

Proyecto Final

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS EN PULPAS

Estudiantes: **Barandalla Sebastian - Rosa Gabriel**

Director y Co-Director del proyecto: **Dra. Ing. Clavijo Silvia – Ing. Possa Heber**

Ingeniería Mecánica - 2025

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS EN PULPAS

Autor/a:

Barandalla Ocampo, Sebastian Gabriel
Rosa, Juan Gabriel

Título al que se aspira: Ingeniero/a Mecánico

Trabajo aprobado por:

Bonino Analia Presidente Nombre y Firma		28/02/2025 Fecha
Tapia Luisa Vocal Nombre y Firma		28/02/2025 Fecha
Rivamar Alfredo Vocal Nombre y Firma		28/02/2025 Fecha
Clavijo Silvia Director/a Nombre y Firma		28/02/2025 Fecha

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA**

San Rafael, Mendoza, 2025

Ingeniería Mecánica - 2025

1. RESUMEN.....	6
2. INTRODUCCIÓN.....	7
3. MARCO TEÓRICO.....	11
3.1 Introducción a la reología.....	11
3.2 Estudio de los Fluidos.....	12
3.2.1 Esfuerzo de corte.....	14
3.2.2 Velocidad de deformación o cizallamiento.....	14
3.2.3 Ley de Newton.....	15
3.3 Clasificación de fluidos y modelos reológicos.....	16
3.3.1 Fluidos Independientes del Tiempo de Cizalla.....	17
Fluidos Newtonianos.....	17
Fluidos No Newtonianos.....	19
Fluidos Pseudoplásticos.....	22
Fluidos Dilatantes.....	27
3.3.2 Fluidos Dependientes del Tiempo de Cizalla.....	28
Fluidos tixotrópicos.....	29
Fluidos Reopéticos.....	30
3.3.3 Fluidos Viscoelásticos.....	32
3.4 Factores que afectan la viscosidad.....	33
3.4.1 Presión.....	33
3.4.2 Gradiente de Velocidad.....	33
3.4.3 Tiempo.....	33
3.4.4 Tensión Eléctrica - Voltaje Eléctrico.....	34
3.4.5 Temperatura.....	34
3.4.6. Composición Química y Física.....	35
3.4.7. Efectos Combinados.....	36
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	38
4.1 El equipo.....	38
4.1.1. Base Portadora o Elemento de Prueba.....	39
4.1.2. Consola o Panel de Control.....	39
4.1.3. Dispositivos de Ensayo.....	40

Ingeniería Mecánica - 2025

4.1.4. Baño Termostático y Termómetro Digital.....	41
4.1.5. Adquisición de Datos.....	42
4.1.6. Calibración del Analizador de Textura.....	43
4.2. Secuencia operativa del ensayo de retroextrusión.....	44
4.3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO.....	45
5. SISTEMA DE CONTROL Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	48
5.1. Dispositivo de medición.....	48
5.2. Dispositivo de control.....	49
5.2.1. Sistema de Adquisición de Datos.....	49
5.3. Funcionamiento.....	50
5.4. Calibración.....	55
5.5. Medición en tiempo real.....	61
6. PLAN DE ENSAYOS Y MUESTREO.....	65
6.1. Selección del rango de temperatura y procedimiento experimental.....	65
6.2. Análisis de la viscosidad a diferentes concentraciones.....	65
6.3. Preparación de las muestras.....	66
6.4. Preparación para los ensayos de viscosidad.....	67
6.5. Calibración del texturómetro.....	68
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	69
7.1. Metodología de Análisis.....	69
Paso 1: Adquisición de Datos.....	69
Paso 2: Procesamiento de Datos.....	69
Paso 3: Representación Gráfica de Resultados.....	70
7.2. Descripción del Código.....	70
7.3. Plan de Presentación en la Sección 8.....	72
7.4. Resumen de los Ensayos.....	72
7.5. Conclusión de la Metodología.....	74
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	75
8.1. Esfuerzo de corte.....	75
8.2. Índice de flujo (η).....	80
8.3. Índice de consistencia (K).....	81
8.4. Análisis del Error Relativo de las mediciones.....	86
8.5. Análisis del tipo de material.....	87

Ingeniería Mecánica - 2025

8.6. Relación con palatabilidad y aceptación por el cuerpo humano.....	88
9. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	89
9.1. Factores para análisis de prefactibilidad:.....	89
9.1.1. Precisión y Aplicabilidad de las Mediciones.....	89
9.1.2. Costos de Adquisición y Operación.....	89
9.1.3. Envío de Muestras a Laboratorios Especializados.....	90
9.2. Análisis de texturometros disponibles en el mercado.....	90
9.2.1. Analizador de Textura Lamy Rheology TX-700.....	90
9.2.2. Analizador de Textura TA.XT Plus.....	91
9.2.3. Analizador de Textura y Firmeza de Alimentos FTM-50.....	92
9.2.4. Analizador de Textura para Alimentos.....	92
9.2.5. Presupuesto Armado de Taller.....	93
9.2.5.1 Presupuesto Dispositivo.....	93
9.2.5.2 Presupuesto Baño Termostático de circulación con calefacción.....	94
9.2.5.3 Presupuesto Mano de Obra de Dispositivo.....	94
9.2.5.4 Presupuesto de Ensayo.....	95
9.3. Análisis de viscosímetros en el mercado.....	95
9.3.1. Viscosímetro Brookfield DVNext.....	95
9.4. Prefactibilidad económica.....	96
9.4.1. Introducción.....	96
9.4.2. Alternativas Consideradas.....	97
9.4.3. Suposiciones y Parámetros del Análisis.....	97
9.4.3.1. Determinación de la tasa de descuento.....	98
Factores a Considerar en la Tasa de Descuento.....	98
9.4.6. Elaboración del Flujo de Caja.....	99
9.4.7. Análisis de Resultados.....	99
9.5 Análisis de Proyecto.....	100
10. CONCLUSIONES.....	103
10.1 Relación del índice de flujo con la aceptación de los alimentos.....	103
10.2. Relación entre el índice de flujo y la aceptación sensorial de los alimentos..	103
10.3. Impacto en la deglución y adaptabilidad para personas con dificultades.....	105
10.4. Comparativa con el viscosímetro brookfield y otros equipos de análisis textural.....	105

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

10.5. Presentación de resultados: modelo alimentario y beneficios en la salud.....	106
10.6. CONSIDERACIONES FINALES Y APLICACIONES FUTURAS.....	107
11. BIBLIOGRAFÍA.....	108
12. ANEXOS.....	109
12.1. Cálculos de las regresion lineal.....	109
12.2. Código del arduino.....	113
12.3. Manual del texturómetro.....	126
12.4. Resultados obtenidos.....	127
12.5 Codigo de Octave.....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 3.1. Viscosímetros y reómetros del tipo rotacional y tipo tubo.
- Figura 3.2. Gradiente de velocidad generado en un fluido colocado entre dos planos paralelos
- Figura 3.3. Tensiones de corte producidas sobre un elemento infinitesimal, en el flujo de un fluido.
- Figura 3.4. Fluidos newtonianos. (A) Representación gráfica de Tensión de corte vs Gradiente de velocidad. (B) Representación del Coeficiente de viscosidad vs Gradiente de velocidad
- Figura 3.5. Modelo físico del líquido de Newton y gráfica de Esfuerzo vs. Tiempo. Deformación permanente del líquido newtoniano.
- Figura 3.6. Representación gráfica de tensión de corte versus gradiente de velocidad para fluidos plásticos y plásticos de Bingham.
- Figura 3.7. (A) Representación gráfica de tensión de corte vs. gradiente de velocidad para fluidos pseudoplásticos. (B) Viscosidad aparente vs. gradiente de velocidad para fluidos pseudoplásticos.
- Figura 3.8. Análisis del reograma de un fluido pseudoplástico graficando Tensiones de corte vs. Gradientes de velocidad.
- Figura 3.9. Evolución de la viscosidad aparente en un intervalo amplio de gradientes de velocidad, para fluidos pseudoplásticos.
- Figura 3.10. Ajuste de η vs γ aplicando los modelos de Cross, Sisko y Ostwald de Waele (Ley de potencia)
- Figura 3.11. Fluidos dilatantes (A) Representación gráfica de Tensión de corte vs. Gradiente de velocidad. (B) Representación de Viscosidad aparente vs. Gradiente de velocidad.
- Figura 3.12. Representación gráfica de tensiones de corte vs. Tiempo de cizalla para fluidos dependientes del tiempo.
- Figura 3.13. (A) Representación gráfica de tensiones de corte vs. gradiente de velocidad y (B) Viscosidad aparente vs. gradiente de velocidad para fluidos tixotrópicos.
- Figura 3.14. (A) Representación gráfica de tensiones de corte vs. gradiente de velocidad para fluidos y (B) Viscosidad aparente vs. gradiente de velocidad para fluidos reopéticos.
- Figura 3.15. Tensión de corte vs tiempo para fluidos independientes y dependientes del tiempo a gradiente de velocidad constante.
-

Ingeniería Mecánica - 2025

Figura 4.1. Analizador de textura TA-TX2i y panel de control.

