalmente, se comprueba que el tipo de aceite, vegetal u oliva, solo afecta a algunas de estas variables.

## **5. CONCLUSIONES**

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. El estudio realizado aporta información interesante para productores y consumidores de mayonesas respecto a las características de las mismas y a las diferencias entre algunos de los tipos que existen en el mercado.
2. El análisis reológico de las mayonesas evaluadas indica que todas siguen la ley de Herschel-Bulkley, presentando un comportamiento pseudoplástico después de superar el umbral de fluencia. Asimismo, los valores de los parámetros reológicos determinados indican que se pueden clasificar como fluidos viscoelásticos, cuyo comportamiento se encuentra influido por el tipo de aceite y el contenido calórico del producto.
3. Las mayonesas estudiadas presentan una buena estabilidad a temperatura ambiente. Sin embargo, si se calientan a 80°C o se someten a un ciclo congelación-descongelación comienzan a desestabilizarse. El proceso de desestabilización está notablemente influido por las características del producto.
4. El factor de temperatura entre los niveles estudiados, ambiente y refrigeración (20 °C y 4 °C), no afecta a ninguna de las variables analizadas mediante la técnica ANOVA. Se recomienda para futuros estudios realizar los mismos ensayos a otros valores de temperatura, comprendidos entre 20 °C y 80 °C, así como entre 4 °C y -20 °C..

## **6. SÍMBOLOS**

B.P.F.	Buenas prácticas de fabricación
CS	<i>Controlled Stress</i>
CR	<i>Controlled Rate</i>
D	Diámetro de partícula
D <sub>3,2</sub>	Diámetro medio en superficie
D <sub>4,3</sub>	Diámetro medio en volumen
g	Aceleración de la gravedad
G	Modulo de Young
G*	Modulo complejo
G'	Modulo de almacenamiento
G''	Modulo de perdida
K	Índice de consistencia del fluido
n	Índice de comportamiento al flujo
r	Radio de gota
O/W	Emulsión aceite en agua
V	Velocidad de separación de fases de la emulsión
W/O	Emulsión agua en aceite
YN	Ybarra <i>la mayonesa de toda la vida</i>
YNL	Ybarra mayonesa normal ligera
YO	Ybarra mayonesa 100% aceite de oliva
YOL	Ybarra mayonesa ligeroliva
YSA	Ybarra mayonesa ligera sin azúcar

*Símbolos griegos*

$\gamma$	Velocidad de deformación
$\varepsilon_0$	Deformación máxima ejercida sobre el muelle
$\varepsilon$	Deformación
$\delta$	Ángulo de desfase
$\Delta BS$	Variación de la retrodispersión
$\eta$	Viscosidad
$\rho_c$	Densidad de la fase continua
$\rho_d$	Densidad de la fase dispersa
$\sigma$	Esfuerzo cortante
$\sigma_0$	Esfuerzo cortante umbral
$\omega$	Velocidad angular

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

1. Boatella, J.; Codony, R.; López, P., *Química y Bioquímica de los Alimentos II*, 1<sup>a</sup> Edición, Ediciones Universidad de Barcelona, Barcelona (2004)
2. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, *Panel de consumo alimentario*, <http://www.magrama.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-y-comercializacion-y-distribucion-alimentaria/panel-de-consumo-alimentario>, Mayo (2013)
3. Sinha, N.; Sidhu, J.; Barta, J.; Wu, J.; Cano, P., *Fruits and Fruit Processing*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, Iowa (2012)
4. Depree, J.A.; Savage, G.P., *Physical and flavor stability of mayonnaise*, Trends in Food Science & Technology, **12**, 157-163 (2001)
5. Cubero, N.; Monferrer, A.; Villalta, J., *Aditivos Alimentarios*, 1<sup>a</sup> Edición, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid (2002)
6. Ruiz, S., *Microencapsulación de Hierro en Niosomas para su Aplicación en Alimentos Funcionales*, Trabajo Fin de Máster, Master en Biotecnología Alimentaria, Universidad de Oviedo (2011)
7. Lizarraga, M.S.; Pan, L.G.; Añón, M.C.; Santiago, L.G., *Stability of concentrated emulsions measured by optical and rheological methods. Effect of processing conditions – I. Whey protein concentrate*, Food Hydrocolloids, **22**, 868-878 (2008)
8. Smith, A.F., *The Oxford Companion to American Food and Drink*, 1<sup>st</sup> Edition, Oxford University Press, New York (2007)
9. Real Decreto 858/1984 de 28 de marzo por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la Elaboración, Circulación y Comercio de Salsas de Mesa, BOE núm. 112 de 10 de mayo de 1984, páginas 12829 a 12833
10. Bailey, A.E., *Aceites y Grasas Industriales*, 1<sup>a</sup> Edición, Editorial Reverté, Barcelona (1984)
11. Potter, N.N.; Hotchkiss, J.H., *Food Science*, 5<sup>th</sup> Edition, Aspen Publishers, New York (1998)
12. Influencia de la Alimentación Extranjera en México, *Alimentos Light*, <http://alimentacionextranjeraenlapsicologiaalimentariamexicana.wikispaces.com/Alimentos+Light>, Junio (2013)

13. Alsina, A.; Planas, N., *Matemática Inclusiva: Propuestas para una Educación Matemática Accesible*, 1ª Edición, Narcea S.A. de Ediciones, Madrid (2008)
14. Quintáns, L.C., *Reología de Productos Alimentarios*, Tesis Doctoral, Universidad Santiago de Compostela (2009)
15. Laca, A., *Posibilidades del Empleo de Mediciones Reológicas Realizadas sobre Yema en la Determinación del Origen, Calidad y otras Cualidades del Huevo*, Proyecto de Investigación, Máster en Biotecnología Alimentaria, Universidad de Oviedo (2005)
16. Seymour, R.B.; Carraher, C.E., *Introducción a la Química de los Polímeros*, 1ª Edición, Editorial Reverté, Barcelona (1995)
17. Paredes, B., *Propiedades texturales de productos alimentarios*, Guía de Prácticas del Master de Biotecnología Alimentaria, Universidad de Oviedo (2012)
18. Gennaro, A.R., *Remington: The Science and Practice of Pharmacy*, 20<sup>th</sup> Edition, The University of the Sciences, Philadelphia (2000)
19. Garcia, G., *Texturometría Instrumental: Puesta a Punto y Aplicación a la Tecnología de Alimentos*, Proyecto Fin de Master, Master en Biotecnología Alimentaria, Universidad de Oviedo (2012)
20. Szczesniak, A.S., *Texture is a sensory property*, Food Quality and Preference, **13**, 215-225 (2000)
21. Weiers, R.M., *Introducción a la Estadística para Negocios*, 5ª Edición, International Thomson Editores, Mexico (2006)
22. Tung, M.A.; Jones, L.J., *Microstructure of mayonnaise and salad dressing*, Scanning Electron Microscopy, **3**, 523-530 (1981)
23. Magnusson, E.; Rosén, C.; Nilsson, L., *Freeze-thaw stability of mayonnaise type oil-in-water emulsions*, Food Hydrocolloids, **25**, 707-715 (2011)
24. Worrasinchai, S.; Suphantharika, M.; Pinjai, S.; Jamnong, P.,  *$\beta$ -Glucan prepared from spent brewer's yeast as a fat replacer in mayonnaise*, Food Hydrocolloids, **20**, 68-78 (2006)
25. Liu, H.; Xu, X.M.; Guo, S.D., *Rheological, texture and sensory properties of low-fat mayonnaise with different fat mimetics*, Food Science & Technology, **40**, 946-954 (2007)

## **8. APÉNDICE**

## A.1. Características reológicas

- Curvas de flujo

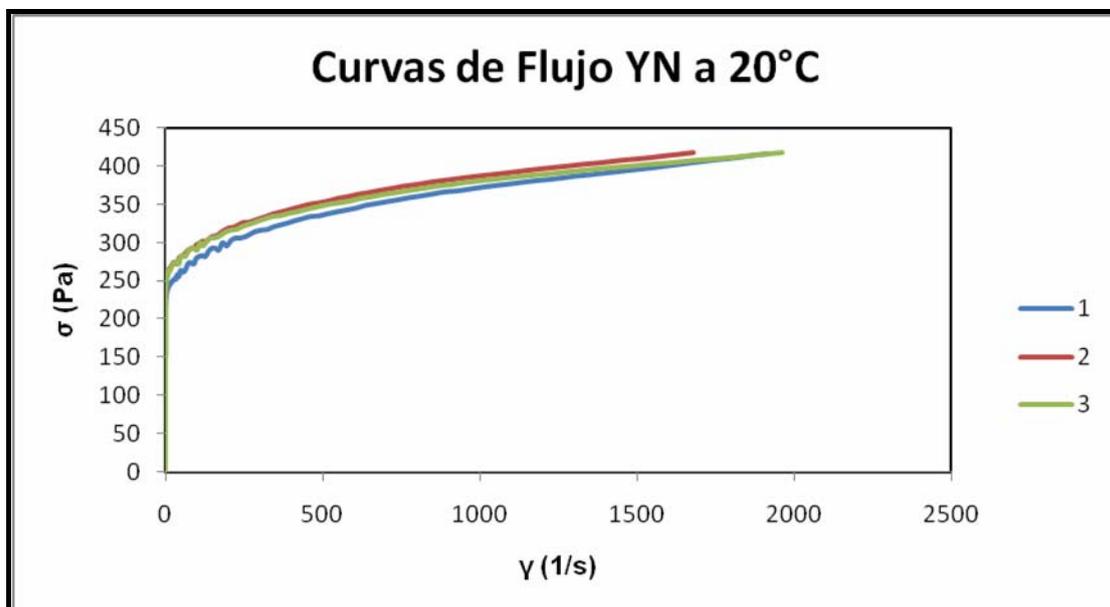


Figura A.1.1. Curvas de flujo de YN a 20°C

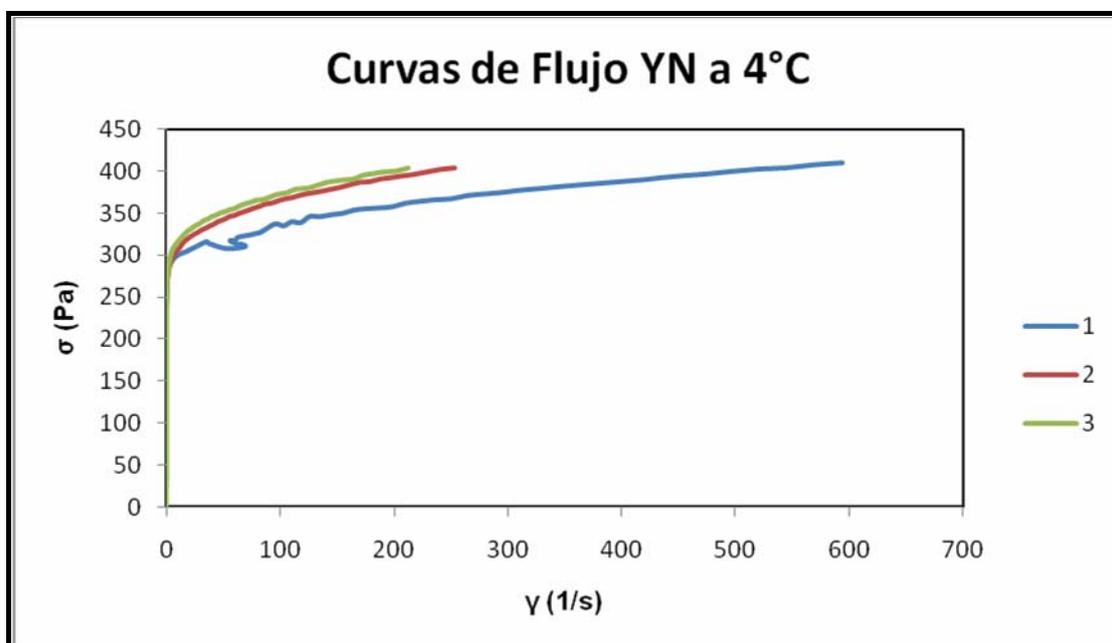


Figura A.1.2. Curvas de flujo de YN a 4°C

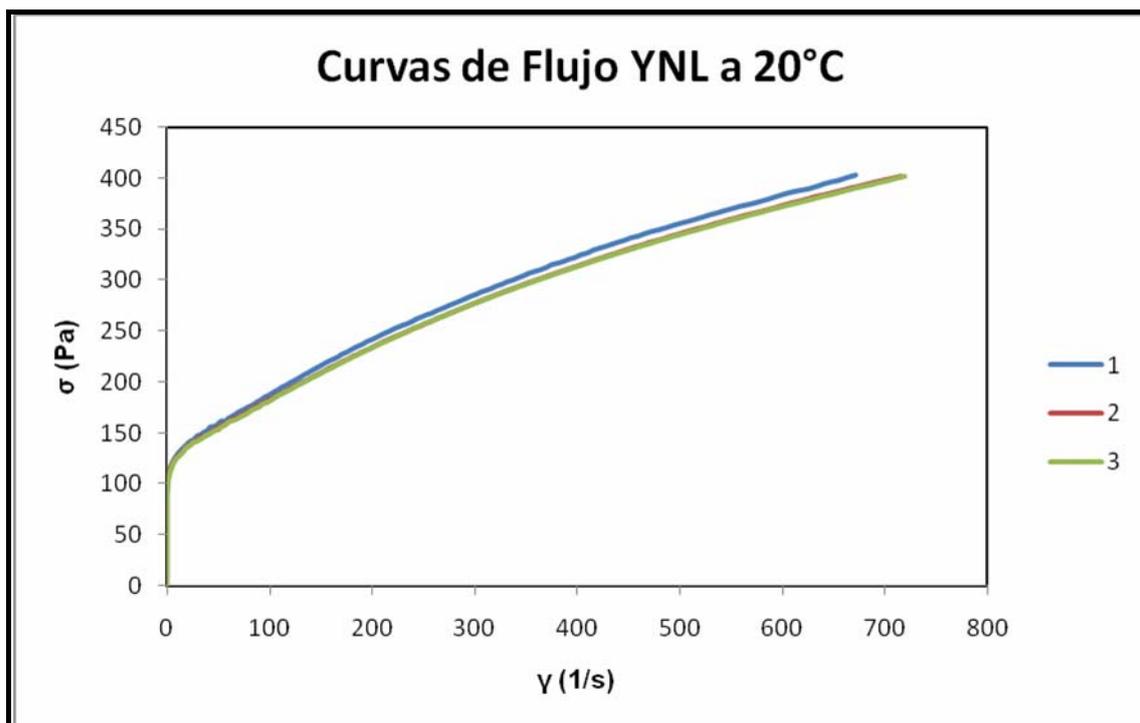


Figura A.1.3. Curvas de flujo de YNL a 20°C

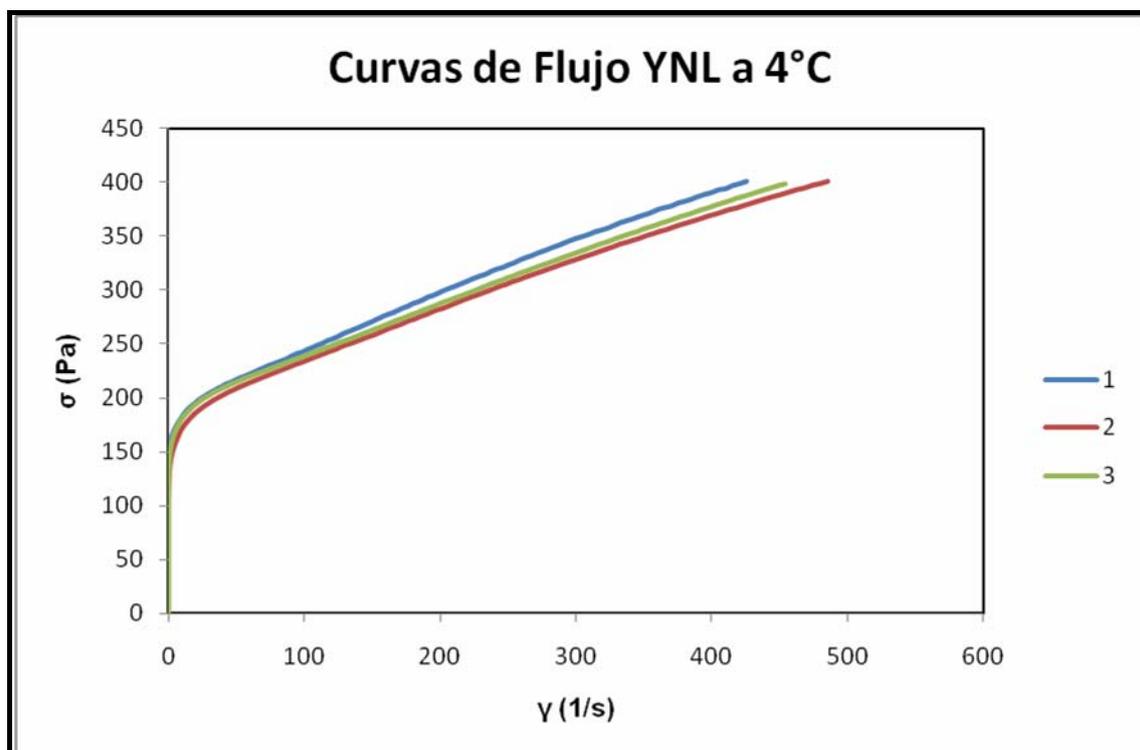


Figura A.1.4. Curvas de flujo de YNL a 4°C

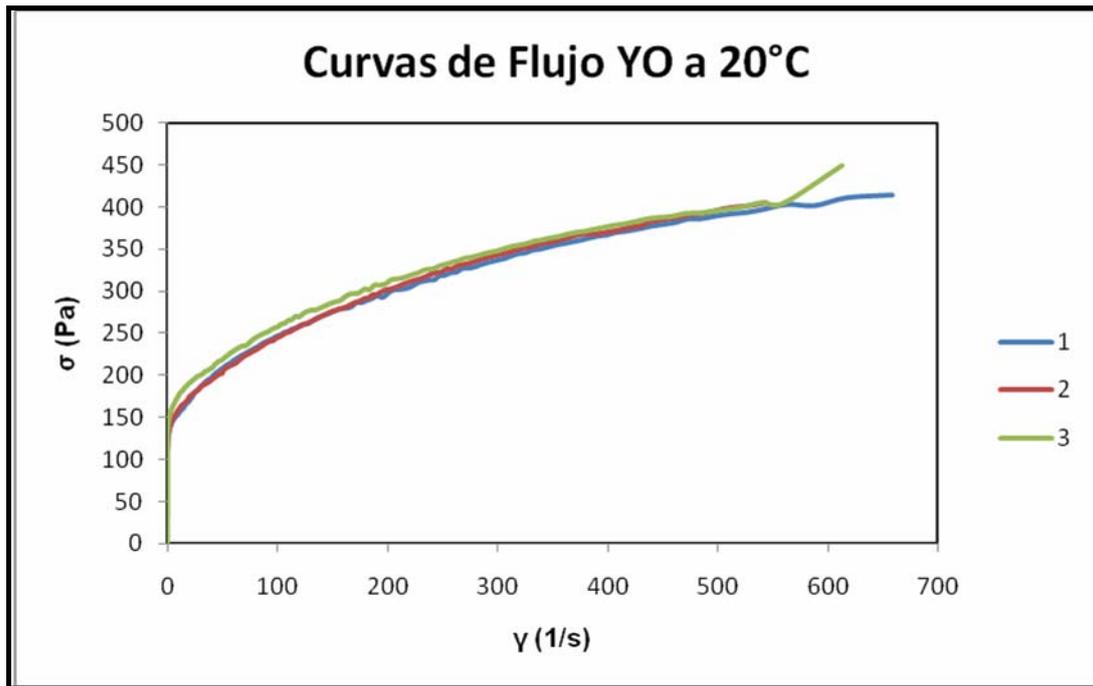


Figura A.1.5. Curvas de flujo de YO a 20°C