Figura 4.2. Sonda PC y Contenedor de muestra utilizado en el ensayo de retroextrusión.

Figura 4.3. Baño Termostático.

Figura 4.4. Visor del programa.

Figura 4.5. Visor del programa.

Figura 4.6. Descripción del modelo tridimensional del dispositivo completo, en vista explotada.

Figura 5.1. Descripción del circuito utilizado para la medición de temperatura utilizado en la sonda.

Figura 5.2. Pantalla principal al alimentar con tensión el arduino.

Figura 5.3. A) Edición de Tiempo de duración de Ensayo, B) Edición de SPH y C) Edición de SPL.

Figura 5.4. Lectura del dispositivo una vez ya configurado.

Figura 5.5. A) Modo de ejecución y B) Lectura del dispositivo en ejecución.

Figura 5.6. Regresión Lineal del Sensor 1

Figura 5.7. Regresión Lineal Final.

Figura 5.8. Regresión Lineal Final.

Figura 5.9. Regresión Lineal Final.

Figura 5.10: Menú de acceso rápido en Windows, mostrando opciones avanzadas del sistema, incluyendo el Administrador de dispositivos, útil para identificar el puerto COM al que está conectado un Arduino.

Figura 5.10: Evolución de la temperatura en función del tiempo, mostrando el desempeño del sistema de control térmico para mantener la temperatura dentro del rango establecido.

RESUMEN

La presente tesis se centra en el estudio de los parámetros reológicos de alimentos semisólidos y en el desarrollo de un sistema de medición de viscosidad optimizado para la industria regional. Para ello, se aborda un marco teórico que incluye una introducción a la reología y el análisis detallado de los fluidos, considerando conceptos como esfuerzo de corte y velocidad de deformación o cizallamiento, además de aplicar la Ley de Newton para establecer modelos de comportamiento de los materiales.

Se realiza una clasificación de fluidos y modelos reológicos, distinguiendo entre fluidos independientes del tiempo de cizalla (newtonianos y no newtonianos, con sus variantes como pseudoplásticos y dilatantes), fluidos dependientes del tiempo de cizalla (tixotrópicos y reopéticos) y fluidos viscoelásticos. Asimismo, se consideran factores que afectan la viscosidad, como la presión, el gradiente de velocidad, el tiempo, la tensión eléctrica, la temperatura y la composición química y física.

En cuanto a la textura de los alimentos, se abordan métodos de evaluación como la evaluación sensorial y las medidas instrumentales, con énfasis en métodos fundamentales, imitativos y empíricos, y se describen los tipos de ensayos empíricos utilizados para medir fuerzas.

La tesis detalla el dispositivo de medición y control diseñado para optimizar el análisis reológico. Este incluye un sistema basado en un sensor RTD de platino, que garantiza estabilidad y precisión en un rango amplio de temperatura. Se describe el funcionamiento del sistema de control y adquisición de datos, así como los procedimientos de calibración necesarios para garantizar mediciones exactas.

Finalmente, se plantea un plan de ensayos y muestreo, con una selección del rango de temperatura y procedimientos experimentales específicos para analizar la viscosidad a diferentes concentraciones y condiciones. La preparación de muestras y los ensayos de viscosidad se complementan con la calibración del texturómetro Stable Microsystem TAXT plus para realizar mediciones de retroextrusión.

Este trabajo ofrece una herramienta más accesible y precisa para la industria regional, facilitando el control de calidad en productos alimenticios y mejorando su procesabilidad y estabilidad durante almacenamiento y transporte.

INTRODUCCIÓN

La reología es la ciencia que describe los comportamientos de deformación y flujo de los materiales. Los modelos reológicos resumen las respuestas físicas (parámetros reológicos) bajo una determinada tensión de deformación o una fuerza impulsora de flujo [1]. En el caso de los alimentos, el caso más complejo del tratamiento de datos reológicos, estos parámetros: (1) reflejan la procesabilidad de los materiales alimenticios crudos, semiprocados y procesados, (2) determinan la estabilidad física (tasa de separación de fases) de los productos alimenticios manufacturados y (3) describen las propiedades texturales de los alimentos semisólidos y revelan sus atributos sensoriales [3].

Por lo tanto, los parámetros y modelos reológicos son elementos esenciales en la industria para diseñar líneas de procesamiento, seleccionar equipos operativos como como sistemas de flujo y membranas de filtración, prediciendo la vida útil física de los productos alimenticios, diseñando formulaciones para lograr una estructura específica y prediciendo atributos sensoriales [2].

El término "reología" solo se acuñó y se convirtió en un tema de estudio dedicado en el siglo XX, aunque la investigación reológica para describir la deformación de los materiales y los comportamientos de flujo se realizó ya en el siglo XV. En 1687, Isaac Newton descubrió la relación entre la resistencia al flujo y la velocidad del flujo; también, planteó la hipótesis de la existencia de "fricción interna de fluidos", que se considera una ley básica de la mecánica de fluidos y la hidrodinámica. En el mismo año, dos hermanos, Jacob y Johann Bernoulli, definieron la teoría de la elasticidad y mejoraron la comprensión del flujo hidrodinámico y el comportamiento de flujo. Esta teoría todavía se utiliza en la caracterización de las características físicas de fluidos y sólidos. En 1738, Daniel Bernoulli, describió la relación matemática entre el comportamiento del flujo tubular y las presiones de flujo. Esta relación se conoce como ecuación de Bernoulli, que se utiliza hoy en día para calcular la velocidad de flujo de los alimentos líquidos y/o semisólidos y otros materiales en estado fluido, mediante mediciones de la presión de flujo, incluida la presión estática, la presión debida a la gravedad y la presión de estancamiento dinámico [1,7].

Además, la cavitación hidrodinámica, que se puede calcular mediante la ecuación de Bernoulli, se considera un proceso innovador para la esterilización de alimentos: puede inducir la inactivación celular mediante fluctuaciones de presión. Como la generación de cavidades depende de la presión del flujo, la ecuación de Bernoulli es la base de conocimiento clave para lograr y controlar los efectos específicos de la cavitación [2,5].

En el caso de los alimentos en anaquel, la reología es fundamental para poder predecir su comportamiento. Generalmente los alimentos semisólidos se conservan en esta

Ingeniería Mecánica - 2025

forma porque han sido sometidos a la aplicación de tratamientos térmicos o de conservación que alargan su vida útil. La pasteurización o la esterilización, permiten que se mantengan seguros y comestibles por largos periodos sin necesidad de refrigeración. Los alimentos semisólidos enlatados o envasados son fáciles de almacenar, transportar y consumir, razón por la cual se estudian constantemente a fin de conservar no solo su estructura molecular sino también sus características organolépticas [3,4].

Sin embargo, la estacionalidad de la producción agrícola plantea desafíos significativos, ya que la disponibilidad de frutas y hortalizas varía a lo largo del año, lo que puede afectar la consistencia y calidad del suministro. Una de las ventajas que presentan los alimentos semisólidos es que permiten la disponibilidad fuera de temporada o en regiones donde ciertos productos no pueden ser cultivados [2].

Establecer las especificaciones que optimizan la textura final de los productos y el estudio del efecto de cada operación, es fundamental para evaluar la estructura y comportamiento reológico de éstos. Precisa de la interacción de diferentes disciplinas científicas, tales como la ingeniería de procesos, la microscopía, la reología, la textura y el análisis sensorial. (Fernández, 2008). Szczesniak (1963) y Bourne (1975) clasificaron los métodos instrumentales de medida de la textura en tres grupos: fundamentales, empíricos e imitativos. Comparativamente a los dos últimos, los métodos fundamentales cuantifican propiedades mecánicas (viscosidad, elasticidad, etc), explicando mediante su estudio el comportamiento del alimento, con la ventaja de que las propiedades mecánicas obtenidas están definidas en unidades físicas perfectamente conocidas. El objetivo final es la caracterización mecánica de la textura de los alimentos, aplicando diferentes tipos de ensayos. Convertir la sensación de textura de los alimentos en propiedades estructurales y reológicas que puedan medirse instrumentalmente puede proporcionar información trascendental y es esencial para llevar a cabo una eficiente optimización de las texturas deseadas en los productos alimenticios [13,14].

Las propiedades reológicas de los alimentos están fuertemente influenciadas por la temperatura, concentración y estado físico de dispersión. En la investigación y desarrollo, la reología facilita la formulación de nuevos productos con características sensoriales específicas [6].

Los dispositivos que permiten caracterizar las propiedades reológicas de diferentes tipos de fluidos son de distinto tipo y funcionalidad siendo los más utilizados, viscosímetros rotacionales. No obstante, se trata de instrumental con un costo de adquisición elevado para las empresas de alimentos que suelen tercerizar este tipo de determinaciones [1].

Ingeniería Mecánica - 2025

La Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria de la Universidad Nacional de Cuyo ha brindado servicios relacionados con este tipo de caracterización. Debido a que en la actualidad los viscosímetros rotacionales se encuentran abocados a la medición de propiedades reológicas de polímeros, surgió la necesidad de realizar la medición de propiedades reológicas de pulpas de fruta (una industria regional clave para el Sur de Mendoza) con la técnica de Retroextrusión mediante el uso del Texturómetro de alimentos Stable Microsystem TAXT plus, propiedad del laboratorio de servicios a terceros de la FCAI UNCUYO. La retroextrusión se puede definir como la operación mediante la cual un pistón macizo es empujado hacia abajo dentro de un cilindro cerrado en su base inferior que contiene la muestra de fluido. El movimiento descendente del pistón causa el desplazamiento del material contenido en el cilindro en la dirección opuesta a la del pistón; de ahí el nombre de retroextrusión. La retroextrusión es particularmente útil cuando se trabaja con materiales que poseen una consistencia pastosa, o con soluciones que poseen gran cantidad de partículas suspendidas. Al aplicar la técnica con los dispositivos disponibles se observó imprecisión en los datos obtenidos debido al mal funcionamiento del dispositivo y la ausencia de un sistema de control de temperatura adecuado al problema.

En este trabajo se ha diseñado un dispositivo que contiene un sistema sensor RTD para realizar mediciones de temperatura en pulpas de frutas sobre las que se miden parámetros reológicos. RTD viene del inglés "Resistance Temperature Detector", que significa detector de temperatura resistivo. Típicamente, los RTDs contienen hilos de platino, níquel o cobre, ya que estos materiales tienen un coeficiente de temperatura positivo. Esto significa que un aumento de la temperatura da lugar a aumento de la resistencia; este cambio de resistencia se utiliza para detectar y medir los cambios de temperatura. En este caso se seleccionó un RTD de platino. Éste tiene una excelente resistencia a la corrosión, una elevada estabilidad a largo plazo y mide un amplio rango de temperaturas (-200...+850°C) [16]. Adicionalmente se ha rediseñado el sistema de contención de muestra y la interfaz de salida de datos del sistema. De esta forma uno de los servicios que podría prestarse a las empresas del sector es la adaptación de sus texturómetros para poder aplicar esta técnica con precisión y evitando el uso de viscosímetros rotacionales (muy costosos en comparación con los analizadores de textura como el TAXT).

Objetivos del Estudio:

1. Identificar el comportamiento reológico de las pulpas bajo diferentes concentraciones de °Brix (12.5°, 16°, 24°) y variaciones de temperatura (30°C a 60°C).

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

2. Determinar cómo los parámetros reológicos (índice de consistencia K e índice de flujo n) están relacionados con la estructura molecular y las propiedades prácticas de las pulpas.
3. Evaluar el impacto del comportamiento reológico en la aceptación sensorial y las posibles aplicaciones alimenticias de las muestras analizadas.

Relevancia Científica y Práctica: La caracterización de las propiedades reológicas de alimentos como las pulpas es esencial para entender su comportamiento mecánico durante el procesamiento industrial, almacenamiento y consumo. Este estudio proporciona información clave sobre:

- La adaptabilidad de las pulpas para diversas aplicaciones alimenticias.
- Cómo la concentración de °Brix influye en la textura, estabilidad y aceptabilidad sensorial de los productos.
- La importancia de los parámetros reológicos en la formulación de productos que sean fácilmente manipulables y atractivos para el consumidor.

MARCO TEÓRICO

3.1 Introducción a la reología

La reología es la ciencia derivada de la física que estudia fenómenos de deformación y comportamiento del flujo producidos en la materia, al ser sometida a determinados esfuerzos o tensiones. La aplicación de la reología abarca áreas tan dispares como la geología, técnicas de análisis de concretos, bioingeniería, determinación de estructuras de materiales, ingeniería de procesos, elaboración de plásticos, polímeros, pinturas, dispersión de pigmentos, cosméticos, alimentos, etc. Uno de los principales resultados de la reología es la elaboración de ecuaciones constitutivas, es decir, relaciones entre el estado de tensión de un material y la historia de deformación aplicada. Se caracterizan por la presencia de las llamadas funciones materiales, que son los parámetros físicos que describen cuantitativamente el comportamiento [1].

Dentro del campo de la industria alimenticia pueden señalarse varias razones que justifican la necesidad de conocer los datos reológicos de un determinado alimento:

- Cálculo de equipos de proceso, tales como intercambiadores de calor, bombas, cañerías de transporte de fluidos, agitadores, tolvas de descarga, etc.
- Control de calidad en productos terminados.
- Determinación de la influencia de ciertos ingredientes en el desarrollo de nuevos productos.
- Seguimiento de la vida útil en anaquel de productos terminados.
- Comparación de textura de alimentos por métodos físicos con datos sensoriales.
- Predicción de la composición de alimentos en cuanto al tipo de moléculas, peso y distribución por peso de las mismas, como también del grado de entrecruzamiento de polímeros y su elasticidad.
- Análisis de modelos matemáticos de estado reológicos.

La reometría es la contraparte experimental y metrológica de la reología. Su principal objetivo es medir las funciones materiales estudiadas por la reología. Esto se logra mediante el uso de aparatos específicos, los reómetros, donde los materiales experimentan historias específicas de tensión o deformación [1].

Para comprender mejor el estado actual de la reometría, es necesario presentar brevemente una perspectiva histórica. La reometría moderna nació con el estudio de fluidos no newtonianos, cuya viscosidad es una función del gradiente de velocidad. Durante el transcurso del siglo pasado, la reología se involucró con materiales cada vez más complejos, como líquidos viscoelásticos, sólidos viscoelásticos, geles y muchos otros. La mayoría de estos materiales, que pueden clasificarse bajo el término materia

Ingeniería Mecánica - 2025

blanda, pueden mostrar un comportamiento similar al de un líquido o al de un sólido, dependiendo del historial de deformación y del tipo e intensidad de los campos externos aplicados (fuerzas, campos magnéticos y eléctricos). En consecuencia, las técnicas de reometría se han vuelto cada vez más sofisticadas.

Al estudiar el comportamiento reológico de un fluido semisólido (no newtoniano) recibimos información sobre la microestructura del mismo. Las propiedades reológicas son la manifestación de la velocidad y la naturaleza de la deformación que se produce cuando se somete a un material a tensión. Estos parámetros permiten predecir cómo se comportará el fluido en un proceso y para determinar el requisito de energía para transportarlo de un punto a otro en la planta de procesamiento. Los parámetros reológicos también son útiles para definir el atributo de calidad de los productos fluidos. El mercado actual ofrece una gran gama de viscosímetros/reómetros, capaces de medir varias propiedades reológicas de interés [11,12].

Los reómetros y viscosímetros más comunes, encontrados en el mercado internacional, pueden agruparse en dos grupos: equipos del tipo rotacional y equipos del tipo tubo. En la Figura se muestra un esquema de diferentes tipos pertenecientes a estas dos categorías, y en el que solo se indican los más comúnmente encontrados [12].

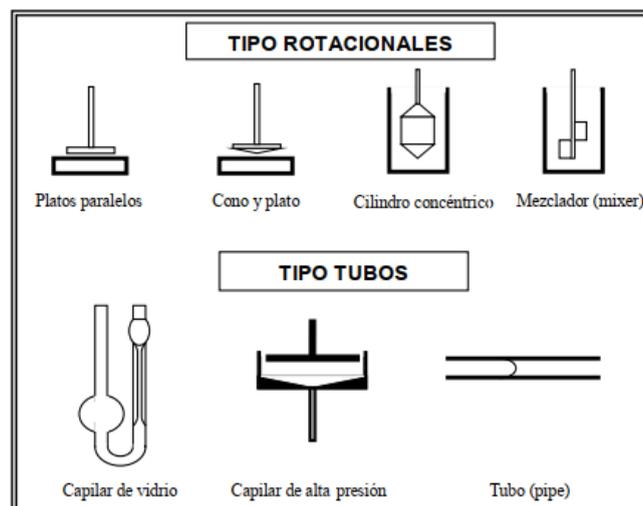


Figura 3.1. Viscosímetros y reómetros del tipo rotacional y tipo tubo.

3.2 Estudio de los Fluidos

Para realizar el estudio de los fluidos, se somete a los mismos a un continuo cizallamiento unidireccional o esfuerzo de corte originando en los mismos un flujo del

Ingeniería Mecánica - 2025

tipo laminar, que se define como el deslizamiento de innumerables láminas de fluido infinitamente delgadas, comportándose como entidades independientes. Al variar el estado de reposo de un líquido, éste se deformará hasta alcanzar una nueva forma, por lo que los fluidos son sustancias que no resisten permanentemente a la deformación [1].

Durante un periodo de deformación, se generan tensiones de corte que se manifiestan entre las láminas del fluido, las que desaparecen al alcanzar la forma final. Como los líquidos se oponen a los esfuerzos cortantes, siempre que exista una variación de dicho esfuerzo en el tiempo, tendrá que existir una fuerza de cizalla F_c , paralela al plano del esfuerzo cortante y que, expresada por unidad de área del plano de cizalladura A_c , da la mencionada tensión de corte.

$$\sigma = \frac{F_c}{A_c} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

Esto puede representarse colocando al líquido entre dos planos paralelos separados entre sí por una distancia y . El plano inferior es fijo mientras que el superior se mueve a velocidad constante v , Figura. 3.2. El deslizamiento de los planos desde el superior, provocará el movimiento de la lámina de fluido adyacente en su misma dirección y así sucesivamente, generando tensiones de corte entre las láminas y un gradiente de velocidad decreciente hacia el plano fijo, cuya velocidad es nula [7,8].