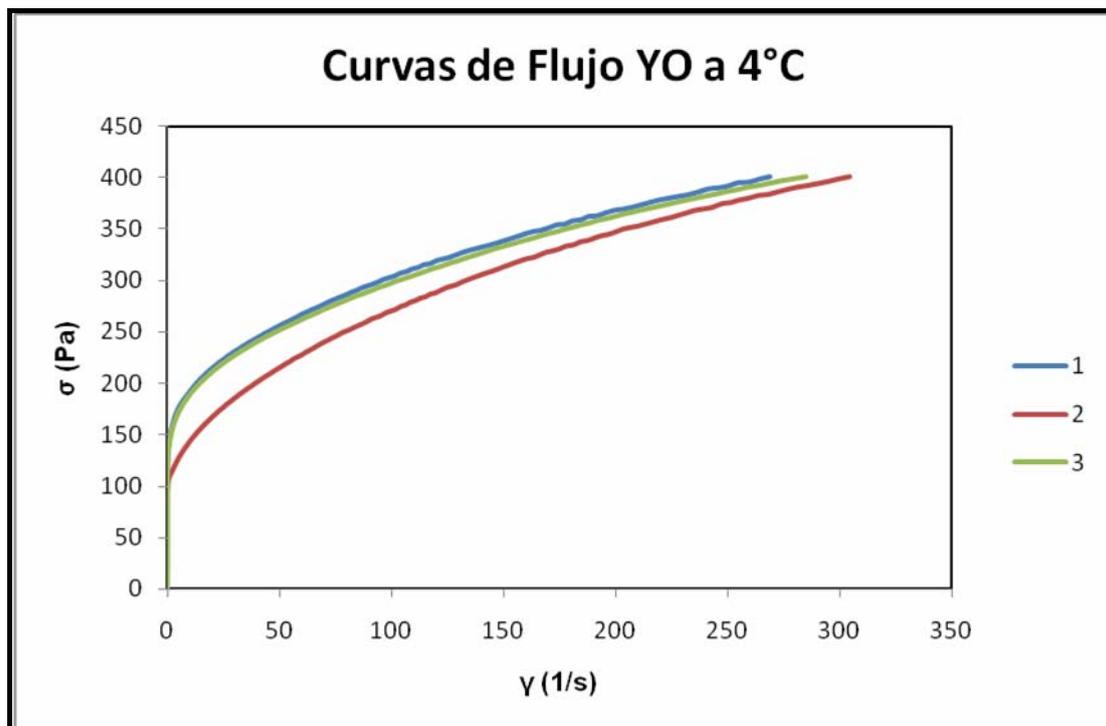


Figura A.1.6. Curvas de flujo de YO a 4°C

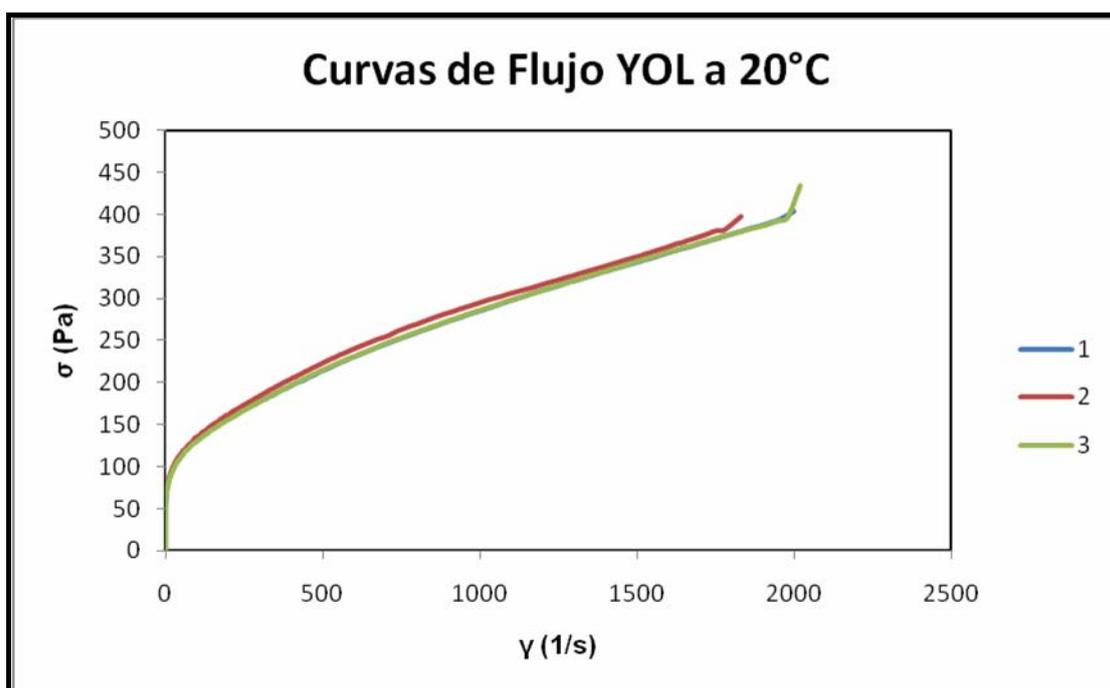


Figura A.1.7. Curvas de flujo de YOL a 20°C

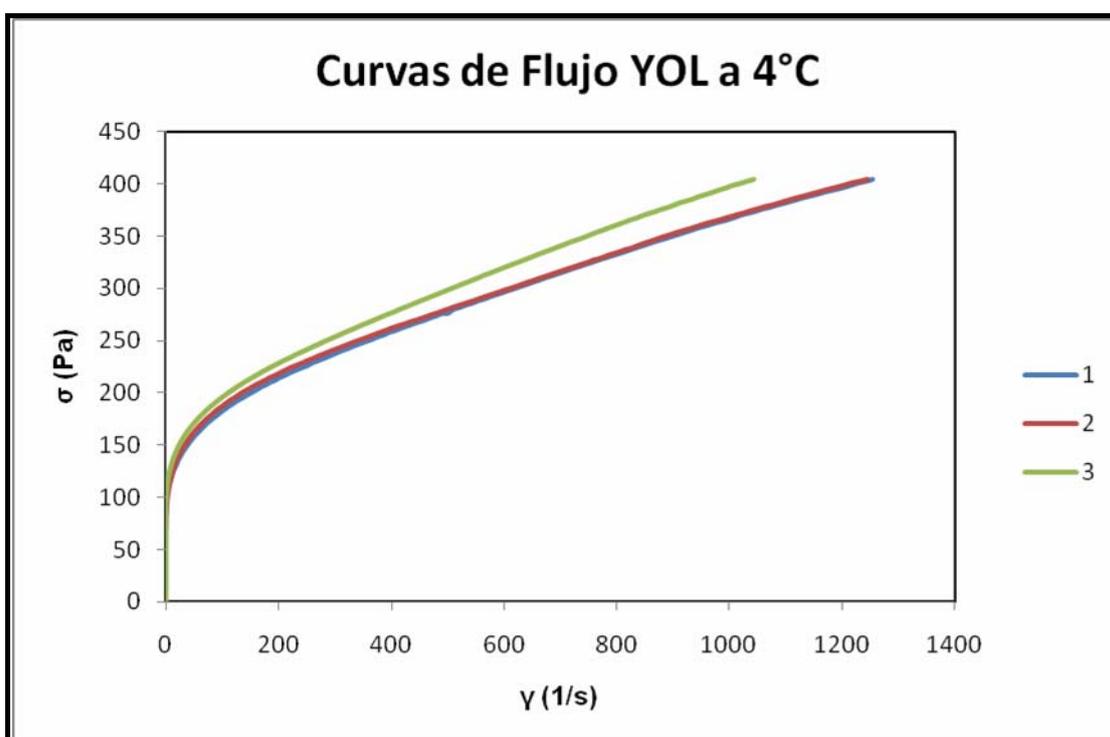


Figura A.1.8. Curvas de flujo de YOL a 4°C

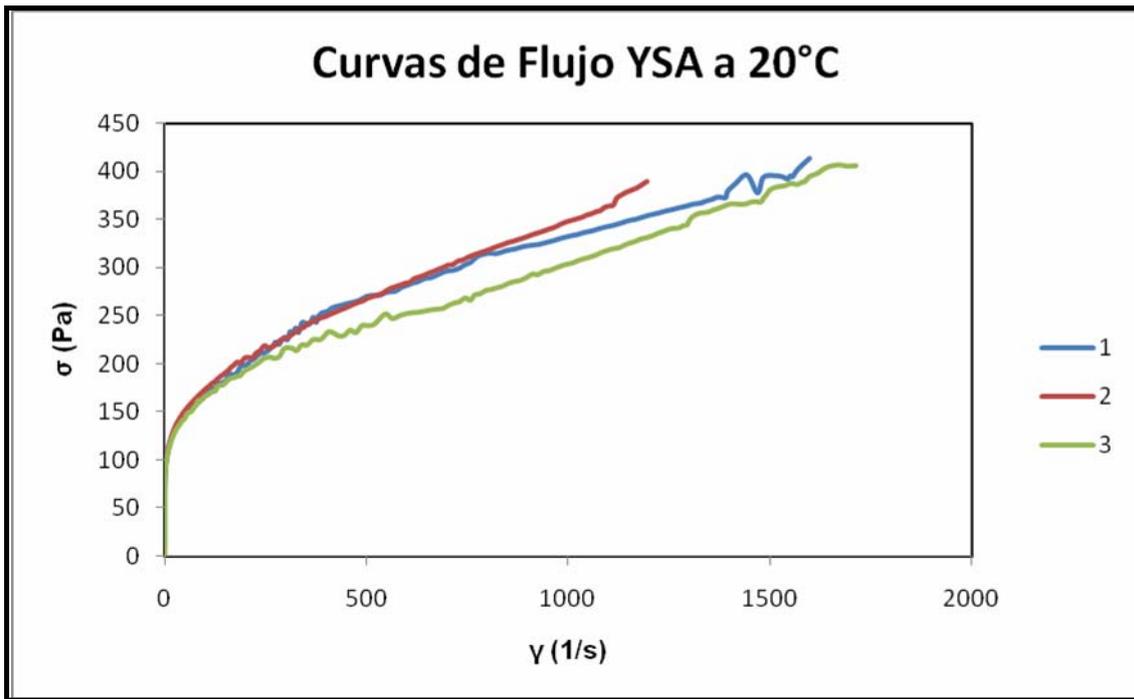


Figura A.1.9. Curvas de flujo de YSA a 20°C

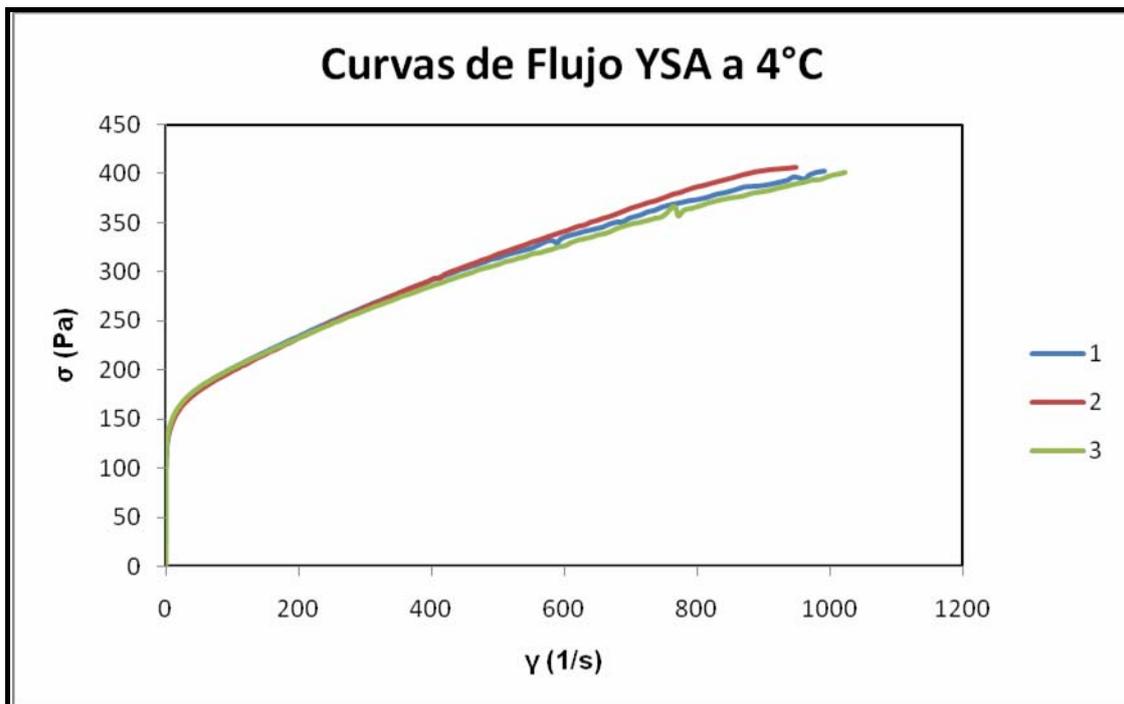


Figura A.1.10. Curvas de flujo de YSA a 4°C

- Barrido de frecuencia

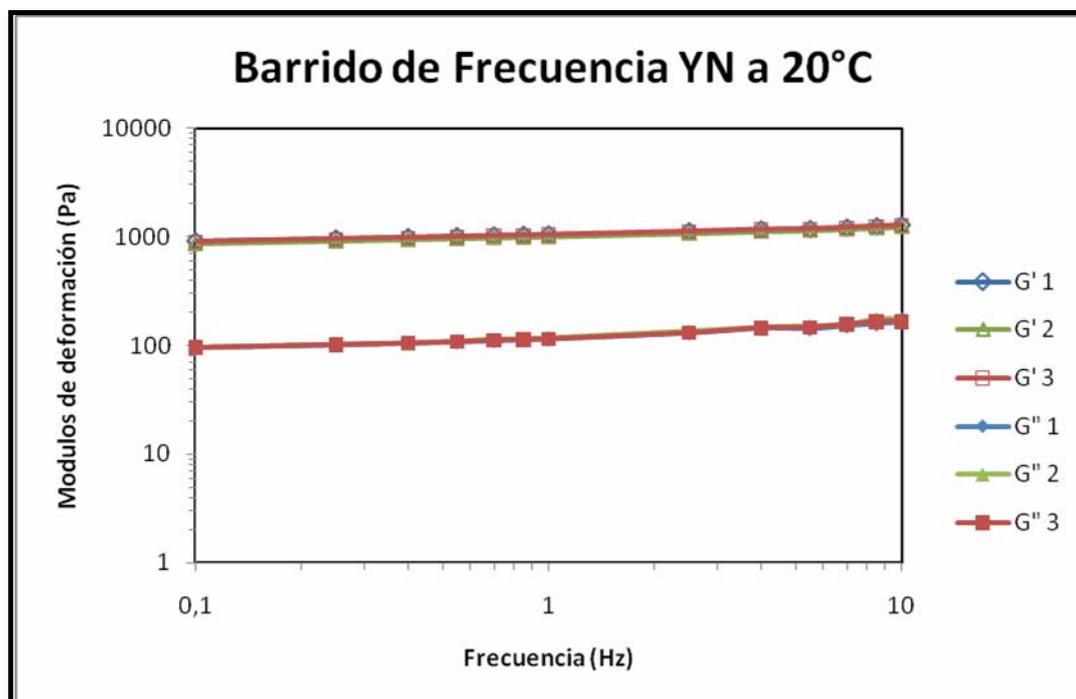


Figura A.1.11. Curvas de barrido de frecuencia de YN a 20°C

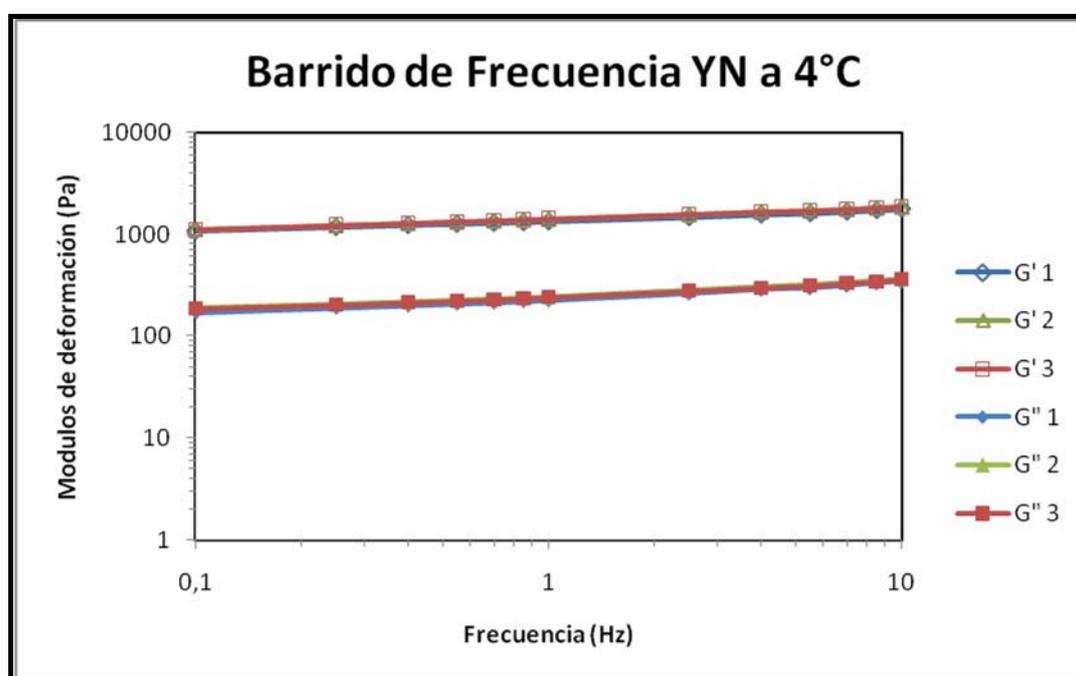


Figura A.1.12. Curvas de barrido de frecuencia de YN a 4°C

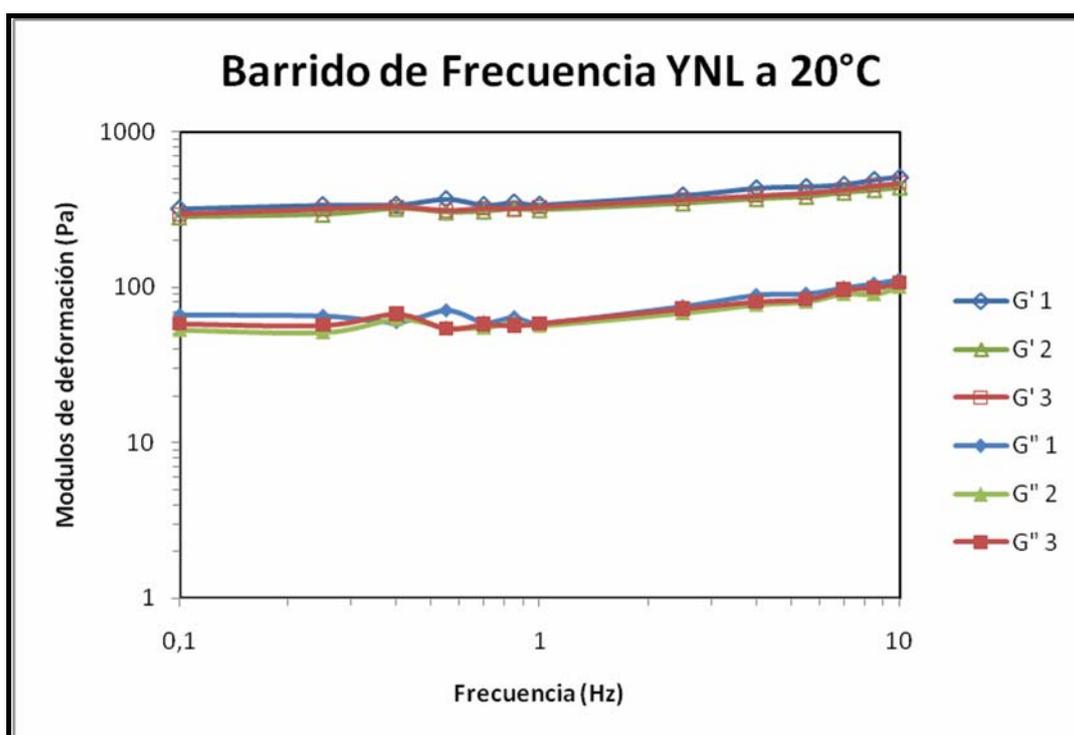


Figura A.1.13. Curvas de barrido de frecuencia de YNL a 20°C

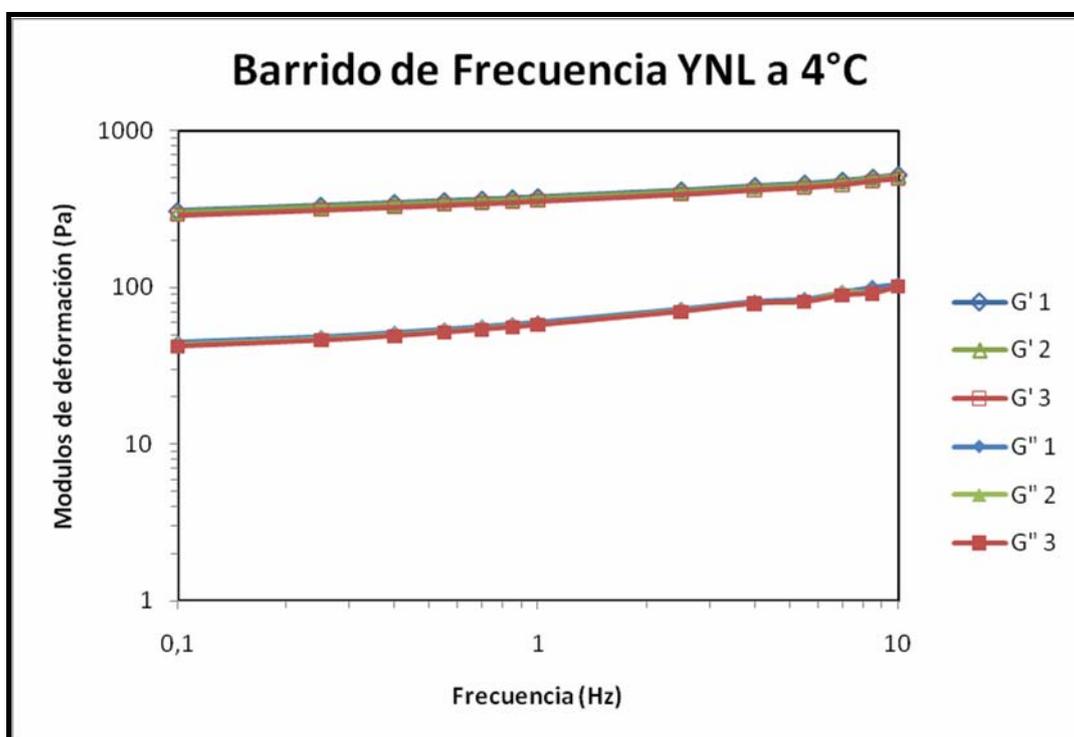


Figura A.1.14. Curvas de barrido de frecuencia de YNL a 4°C

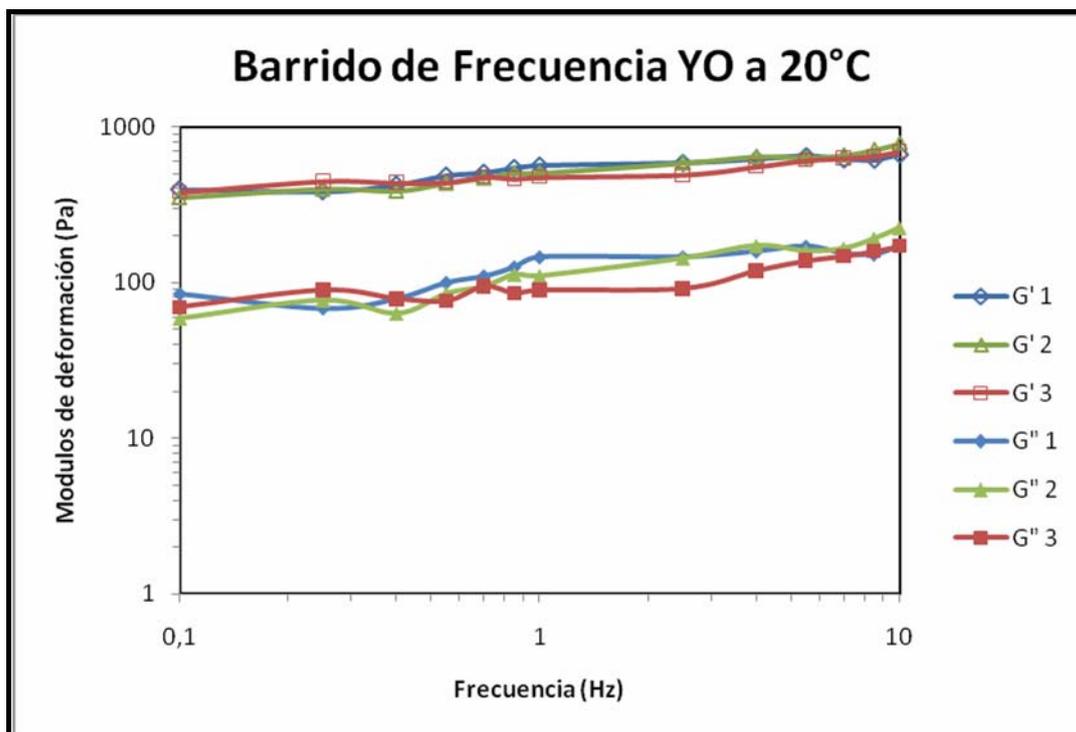


Figura A.1.15. Curvas de barrido de frecuencia de YO a 20°C

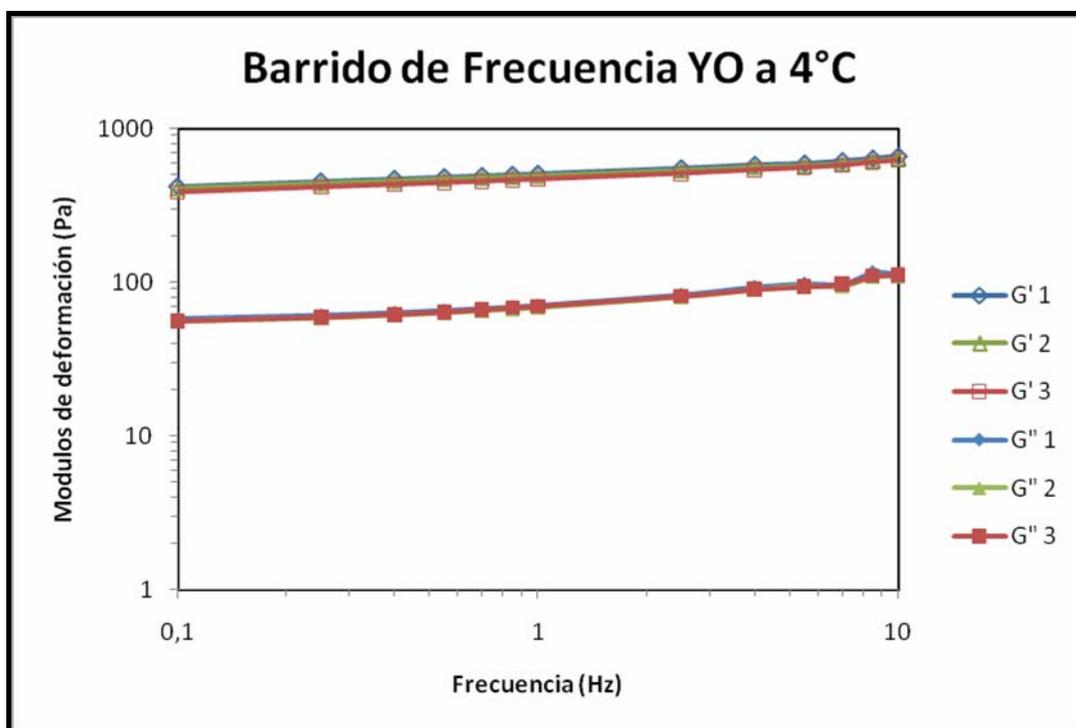


Figura A.1.16. Curvas de barrido de frecuencia de YO a 4°C