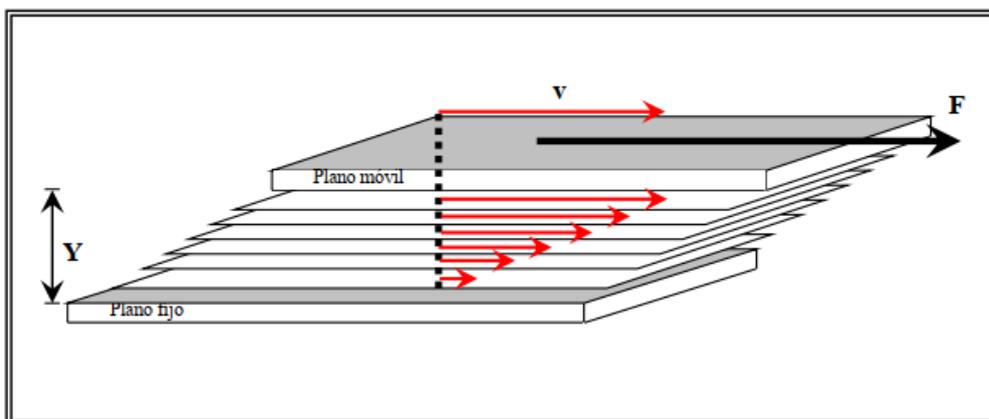


Figura 3.2. Gradiente de velocidad generado en un fluido colocado entre dos planos paralelos

Para el flujo anteriormente mencionado, el gradiente de velocidad, puede definirse como la relación entre la variación del esfuerzo producido en la unidad de tiempo.

3.2.1 Esfuerzo de corte

La fuerza F requerida para mover el plato superior (Figura 3.2) se relaciona con el área en contacto con la sustancia y para llegar a una medida específica es necesario dividir la fuerza total necesaria para el movimiento por el área en contacto con la sustancia. A esta relación se le denomina Esfuerzo de Corte τ (el movimiento entre planos es siempre referido como "corte" o "cizalla", en inglés "shear"). Las unidades usuales para la fuerza son la dina (1000 dinas equivalen al peso de 1 gramo aproximadamente), y para el área, en cm^2 .

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación (3.2).}$$

Tanto el esfuerzo como la deformación (o velocidad de cizalla) son en realidad tensores de segundo orden y pueden ser representados por una matriz 3×3 con nueve componentes. Por ejemplo, el tensor de esfuerzo, en un sistema de coordenadas arbitrario con ejes 1, 2 y 3 (equivalente a x , y y z en coordenadas rectangulares; r , z y θ en coordenadas cilíndricas o r , θ y ϕ en coordenadas esféricas) está dado por:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \tau_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \tau_{33} \end{pmatrix}$$

El primero y segundo subíndice de cada componente del tensor de esfuerzo, τ_{ij} , en la matriz, identifica la fila (la dirección del vector fuerza) y la columna (la normal al plano sobre el cual actúa el componente de la fuerza), respectivamente. El tensor esfuerzo (así como el tensor deformación, el cual se puede escribir de una manera análoga) es simétrico. Esto significa que $\tau_{ij} \equiv \tau_{ji}$, y, por tanto, sólo seis componentes de los nueve totales, son independientes. Los componentes normales del esfuerzo son aquellos que yacen a lo largo de la diagonal de la matriz donde $i \equiv j$ (esto es, τ_{11} , τ_{22} y τ_{33}) [7].

3.2.2 Velocidad de deformación o cizallamiento

El cizallamiento ejercido sobre el material está relacionado con la velocidad relativa de movimiento y la distancia entre platos (y en nuestro caso) a una velocidad v , dada, mayor esfuerzo se requiere en una unidad de material cuando los platos están más cercanos. La medida específica de este trabajo por unidad de material es llamada velocidad o tasa de deformación o corte, y es definida como la velocidad relativa dividida por la distancia entre platos:

Ingeniería Mecánica - 2025

$$\dot{\gamma} = D = \frac{v \text{ (cm/s)}}{y \text{ (cm)}} \quad \text{Ecuación (3.3).}$$

3.2.3 Ley de Newton

La siguiente Ecuación derivada de la (3.2) expresa la velocidad de deformación para fluidos newtonianos.

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{dv_x}{dy} \quad \text{Ecuación (3.4).}$$

Indica que la fuerza de cizalla por unidad de área es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local. Esta es la Ley de Newton de la viscosidad, y los fluidos que la cumplen se llaman fluidos Newtonianos (todos los gases y la mayor parte de los líquidos sencillos, se comportan de acuerdo con esta ley). La constante de proporcionalidad en la ley es la viscosidad absoluta.

Para describir el estado general de tensiones y esfuerzos que se producen en el flujo, éste se debe considerar tridimensionalmente. De esta manera, en el flujo cizallado en forma simple, conocido como flujo viscométrico, pueden identificarse tres variables dependientes del gradiente de velocidad, llamadas funciones viscométricas, las que describen completamente el estado de tensiones en el fluido.

$$\eta = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma_{21}}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación (3.5).}$$

$$\Psi_1 = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{(\dot{\gamma})^2} = \frac{N_1}{(\dot{\gamma})^2} \quad \text{Ecuación (3.6).}$$

$$\Psi_2 = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma_{22} - \sigma_{33}}{(\dot{\gamma})^2} = \frac{N_2}{(\dot{\gamma})^2} \quad \text{Ecuación (3.7).}$$

donde $\eta(\dot{\gamma})$ es la función viscosidad, $\Psi_1(\dot{\gamma})$ y $\Psi_2(\dot{\gamma})$ son el primer y segundo coeficiente de tensión normal respectivamente, y σ_{ij} indica la tensión de corte aplicada sobre la cara perpendicular al eje i en un elemento de fluido infinitesimal y actuando en la dirección del eje j . {1,7}.

Ingeniería Mecánica - 2025

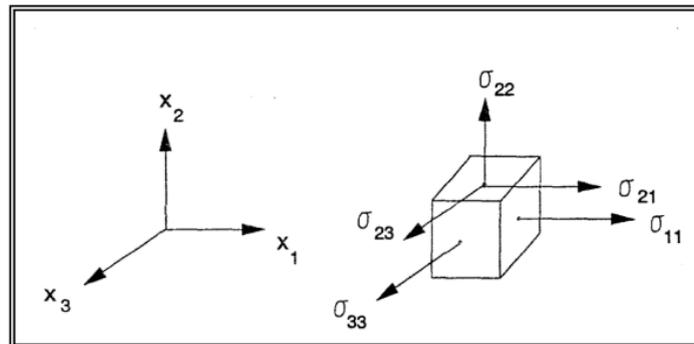
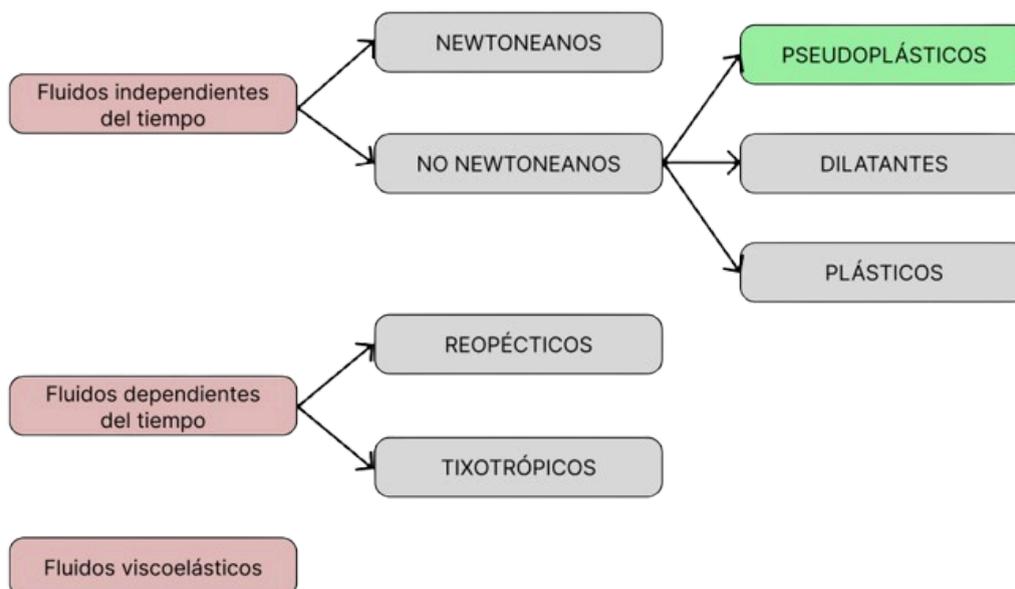


Figura 3.3. Tensiones de corte producidas sobre un elemento infinitesimal, en el flujo de un fluido.

3.3 Clasificación de fluidos y modelos reológicos

La existencia de las propiedades reológicas mencionadas, supone el hecho de que estas pueden relacionarse a partir de los datos obtenidos en la práctica, mediante modelos matemáticos que expresan el comportamiento de un determinado fluido.

Este comportamiento puede visualizarse normalmente graficando tensiones de corte versus gradientes de velocidades. De esta manera se obtienen varias relaciones que permiten realizar la siguiente clasificación de fluidos:



3.3.1 Fluidos Independientes del Tiempo de Cizalla.

Se dice que estos fluidos se comportan en “estado estacionario”, debido a que a cada tensión de corte le corresponde una velocidad de deformación.

Fluidos Newtonianos.

Exhiben un comportamiento similar al líquido de Newton a bajos rangos de gradiente de velocidad. Estos fluidos carecen de propiedades elásticas, son incompresibles e isótropos. Se caracterizan por presentar linealidad en la variación del gradiente de velocidad respecto a la tensión de corte. El modelo matemático que se utiliza para representar a estos fluidos es la “Ley de Newton de la viscosidad”.

$$\sigma = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \gamma' \quad \text{Ecuación (3.8).}$$

El término “ μ ” es llamado “Coeficiente de viscosidad” o simplemente viscosidad y para fluidos newtonianos es constante, es decir, independiente del gradiente de velocidad aplicado. La representación de la tensión de corte generada en un fluido newtoniano versus el gradiente de velocidad, es una línea recta cuya pendiente indica el valor del coeficiente de viscosidad. En la Figura (3.4) se puede visualizar el comportamiento constante del coeficiente de viscosidad graficando éste, versus el gradiente de velocidad.

Si se ensayan los líquidos newtonianos en un modelo físico constituido por un amortiguador que consiste en un recipiente lleno del líquido en el que se mueve un émbolo en sentido ascendente – descendente, puede observarse que luego de retirar los esfuerzos que producen el flujo, el recipiente guardará su posición mostrando la inelasticidad del líquido y la deformación permanente del mismo, Figura (3.5).

A menudo se llama al coeficiente de viscosidad como “Viscosidad dinámica”, para distinguirla de la “viscosidad cinemática ν ” que es el coeficiente de viscosidad medido directamente en viscosímetros capilares de tubo en U, en los que la tensión de cizalla la proporciona el propio líquido de ensayo [1,5].

Ingeniería Mecánica - 2025

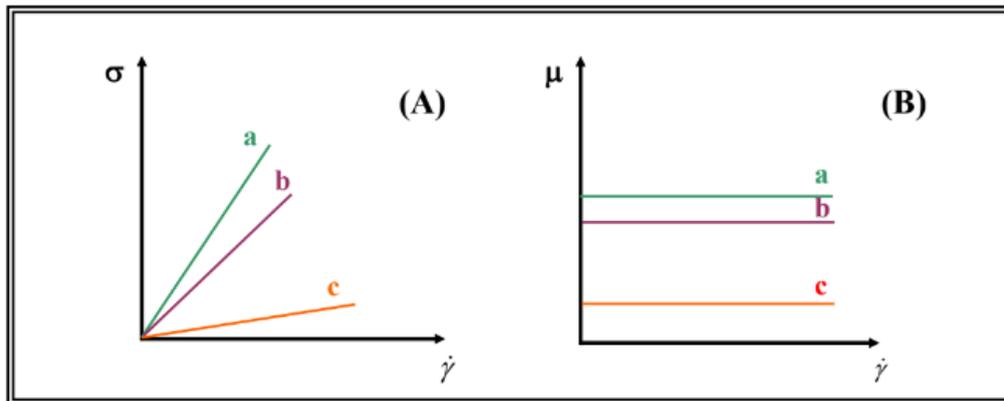


Figura 3.4. Fluidos newtonianos. (A) Representación gráfica de Tensión de corte vs Gradiente de velocidad. (B) Representación del Coeficiente de viscosidad vs Gradiente de velocidad

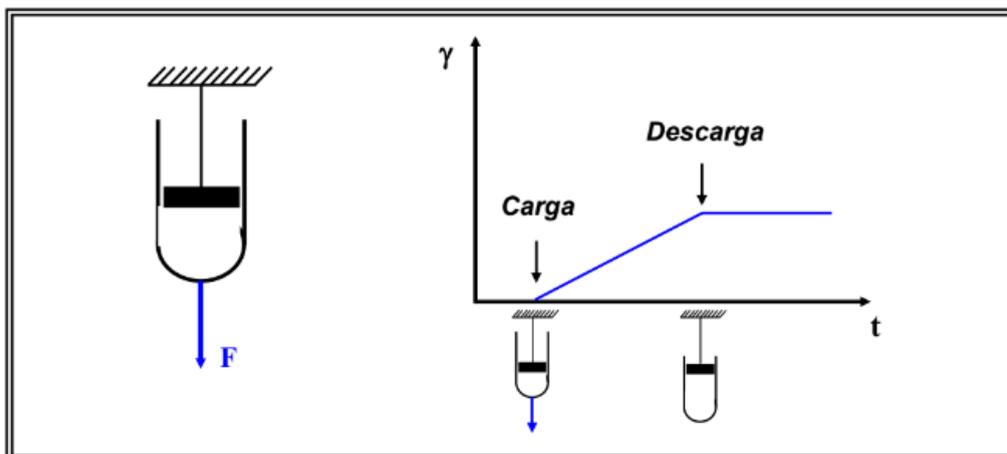


Figura 3.5. Modelo físico del líquido de Newton y gráfica de Esfuerzo vs. Tiempo. Deformación permanente del líquido newtoniano.

Esta tensión no depende solo de la altura de la columna de líquido, sino también de la densidad de éste y para convertir un coeficiente en el otro hay que dividir la viscosidad dinámica por la densidad del líquido.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ecuación (3.9) .}$$

Ingeniería Mecánica - 2025

La viscosidad de fluidos newtonianos es influenciada por la composición del alimento o de la sustancia considerada y por la temperatura. En términos generales, las soluciones ofrecen un flujo newtoniano si la cadena macromolecular consta de menos de mil átomos, aunque también pueden presentar comportamiento newtoniano soluciones diluidas de macromoléculas. Además, en un comportamiento newtoniano, las suspensiones macromoleculares deben poseer una estructura discontinua y las moléculas comportarse rígidamente en las condiciones del ensayo. Las partículas asimétricas pueden mostrar algunos efectos no newtonianos, incluso en disoluciones no muy grandes. También es preciso que no haya interacción entre ellas o que sea independiente de la velocidad de flujo [3-5].

Como ejemplos de líquidos newtonianos puede mencionarse el agua, soluciones azucaradas, leche pasteurizada, alcohol, té y dispersiones diluidas de partículas esféricas.

Fluidos No Newtonianos.

Éstos materiales no muestran la linealidad particular de los fluidos newtonianos entre la tensión de corte y el gradiente de velocidad, exhibiendo comportamientos característicos, lo que hace posible dividirlos en cuatro grupos:

- Plásticos
- Plásticos de Bingham.
- Pseudoplásticos.
- Dilatantes.

Dado que el término viscosidad es utilizado solo para el caso de los líquidos newtonianos, el coeficiente de proporcionalidad es denominado entonces Viscosidad aparente η_{ap} , siendo función del gradiente de velocidad y definido como:

$$\eta_{ap} = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación (3.10).}$$

El comportamiento de los fluidos no newtonianos, y en particular de muchos alimentos, puede describirse mediante la ecuación general del “Modelo de Herschel – Bulkley”:

$$\sigma = \sigma_0 + K(\dot{\gamma})^n \quad \text{Ecuación (3.11).}$$

donde K y n son constantes denominadas “Coeficiente de consistencia al flujo” e “Índice de comportamiento al flujo”, respectivamente, y “ σ_0 ” se nombra “tensión de

Ingeniería Mecánica - 2025

fluencia". En la Tabla 3.1 se indican los límites que pueden adoptar estas constantes para los distintos tipos de fluidos no newtonianos y en fluidos newtonianos.

Tabla 3.1. Valores típicos que adoptan las constantes en la ecuación de Herschel - Bulkley para fluidos independientes del tiempo de cizalla.

FLUIDO	K	n	σ_0
Newtonianos	> 0	1	0
Plásticos	> 0	$0 < n < \infty$	> 0
Plásticos de Bingham	> 0	1	> 0
Pseudoplásticos	> 0	$0 < n < 1$	0
Dilatantes	> 0	$1 < n < \infty$	0

Fluidos Plásticos y Plásticos de Bingham. Estos fluidos presentan una tensión de fluencia (σ_0) distinta de cero, la que puede interpretarse como una tensión finita mínima necesaria para lograr que la sustancia bajo ensayo alcance un estado de flujo, Figura (3.6). Por debajo de esta tensión de fluencia (σ_0) se comportan y exhiben propiedades de sólidos. La diferencia que existe entre ambos fluidos es que, mientras que los plásticos de Bingham se comportan como fluidos newtonianos luego de haber superado σ_0 , los fluidos plásticos presentan un comportamiento pseudoplástico o dilatante luego de haber superado dicho valor [1,3,12].