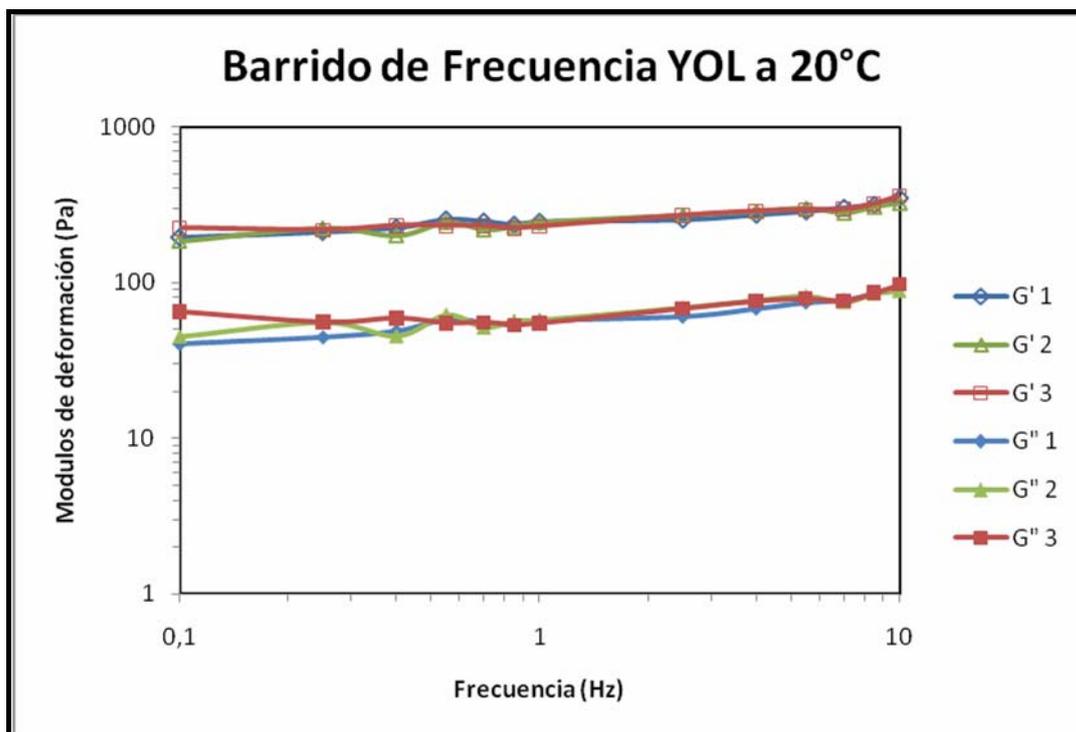


Figura A.1.17. Curvas de barrido de frecuencia de YOL a 20°C

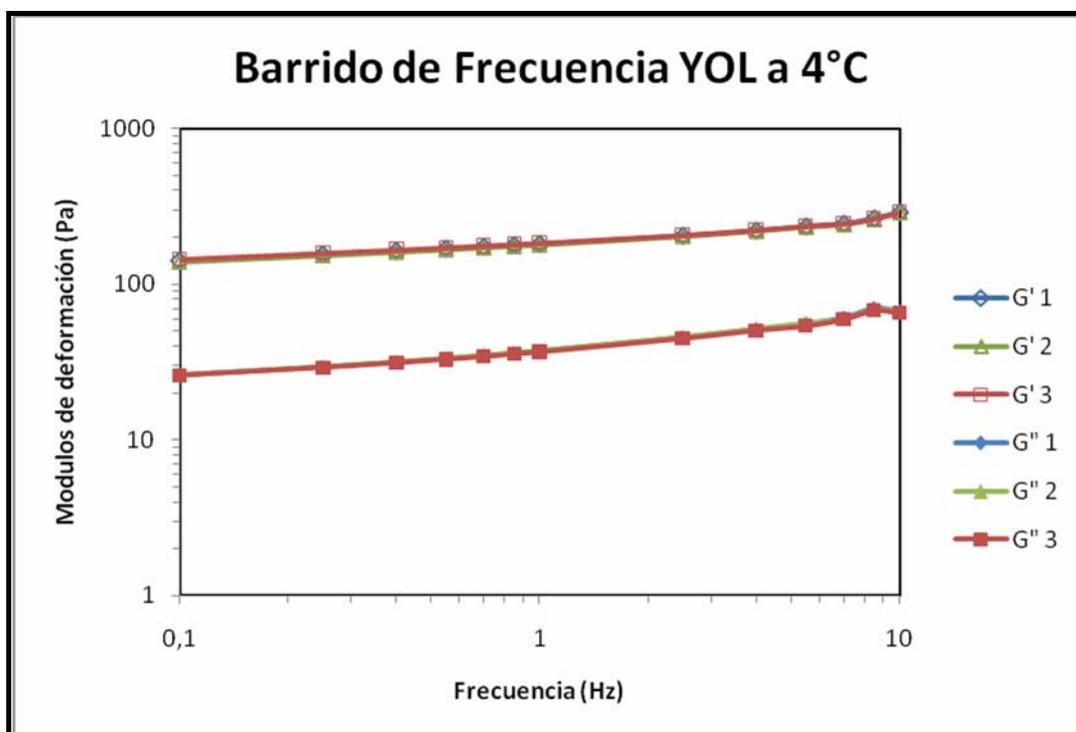


Figura A.1.18. Curvas de barrido de frecuencia de YOL a 4°C

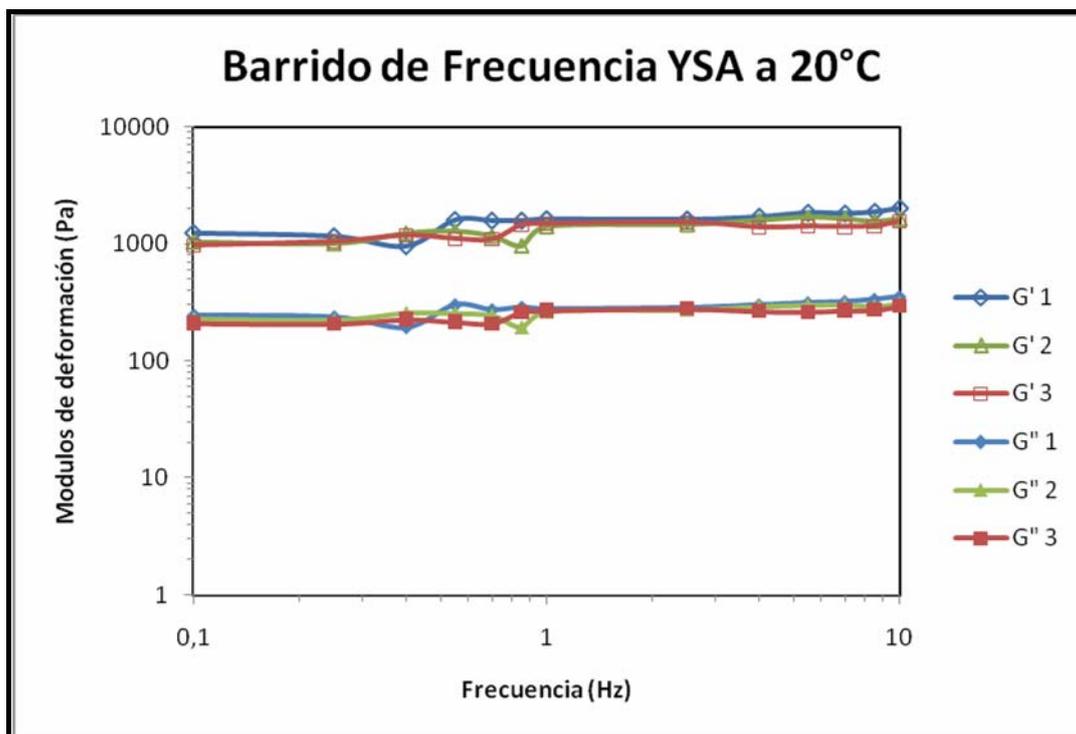


Figura A.1.19. Curvas de barrido de frecuencia de YSA a 20°C

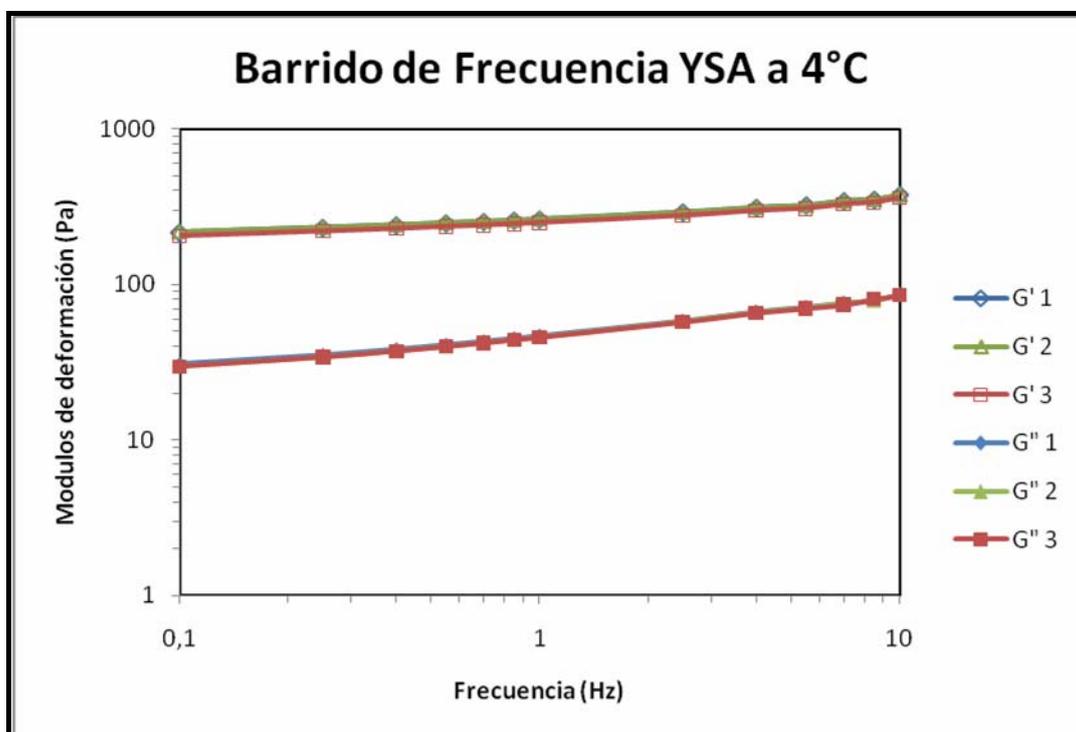


Figura A.1.20. Curvas de barrido de frecuencia de YSA a 4°C

## A.2. Estabilidad

- Curvas de retrodispersión a 30°C

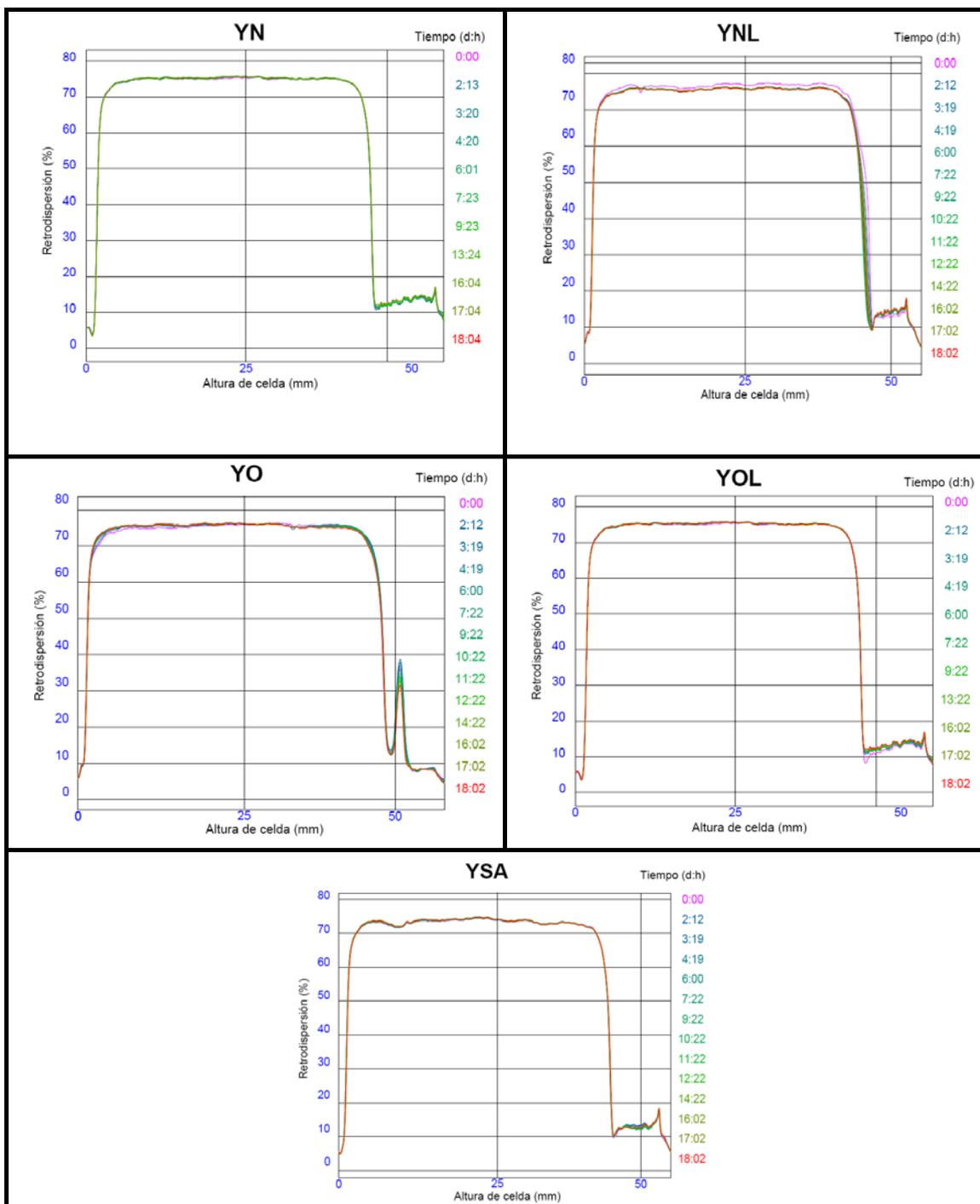