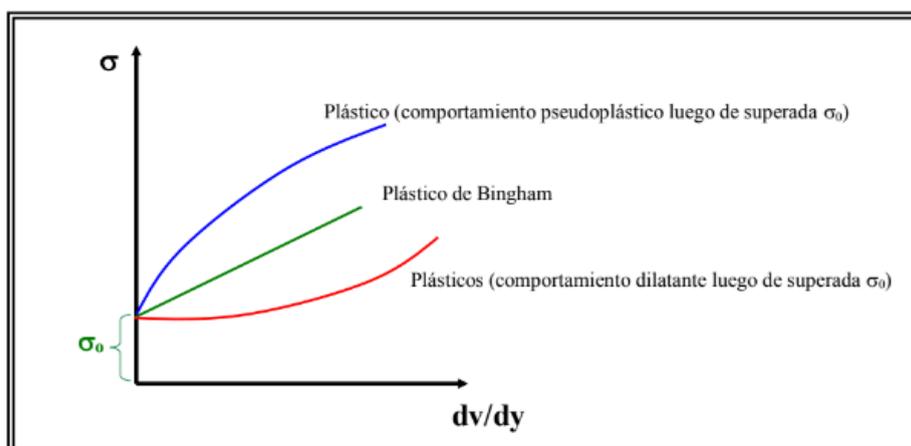


Figura 3.6. Representación gráfica de tensión de corte versus gradiente de velocidad para fluidos plásticos y plásticos de Bingham.

Ingeniería Mecánica - 2025

Las ecuaciones para el modelo de Bingham por debajo de " σ_0 " son las mismas que las del sólido de Hooke. Por encima de " σ_0 " son las mismas que las del líquido de Newton, excepto que el coeficiente de viscosidad se denomina viscosidad plástica, η_{pl} , y que la tensión de corte eficaz solo vale la diferencia entre " σ " y " σ_0 ", que es la que actúa sobre el elemento newtoniano.

El modelo de Bingham por estar constituido por modelos ideales es también ideal. Los plásticos reales están sujetos a la influencia de variables tan complejas como las que afectan a la viscosidad aparente, además de las complicaciones que introduce el valor de deformación plástica o tensión de fluencia. La magnitud de este umbral, característica de cada producto, está relacionada con las fuerzas eléctricas, químicas y mecánicas entre las moléculas y partículas del mismo, e indica su grado de plasticidad o lo que es lo mismo, la resistencia que opone a deformarse permanentemente. A escala molecular, los fluidos plásticos son los que poseen una estructura reticular y el umbral de fluencia es la presión tangencial necesaria para destruirla.

Aplicando pequeños esfuerzos, estas sustancias almacenan energía y no se deforman por la influencia de la gravedad para formar superficies planas, al igual que los anteriores se comportan como sólidos. Ésta es una característica muy importante para la valoración de la calidad en productos alimenticios, tales como manteca, yogurt, ketchup, puré de manzana, suero de leche, etc. La existencia de la tensión de fluencia se contrapone al argumento de que toda sustancia fluye, siempre que sea de la misma, el suficiente tiempo para lograrlo o usando equipos con una elevada sensibilidad para registrar dicho fenómeno. Desde un punto de vista práctico no hay duda de que " σ_0 " es un hecho, que puede tener gran influencia en cálculos ingenieriles de procesos [5-8].

Existen muchos métodos, que usan diferentes técnicas para calcular " σ_0 ". Un método sencillo para encontrarla, es extrapolar la curva obtenida al graficar tensiones de corte vs. gradientes de velocidad, hasta interceptar el valor de tensión de corte que corresponda a un valor nulo del gradiente de velocidad. Los valores obtenidos por este método están fuertemente influenciados por el modelo reológico usado Bingham, Herschel – Bulkley, etc. y por el rango del gradiente de velocidad empleado. Un procedimiento alternativo es graficar viscosidad aparente vs. tensión de corte y determinar " σ_0 " cuando " η_{ap} " se hace infinita.

Recordando la ecuación (3.10) que define que la viscosidad aparente es igual a la tensión de corte dividida por el gradiente de velocidad, pueden obtenerse las viscosidades aparentes para los fluidos plásticos de Bingham ecuación (3.12) y plásticos reales ecuación (3.13):

Ingeniería Mecánica - 2025

$$\eta_{pl} = f(\dot{\gamma}) = \frac{K(\dot{\gamma})^n + \sigma_0}{\dot{\gamma}} = K + \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación (3.12).}$$

$$\eta_{pl} = f(\dot{\gamma}) = \frac{K(\dot{\gamma})^n + \sigma_0}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1} + \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación (3.13).}$$

Puede verse que en los plásticos de Bingham la viscosidad aparente decrece cuando crece el gradiente de velocidad y para fluidos plásticos, la viscosidad aparente decrece a valores altos de gradiente de velocidad cuando $0 < n < 1$, pero aumenta cuando $n > 1$.

La falta de información sobre la magnitud del umbral de fluencia en los purés y concentrados de frutas está relacionada con las dificultades que plantea su medida en los sistemas orgánicos de estructura compleja. Esta dificultad nace principalmente de dos causas: la propia naturaleza física del umbral de estos materiales y los inconvenientes que existen para su medida experimental. Respecto a la primera, hay que tener en cuenta que, en este tipo de productos, la estructura reticular rara vez se destruye instantáneamente a una presión tangencial determinada, y además, normalmente, la destrucción se produce en un rango de tensiones tangenciales cuya magnitud depende de la resistencia estructural del producto. Este hecho, hace que en muchos casos, sea imposible dar un único valor de tensión de fluencia como representativo del umbral. Las dificultades experimentales están dadas, fundamentalmente, por las limitaciones mecánicas de los equipos de medición. Según Elson y Holdworth (1974) los viscosímetros de cilindros concéntricos, normalmente utilizados para determinar esta propiedad, no son adecuados para medir con precisión el momento en que se produce un cambio en el estado físico del fluido o en su régimen de flujo, debido al gran momento de inercia de sus sistemas de medida [6].

Fluidos Pseudoplásticos.

Éstos experimentan un descenso de la viscosidad aparente al ser sometidos a altas velocidades de deformación y por el contrario aumenta cuando la velocidad de deformación es baja. Por consiguiente, “ η_{ap} ” es función del gradiente de velocidad pero no del tiempo de cizalla. Esta conducta se encuentra frecuentemente en jugos de frutas y vegetales, leche concentrada, soluciones concentradas de macromoléculas, tales como xantano y goma guar, polímeros fundidos, cosméticos y muchos materiales más.

La gráfica de tensiones de corte vs. gradientes de velocidad no es una línea recta, ya que el cambio de la velocidad de deformación aumenta más rápidamente que las tensiones de corte, de manera que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación, figura (3.7).

Ingeniería Mecánica - 2025

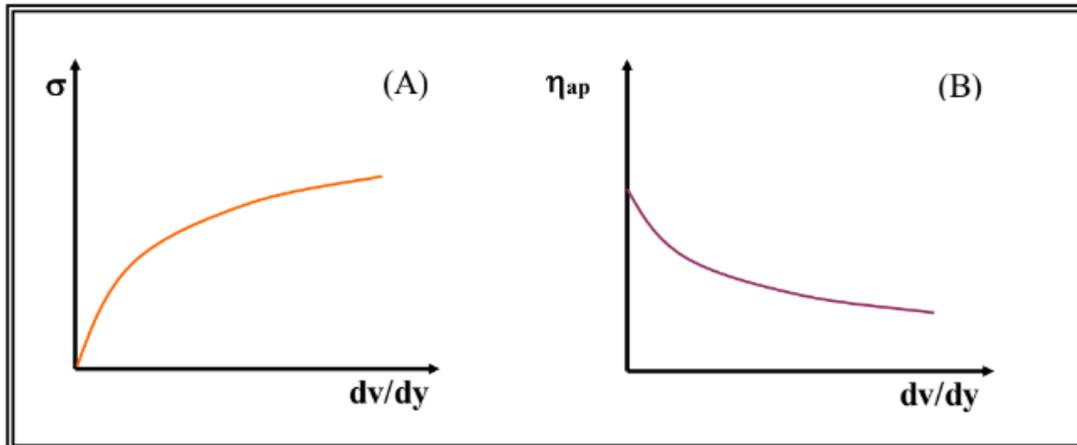


Figura 3.7. (A) Representación gráfica de tensión de corte vs. gradiente de velocidad para fluidos pseudoplásticos. (B) Viscosidad aparente vs. gradiente de velocidad para fluidos pseudoplásticos.

La denominación de fluidos pseudoplásticos surge porque, a bajas tensiones, correspondientes a velocidades de deformación muy pequeñas, la gráfica se asimila mucho a las de un cuerpo plástico de Bingham [5-7].

Al analizar la curva obtenida para tensiones de corte versus gradientes de velocidad, pueden distinguirse tres zonas bien definidas, Figura (3.8). La primera que se encuentra es la región inferior llamada región newtoniana, donde la viscosidad aparente η correspondiente a esta zona es constante para cualquier variación del gradiente de velocidad y se define como Viscosidad límite a valor cero de gradiente de velocidad. La segunda región es la región media, donde la viscosidad aparente η_{ap} cambia constantemente, disminuyendo cada vez más a medida que aumenta el gradiente de velocidad y se puede aplicar la relación matemática denominada “Ley de potencia”. Por último, se observa una tercera región superior, donde la viscosidad aparente η_{∞} no cambia con el aumento del gradiente de velocidad, y es definida como Viscosidad límite a valores infinitos de gradiente de velocidad. De las tres regiones, la intermedia es la más importante, debido a que influye notablemente en el diseño de equipos de proceso [5].