Figura A.2.1. Curvas de retrodispersión a 30°C

- Curvas de retrodispersión a 4°C

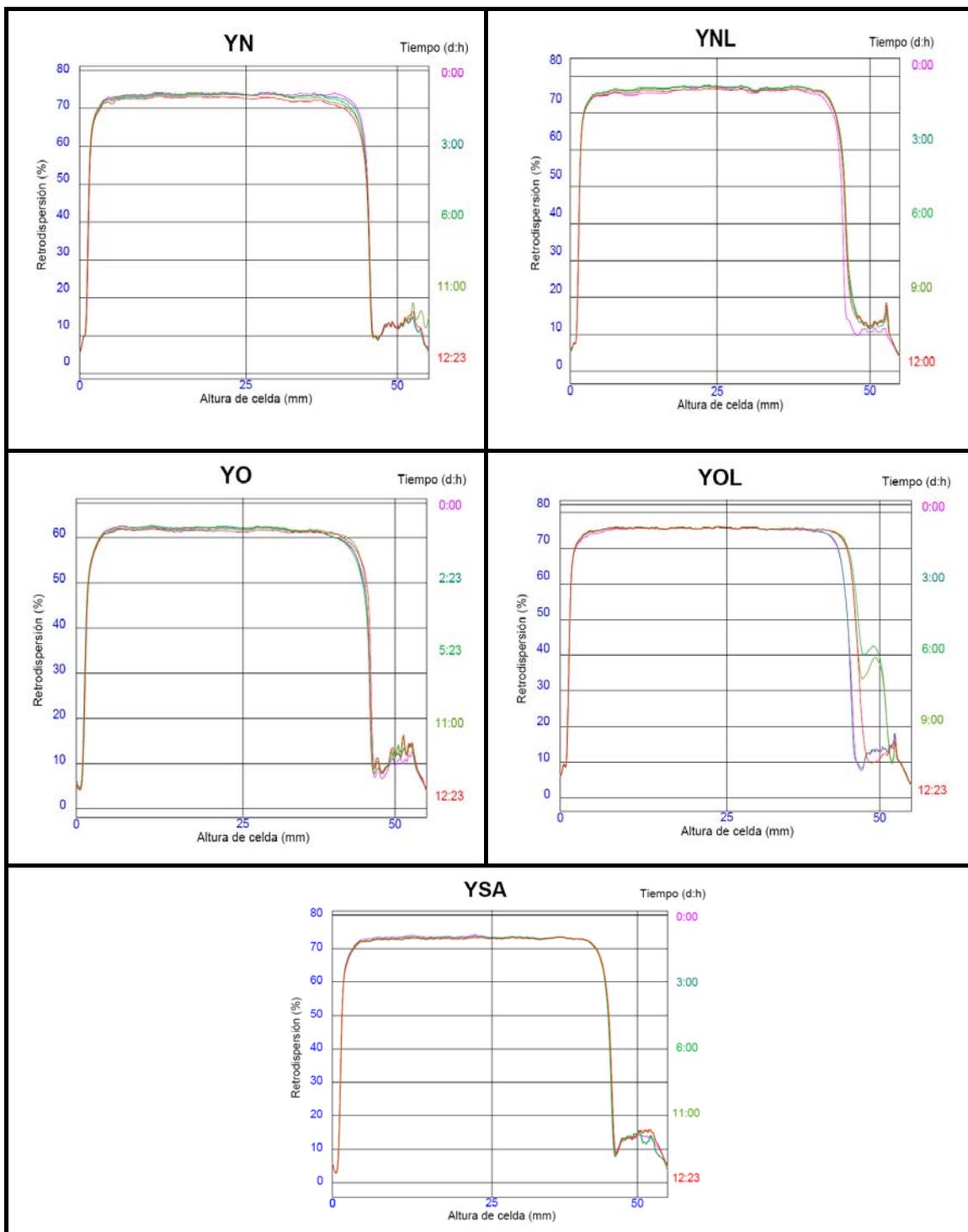


Figura A.2.2. Curvas de retrodispersión a 4°C

- Curvas de retrodispersión a 80°C

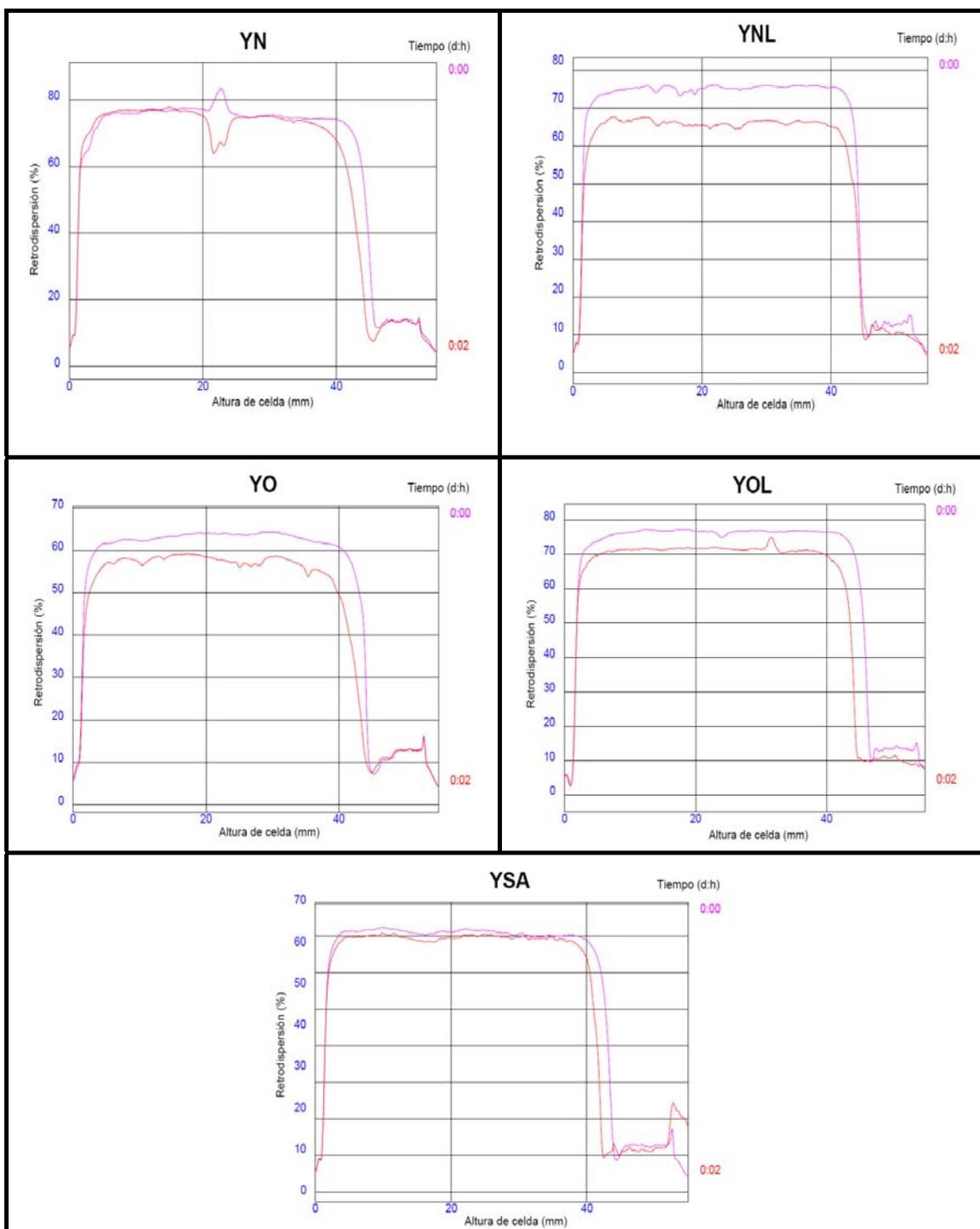


Figura A.2.3. Curvas de retrodispersión a 80°C

- Curvas de retrodispersión después de un ciclo congelación / descongelación

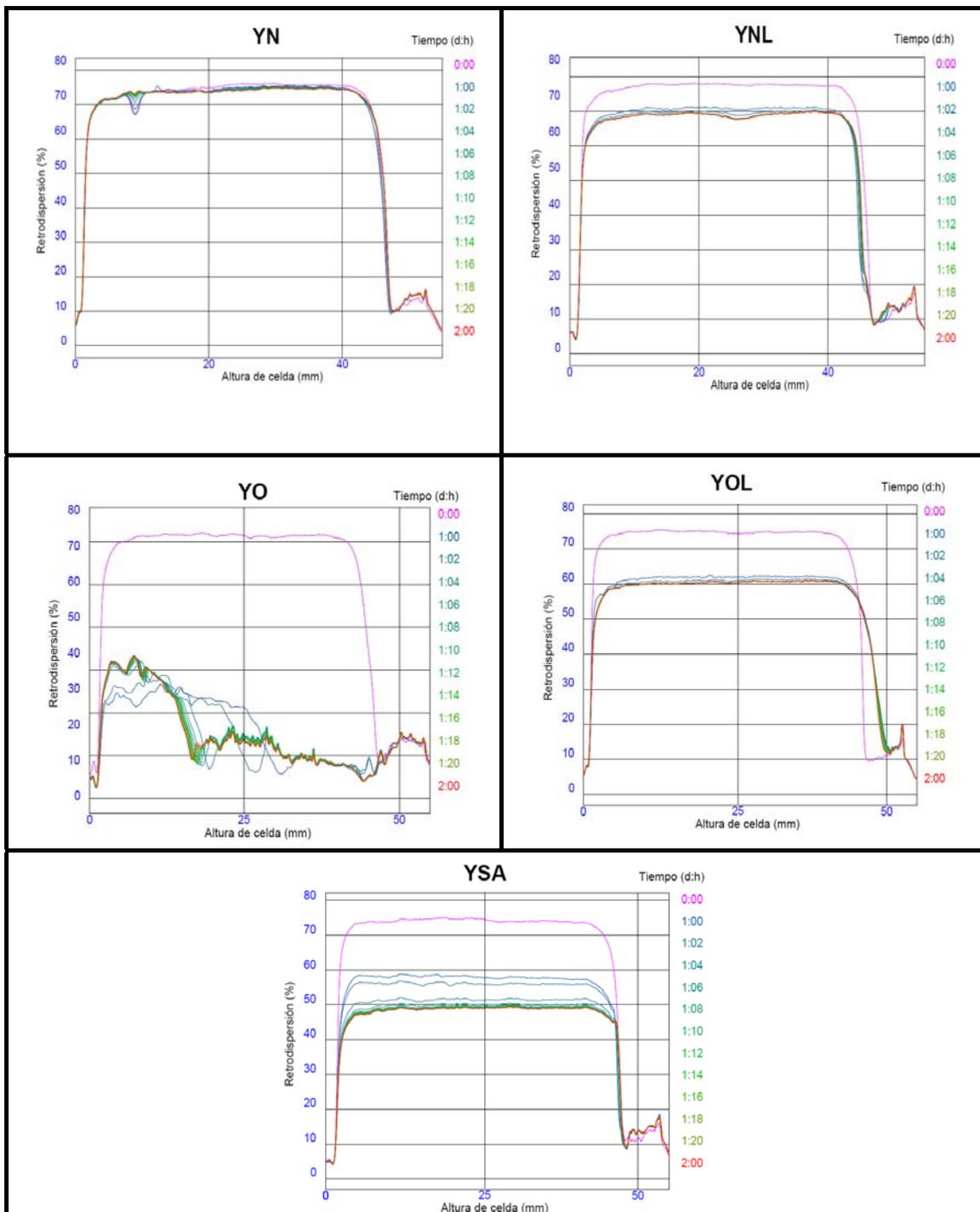


Figura A.2.4. Curvas de retrodispersión después de un ciclo congelación / descongelación