Ingeniería Mecánica - 2025

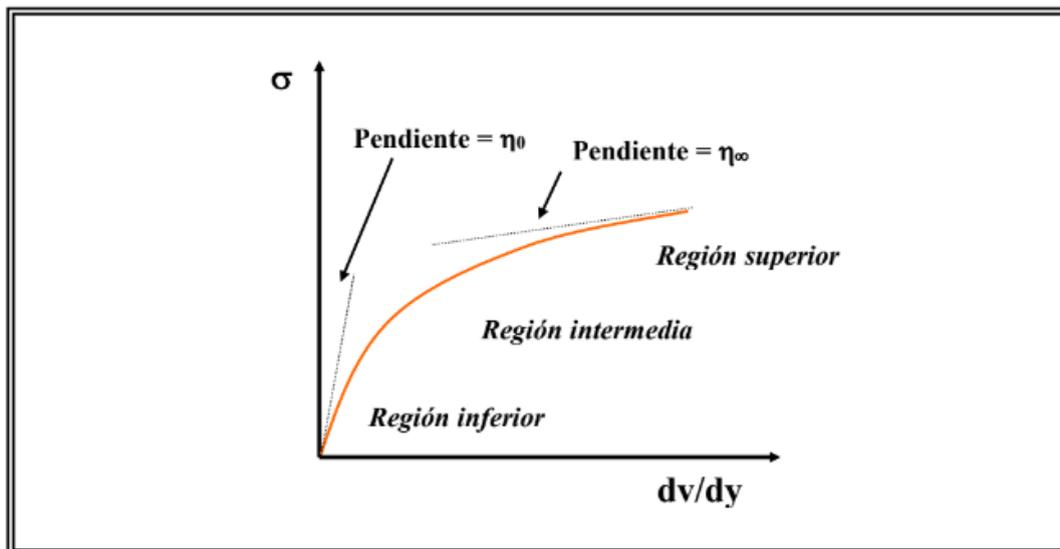


Figura 3.8. Análisis del reograma de un fluido pseudoplástico graficando Tensiones de corte vs. Gradientes de velocidad.

En la parte inferior de la curva, los bajos gradientes de velocidad no aportan la suficiente energía como para lograr la reodestrucción de la materia y por esta razón se comporta como un líquido newtoniano (η_0 constante). Luego de un gradiente de velocidad dado, se alcanza la máxima reodestrucción posible de la materia y la viscosidad tampoco cambia con un aumento de la velocidad de cizalla, permaneciendo constante (η_∞ constante). En la región intermedia, el descenso de viscosidad aparente con el aumento del gradiente de velocidad, indica que progresivamente se logra una orientación de los elementos estructurales, necesitando por esta razón menor cantidad de energía para lograr las tensiones de cizalla. Este comportamiento puede visualizarse graficando viscosidad aparente versus gradientes de velocidad, Figura (3.9)

Ingeniería Mecánica - 2025

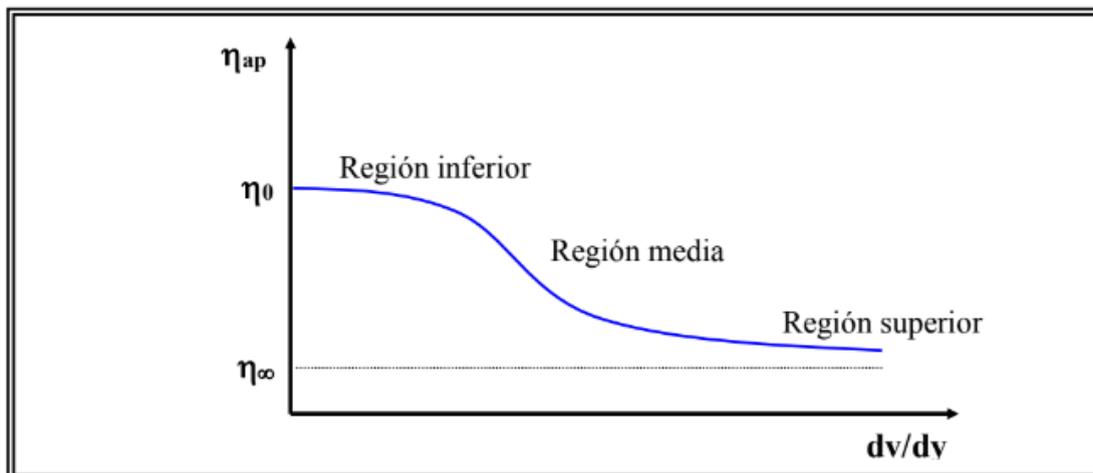


Figura 3.9. Evolución de la viscosidad aparente en un intervalo amplio de gradientes de velocidad, para fluidos pseudoplásticos.

Los límites superior e inferior de la Figura (3.9) no siempre son fáciles de hallar en la práctica y dependen mucho de la composición de la muestra analizada, como también de las velocidades de giro de los viscosímetros rotacionales de cilindros concéntricos y de la sensibilidad de los mismos. Un modelo matemático que permite analizar la relación “ σ/γ ” en un intervalo amplio de gradientes de velocidad, es el “Modelo de Cross”, ecuación (3.14) que se basa en parámetros fácilmente determinables a partir de las curvas obtenidas en la práctica:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (K \dot{\gamma})^m} \quad \text{Ecuación (3.14).}$$

Despejando “ η ” obtenemos:

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (K \dot{\gamma})^m}$$

donde η_0 y η_∞ representan los valores de viscosidad a gradiente de velocidad cero e infinito respectivamente, K es llamado “Tiempo de relajación” e indica el tiempo necesario para que la estructura alcance una situación de flujo en equilibrio sin cambio en η_{ap} y m es un coeficiente potencial.

Ingeniería Mecánica - 2025

A partir de éste modelo, pueden hacerse simplificaciones obteniéndose otros modelos, para casos particulares, que son muy utilizados en la caracterización reológica de fluidos pseudoplásticos. Así, para intervalos de gradientes de velocidad donde “ $\eta \ll \eta_0$ ” y “ $\eta \gg \eta_\infty$ ” la ecuación de Cross se puede simplificar y reordenar adecuadamente para obtener otra, denominada “Ley de potencia o Ecuación de Ostwald de Waele”, ecuación (3.15), que es mucho más sencilla que la obtenida con el modelo de Cross.

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad \text{Ecuación (3.15).}$$

donde n , de manera similar que en la ecuación de Herschel–Bulkley, se llama “Índice de comportamiento al flujo” y representa la desviación del comportamiento del fluido respecto al líquido de Newton, y K es denominado “Coeficiente de consistencia”. Esta ecuación puede aplicarse solo cuando en el producto se logre un reordenamiento estructural importante de la materia a bajos gradientes de velocidad y hasta valores que no correspondan a η_∞ . Muchos productos alimenticios concuerdan con estas condiciones y por lo tanto este modelo ha sido ampliamente utilizado para la caracterización reológica de fluidos alimenticios. Los valores de esta ecuación, pueden encontrarse fácilmente linealizando la ecuación de la siguiente forma:

$$\log \sigma = \log K + n \cdot \log \dot{\gamma} \quad \text{Ecuación (3.16).}$$

La viscosidad aparente para fluidos que sigan la ley de potencia puede determinarse de la siguiente manera:

$$\eta = f(\dot{\gamma}) = \frac{K(\dot{\gamma})^n}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad \text{Ecuación (3.17).}$$

El “Modelo de Sisko” es otro modelo obtenido como un caso particular de la ecuación de Cross, cuando para el gradiente de velocidad en estudio se observa que $\eta \ll \eta_0$. Por lo tanto el modelo de Sisko, ecuación (3.18), es utilizado para gradientes de velocidad medios y altos.

$$\eta = \eta_\infty + K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad \text{Ecuación (3.18).}$$

Los tres modelos matemáticos descritos pueden representarse en un reograma de viscosidad aparente vs. gradientes de velocidad para apreciar las diferencias en las curvas obtenidas, Figura (3.10).