### A.3. Distribución de tamaños de partícula

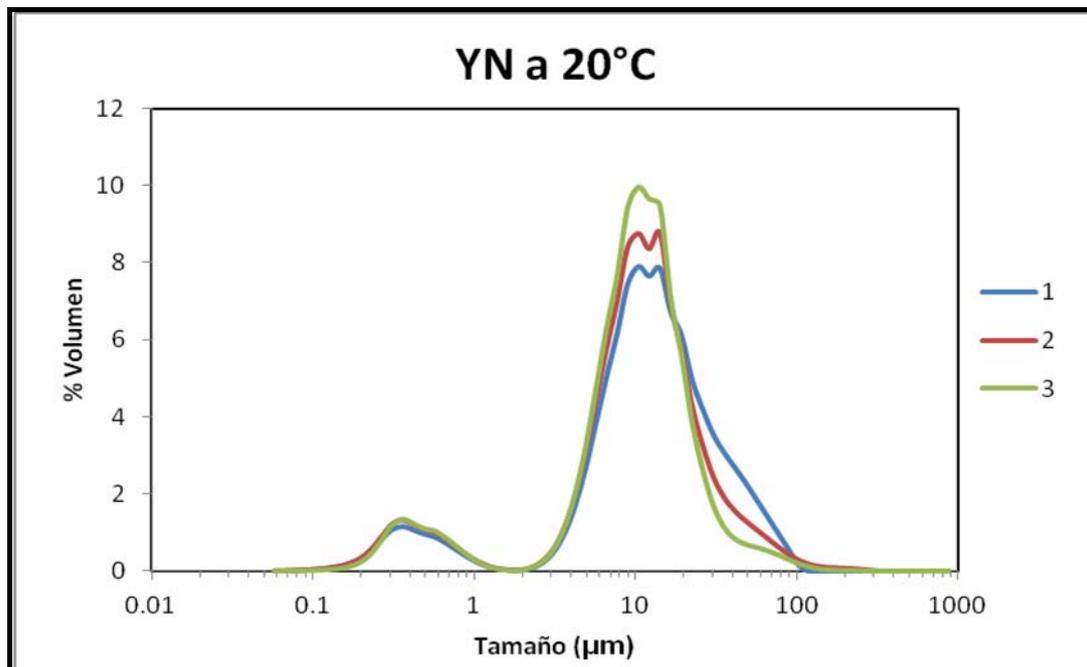


Figura A.3.1. Distribución de tamaño de partícula de YN a 20°C

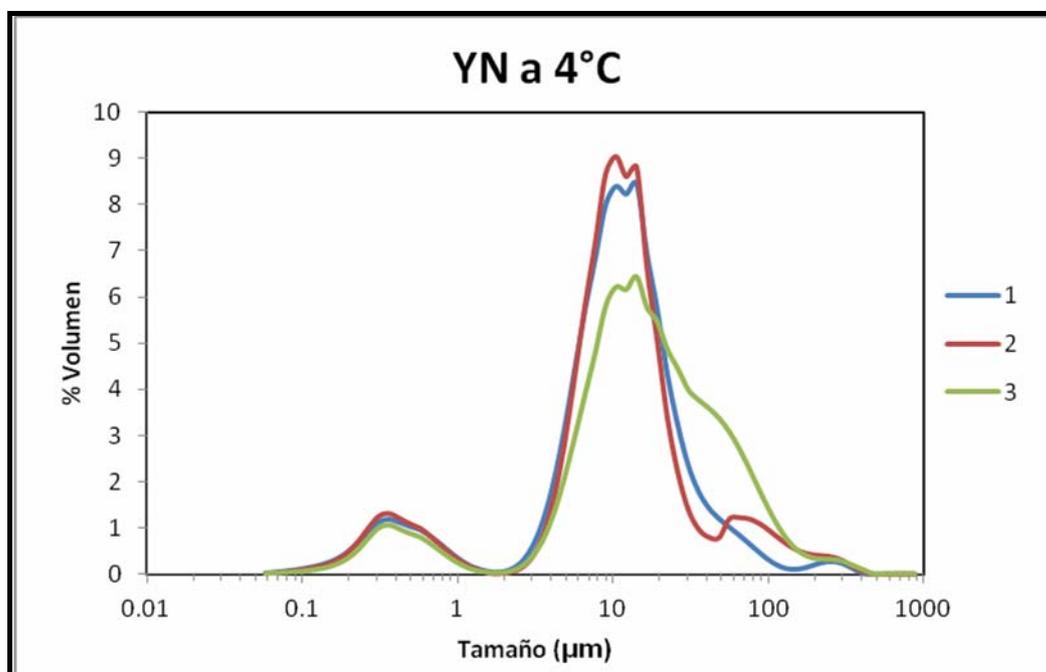


Figura A.3.2. Distribución de tamaño de partícula de YN a 4°C

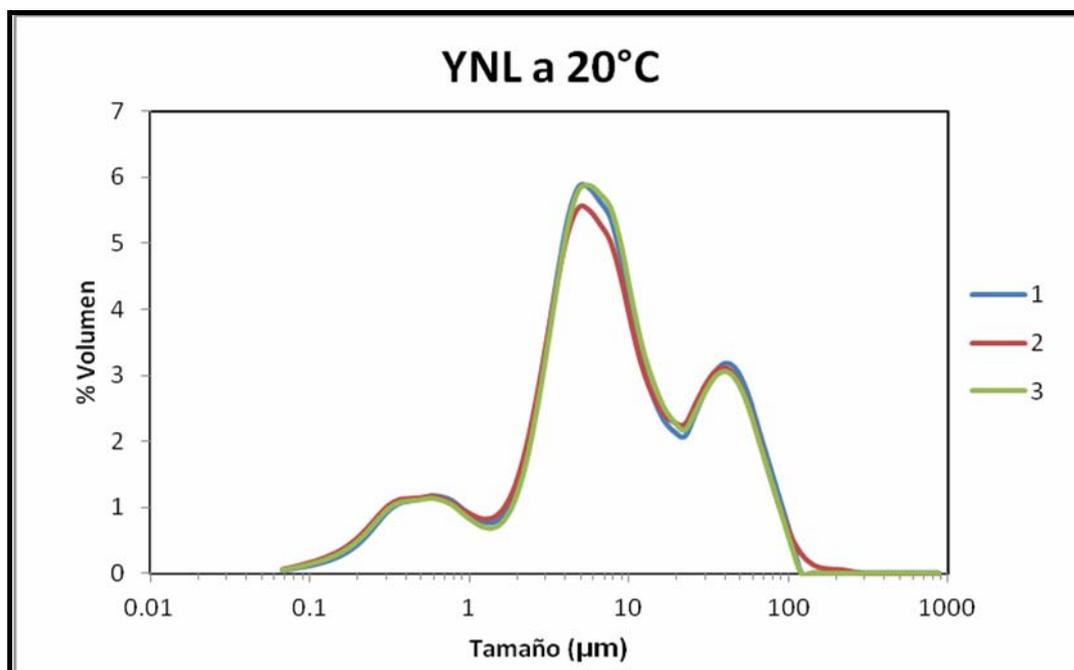


Figura A.3.3. Distribución de tamaño de partícula de YNL a 20°C

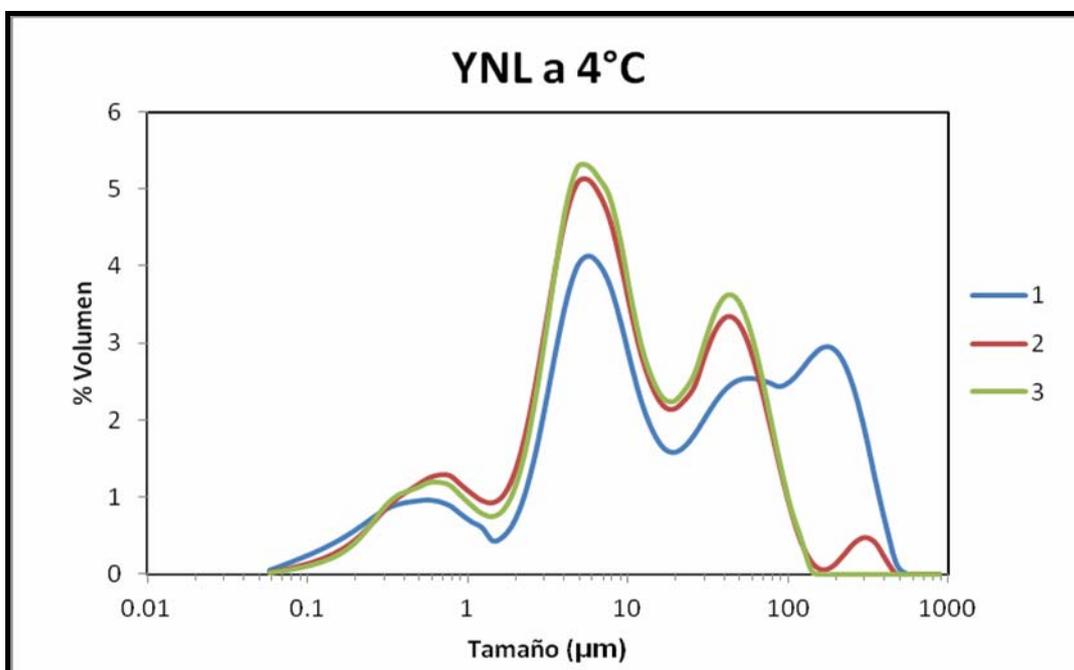


Figura A.3.4. Distribución de tamaño de partícula de YNL a 4°C

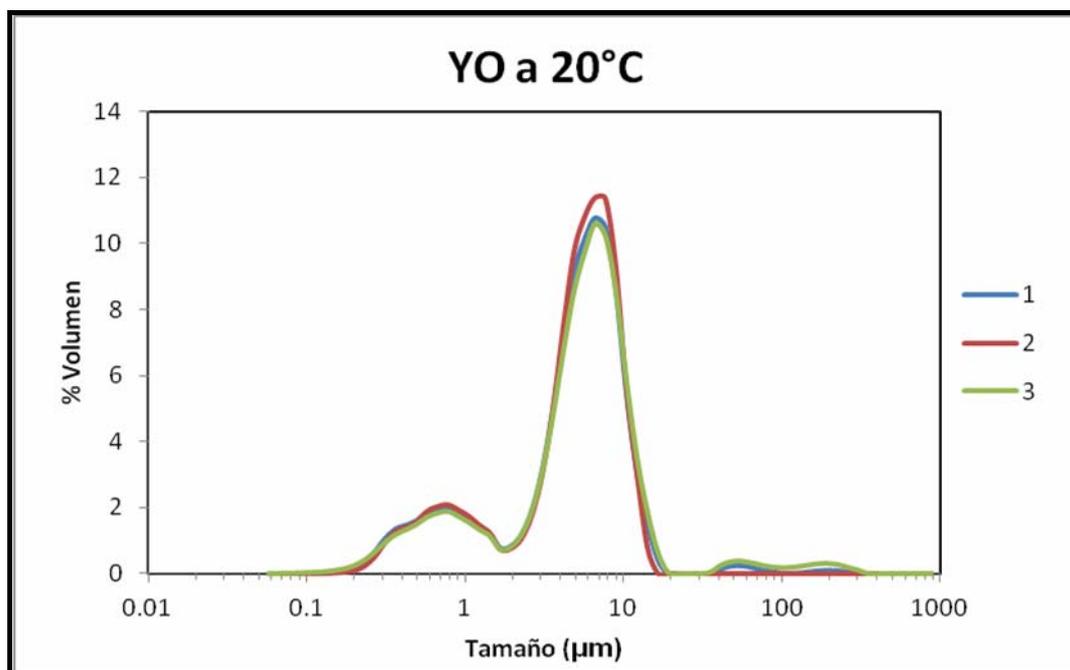


Figura A.3.5. Distribución de tamaño de partícula de YO a 20°C

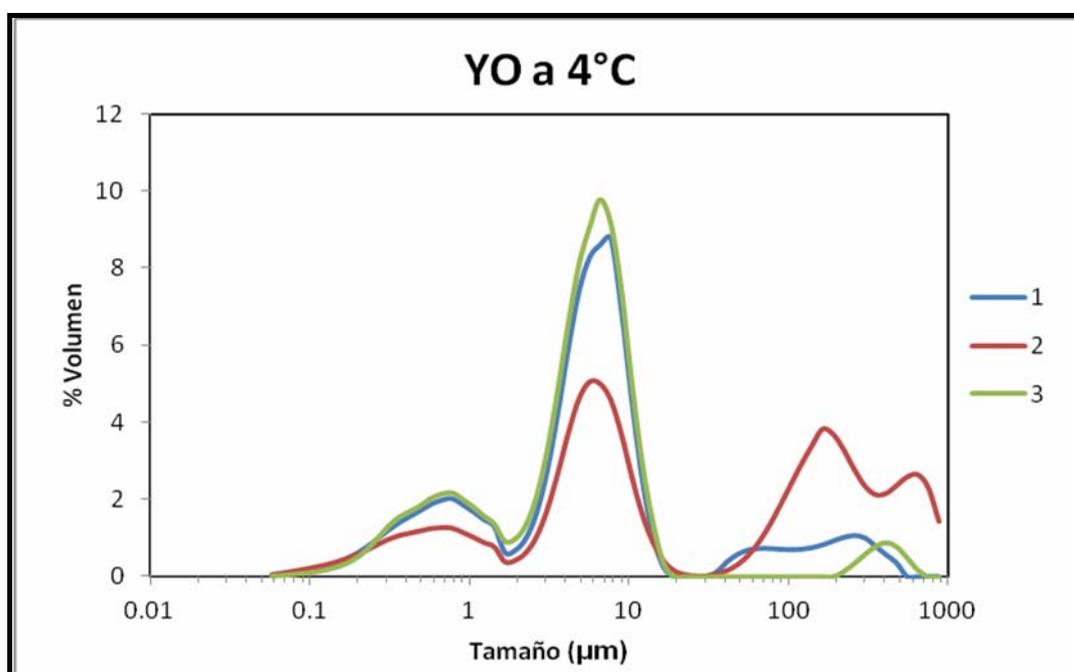


Figura A.3.6. Distribución de tamaño de partícula de YO a 4°C

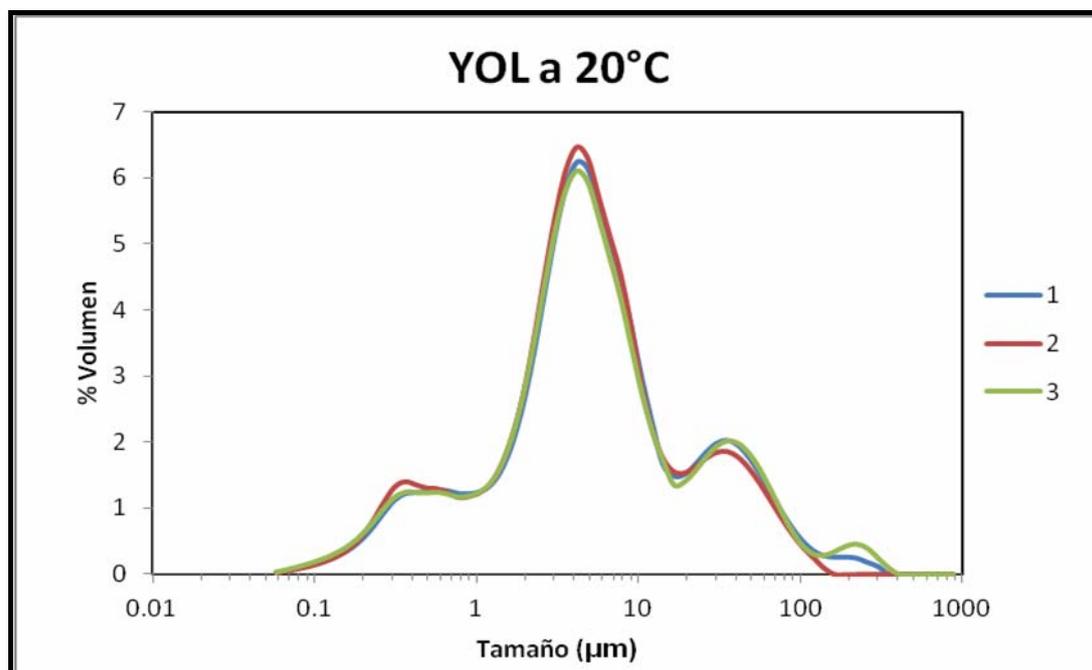


Figura A.3.7. Distribución de tamaño de partícula de YOL a 20°C

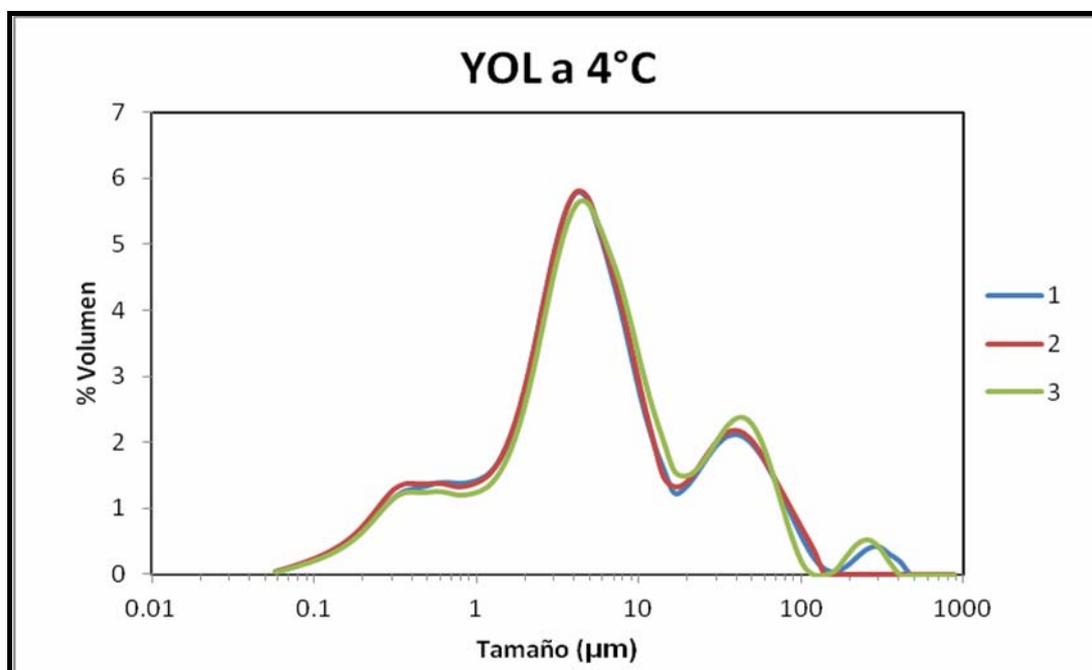


Figura A.3.8. Distribución de tamaño de partícula de YOL a 4°C

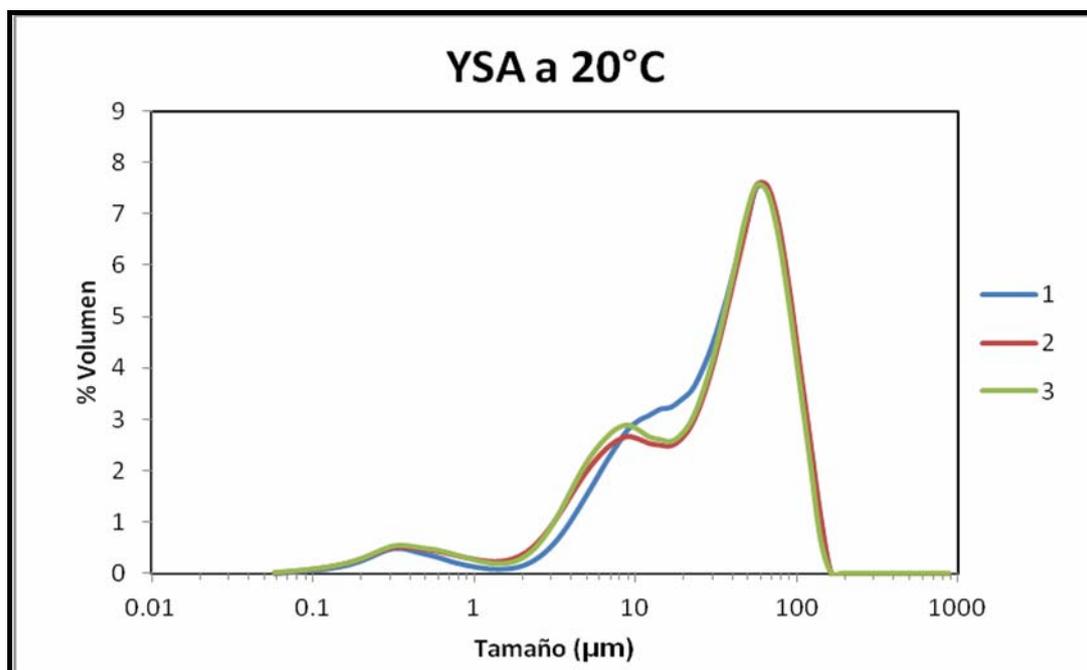


Figura A.3.9. Distribución de tamaño de partícula de YSA a 20°C

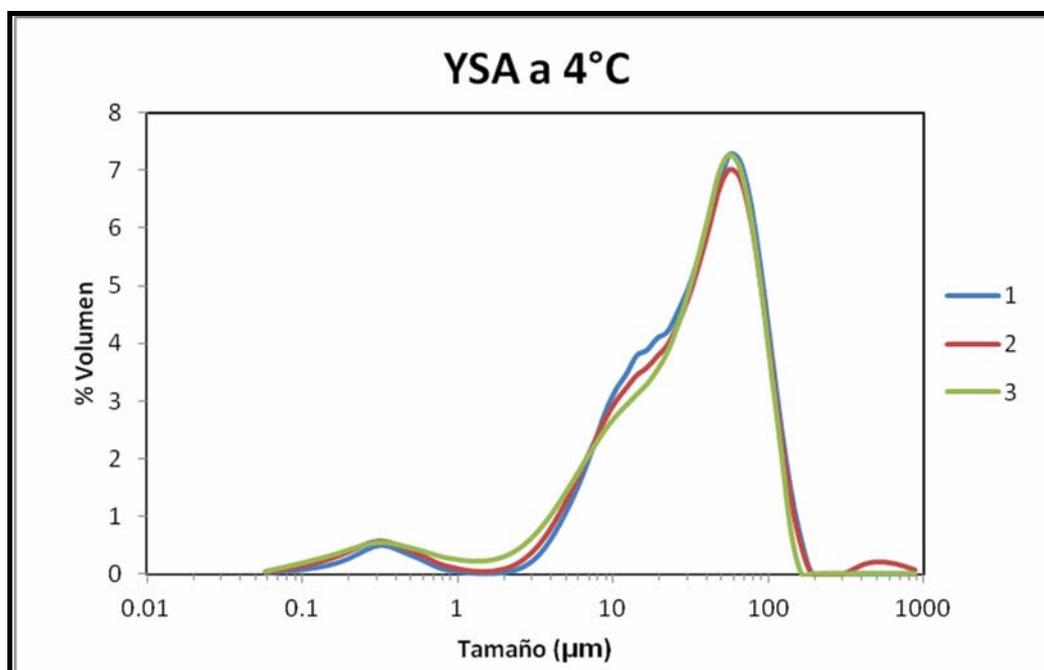


Figura A.3.10. Distribución de tamaño de partícula de YSA a 20°C

## A.4. Análisis estadístico de resultados

- Variación debido al tipo de aceite

Tabla A.4.1. Análisis de varianza para datos de G' según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
G' Aceite Vegetal	12	9370.9	780.9	219283.9	
G' Aceite Oliva	12	4275.4	356.3	24082.8	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1081838.3	1	1081838.3	<b>F</b>	<b>8.9</b>
Dentro de grupos	2677034.3	22	121683.4	<b>Probabilidad</b>	<b>0.007</b>
Total	3758872.6	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.2. Análisis de varianza para datos de G'' según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
G'' Aceite Vegetal	12	1405.5	117.1	5745.7	
G'' Aceite Oliva	12	835.0	69.6	1046.5	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	13559.8	1	13559.8	<b>F</b>	<b>4.0</b>
Dentro de grupos	74714.1	22	3396.1	<b>Probabilidad</b>	<b>0.06</b>
Total	88273.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.3. Análisis de varianza para datos de dureza según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Dureza Aceite Vegetal	12	702.4	58.5	345.9	
Dureza Aceite Oliva	12	454.0	37.8	101.6	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	2570.6	1	2570.6	<b>F</b>	<b>11.5</b>
Dentro de grupos	4922.3	22	223.7	<b>Probabilidad</b>	<b>0.003</b>
Total	7492.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.4. Análisis de varianza para datos de trabajo de cizalla según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Cizalla Aceite Vegetal	12	727.7	60.6	439.9	
Cizalla Aceite Oliva	12	445.4	37.1	145.2	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	3320.3	1	3320.3	<b>F</b>	<b>10.4</b>
Dentro de grupos	7030.7	22	319.5	<b>Probabilidad</b>	<b>0.004</b>
Total	10351.1	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.5. Análisis de varianza para datos de pegajosidad según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Pegajosidad A. Vegetal	12	295.9	24.6	45.7	
Pegajosidad A. Oliva	12	237.3	19.7	79.7	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	143.1	1	143.1	<b>F</b>	<b>2.3</b>
Dentro de grupos	1379.7	22	62.7	<b>Probabilidad</b>	<b>0.1</b>
Total	1522.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.6. Análisis de varianza para datos de trabajo de adhesión según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Adhesión A. Vegetal	12	159.2	13.2	6.5	
Adhesión A. Oliva	12	134.0	11.2	15.4	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	26.5	1	26.5	<b>F</b>	<b>2.4</b>
Dentro de grupos	241.5	22	10.9	<b>Probabilidad</b>	<b>0.1</b>
Total	268.0	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.7. Análisis de varianza para datos de D<sub>3,2</sub> según tipo de aceite

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
D <sub>3,2</sub> Aceite Vegetal	12	26.2	2.2	0.1	
D <sub>3,2</sub> Aceite Oliva	12	19.1	1.6	0.1	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	2.1	1	2.1	<b>F</b>	<b>21.6</b>
Dentro de grupos	2.1	22	0.1	<b>Probabilidad</b>	<b>0.0001</b>
Total	4.3	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

- *Variación debida al contenido calórico*

Tabla A.4.8. Análisis de varianza para datos de G' según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
G' Normal	12	10273.6	856.1	155018.2	
G' Light	12	3372.7	281.1	6309.5	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1984267.5	1	1984267.5	<b>F</b>	<b>24.6</b>
Dentro de grupos	1774605.1	22	80663.9	<b>Probabilidad</b>	<b>0.00006</b>
Total	3758872.6	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.301</b>

Tabla A.4.9. Análisis de varianza para datos de G<sup>o</sup> según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
G <sup>o</sup> Normal	12	1609.1	134.1	4317.2	
G <sup>o</sup> Light	12	631.5	52.6	87.7	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	39820.1	1	39820.1	<b>F</b>	<b>18.1</b>
Dentro de grupos	48453.8	22	2202.4	<b>Probabilidad</b>	<b>0.0003</b>
Total	88273.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.10 Análisis de varianza para datos de dureza según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Dureza Normal	12	713.8	59.5	308.8	
Dureza Light	12	442.6	36.9	93.7	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	3065.2	1	3065.2	<b>F</b>	<b>15.2</b>
Dentro de grupos	4427.6	22	201.2	<b>Probabilidad</b>	<b>0.0008</b>
Total	7492.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.11. Análisis de varianza para datos de trabajo de cizalla según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Cizalla Normal	12	756.7	63.1	397.7	
Cizalla Light	12	416.4	34.7	104.5	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	4826.1	1	4826.1	<b>F</b>	<b>19.2</b>
Dentro de grupos	5524.9	22	251.1	<b>Probabilidad</b>	<b>0.0002</b>
Total	10351.1	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.12. Análisis de varianza para datos de pegajosidad según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Pegajosidad Normal	12	351.2	29.2	12.2	
Pegajosidad Light	12	182.0	15.1	17.6	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1193.4	1	1193.4	<b>F</b>	<b>49.6</b>
Dentro de grupos	329.4	22	14.9	<b>Probabilidad</b>	<b>9 x 10<sup>-9</sup></b>
Total	1522.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.13. Análisis de varianza para datos de trabajo de adhesión según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Adhesión Normal	12	180.5	15.0	2.2	
Adhesión Light	12	112.7	9.3	4.6	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	191.8	1	191.8	<b>F</b>	<b>55.3</b>
Dentro de grupos	76.2	22	3.4	<b>Probabilidad</b>	<b>1 x 10<sup>-7</sup></b>
Total	268.0	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.14. Análisis de varianza para datos de D<sub>3,2</sub> según contenido calórico

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
D <sub>3,2</sub> Normal	12	25.4	2.1	0.2	
D <sub>3,2</sub> Light	12	19.9	1.6	0.1	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1.3	1	1.3	<b>F</b>	<b>9.1</b>
Dentro de grupos	3.0	22	0.1	<b>Probabilidad</b>	<b>0.006</b>
Total	4.3	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

- Variación debida a la temperatura

Tabla A.4.15. Análisis de varianza para datos de G' según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
G' T. ambiente	12	6342.5	528.5	104005	
G' T. refrigerado	12	7303.8	608.7	234210.3	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	38504.1	1	38504.1	<b>F</b>	<b>0.2</b>
Dentro de grupos	3720369	22	169107.7	<b>Probabilidad</b>	<b>0.6</b>
Total	3758873	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.16. Análisis de varianza para datos de G'' según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
G'' T. ambiente	12	1036.4	86.4	1070.9	
G'' T. refrigerado	12	1204.1	100.3	6847.5	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1171.7	1	1171.7	<b>F</b>	<b>0.3</b>
Dentro de grupos	87102.2	22	3959.2	<b>Probabilidad</b>	<b>0.6</b>
Total	88273.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.17. Análisis de varianza para datos de dureza según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Dureza T. ambiente	12	492.8	41.0	265.1	
Dureza T. refrigerado	12	663.6	55.3	305.6	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1214.9	1	1214.9	<b>F</b>	<b>4.2</b>
Dentro de grupos	6277.9	22	285.3	<b>Probabilidad</b>	<b>0.051</b>
Total	7492.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.18. Análisis de varianza para datos de trabajo de cizalla según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Cizalla T. ambiente	12	497.3	41.4	363.3	
Cizalla T. refrigerado	12	675.7	56.3	457.1	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	1325.9	1	1325.9	<b>F</b>	<b>3.2</b>
Dentro de grupos	9025.2	22	410.2	<b>Probabilidad</b>	<b>0.09</b>
Total	10351.1	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.19. Análisis de varianza para datos de pegajosidad según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Pegajosidad T. ambiente	12	239.6	19.9	59.9	
Pegajosidad T. refrigerado	12	293.6	24.4	67.4	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	121.2	1	121.2	<b>F</b>	<b>1.9</b>
Dentro de grupos	1401.6	22	63.7	<b>Probabilidad</b>	<b>0.2</b>
Total	1522.9	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.20. Análisis de varianza para datos de trabajo de adhesión según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
Adhesión T. ambiente	12	134.5	11.2	10.9	
Adhesión T. refrigerado	12	158.7	13.2	11.2	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	24.4	1	24.4	<b>F</b>	<b>2.2</b>
Dentro de grupos	243.6	22	11.0	<b>Probabilidad</b>	<b>0.1</b>
Total	268.0	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>

Tabla A.4.21. Análisis de varianza para datos de  $D_{3,2}$  según temperatura

<b>Análisis de grupos</b>					
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
$D_{3,2}$ T. ambiente	12	23.6	1.9	0.2	
$D_{3,2}$ T. refrigerado	12	21.7	1.8	0.2	
<b>Análisis de varianza</b>					
<i>Origen de la variaciones</i>	<i>Suma de los cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Resultados de ANOVA</i>	
Entre grupos	0.1	1	0.1	<b>F</b>	<b>0.8</b>
Dentro de grupos	4.1	22	0.1	<b>Probabilidad</b>	<b>0.4</b>
Total	4.3	23		<b>Valor critico F</b>	<b>4.3</b>