Ingeniería Mecánica - 2025

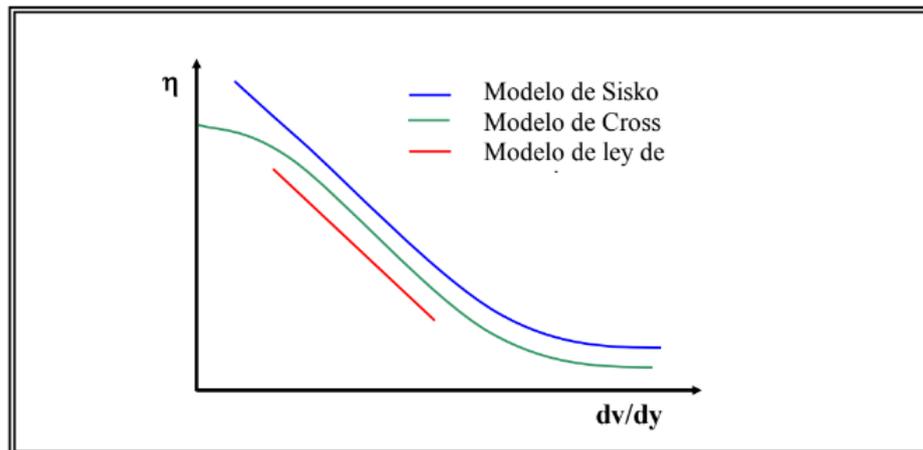


Figura 3.10. Ajuste de η vs $\dot{\gamma}$ aplicando los modelos de Cross, Sisko y Ostwald de Waele (Ley de potencia)

En la bibliografía actual pueden encontrarse otros modelos que describen el comportamiento de fluidos pseudoplásticos, entre los que destacan los mostrados a continuación Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Modelos reológicos representativos de fluidos pseudoplásticos

MODELO (FUENTE)	ECUACIÓN
Powell – Eyring (Powell and Eyring, 1944)	$\sigma = K_1 \dot{\gamma} + \left(\frac{1}{K_2} \right) \sinh^{-1} (K_3 \dot{\gamma})$
Van Wazer (Van Wazer, 1963)	$\eta = \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + K_1 \sigma + K_2 (\sigma)^{n_1}} + \eta_\infty$

Nota: los valores K_1 , K_2 , K_3 y n_1 son constantes arbitrarias e índices de potencia, respectivamente, determinada a partir de datos experimentales.

Fluidos Dilatantes.

Es el fenómeno inverso a la pseudoplasticidad, es decir un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo que se produce al aumentar las velocidades de deformación. De igual forma que en los casos anteriores, la gráfica obtenida experimentalmente no es lineal, y para cada valor de tensiones de corte corresponde sólo un valor del gradiente de velocidad, es decir, están unívocamente relacionados, Figura (3.11). Los modelos matemáticos que describen el comportamiento reológico de estos fluidos son los

Ingeniería Mecánica - 2025

mismos que los utilizados para fluidos pseudoplásticos, teniendo en cuenta que los valores de índice de comportamiento al flujo y coeficiente de consistencia varían entre los límites mostrados en la Tabla 3.1.

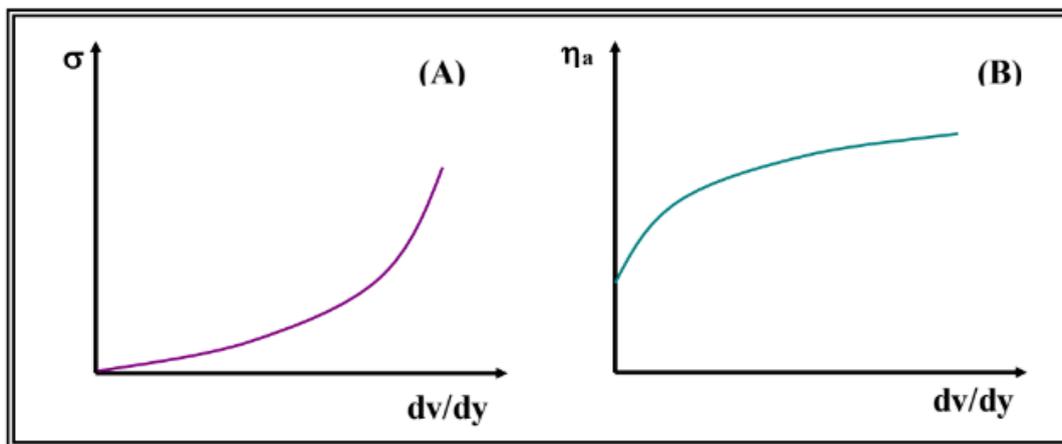


Figura 3.11. Fluidos dilatantes (A) Representación gráfica de Tensión de corte vs. Gradiente de velocidad. (B) Representación de Viscosidad aparente vs. Gradiente de velocidad.

Es poco frecuente el comportamiento dilatante en alimentos y en los intervalos normales de gradientes de velocidad no se ha observado en la práctica. Ejemplos de líquidos dilatantes son suspensiones de gránulos de almidón y soluciones concentradas de varias macromoléculas preferentemente a valores altos de gradiente de velocidad [5-7].

3.3.2 Fluidos Dependientes del Tiempo de Cizalla.

Estos fluidos idealmente son considerados como inelásticos y su viscosidad es función del tiempo de cizalla. Este comportamiento es debido a que se produce durante el ensayo un cambio en la estructura de la materia. Cabe destacar que mientras la respuesta de estas sustancias a la aplicación de tensiones es instantánea, la de sustancias viscoelásticas no lo es. Esto se debe a que la respuesta a las tensiones aplicadas en la materia viscoelástica no está asociada a un cambio estructural de la misma. Además, las escalas de tiempo para ambas sustancias pueden ser muy diferentes, pudiendo tener efectos perjudiciales en situaciones que involucren procesos con tiempos muy cortos de realización. En la clasificación inicial se vio que estos fluidos se dividen en tixotrópicos y reopéticos. Los primeros, exhiben una disminución de la viscosidad aparente en el tiempo para un gradiente de velocidad constante, mientras que los reopéticos exhiben

Ingeniería Mecánica - 2025

el comportamiento contrario, es decir, un aumento de la viscosidad aparente para un gradiente de velocidad constante. Ambos fenómenos pueden ser totalmente reversibles, parcialmente reversible o irreversibles, esta última situación, también denominada reodestrucción, es común en alimentos.

Los tres últimos comportamientos, están asociados a la conformación de la materia en términos del fenómeno de transición sol – gel. Luego de envasados, muchos alimentos sufren una reestructuración molecular formando una red tridimensional que puede describirse como la formación de un gel. El cizallamiento de este tipo de estructura, produce una destrucción de la misma, hasta alcanzar una viscosidad mínima para una velocidad de deformación dada y la materia existe en forma de estado de sol. Cuando ésta es retirada, la red tridimensional molecular puede volver a formarse o permanecer destruida. En este último caso el alimento permanecerá en estado de sol.

En la Figura (3.12), se puede observar la representación gráfica de tensiones de corte vs. tiempo de cizalla a gradientes de velocidad constantes.

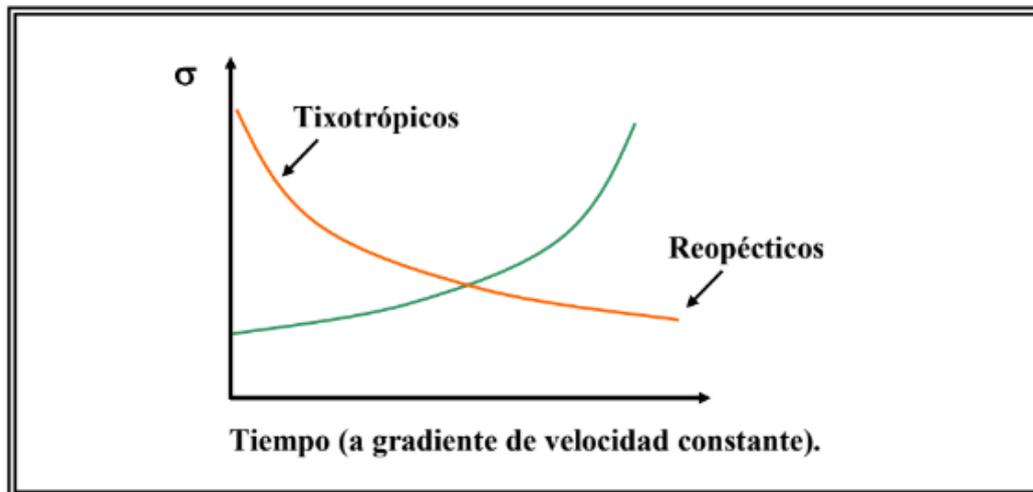


Figura 3.12. Representación gráfica de tensiones de corte vs. Tiempo de cizalla para fluidos dependientes del tiempo.

Fluidos tixotrópicos.

Si estos fluidos se representan gráficamente exhiben un comportamiento similar al de un fluido pseudoplástico, ya que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación. La diferencia reside en que el descenso de la viscosidad no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación sino

Ingeniería Mecánica - 2025

también con el tiempo de cizalla; así, manteniendo constante la velocidad de deformación la viscosidad aparente η_{ap} desciende con el tiempo.

La representación gráfica de σ vs. γ se obtiene aumentando γ a intervalos definidos hasta un máximo y descendiendo luego de igual modo hasta que el gradiente de velocidad se haga cero. En este tipo de ensayo se debe mantener constante el intervalo de tiempo entre dos lecturas, al igual que el tiempo en el que se efectúan las propias lecturas, Figura (3.13). Al graficar σ vs. γ se forma un bucle llamado “Bucle de histéresis”.

Además de controlar las condiciones en las que las determinaciones se efectúan, también debe considerarse la historia previa de la muestra; así por ejemplo, tanto el muestreo como el llenado de la copa del viscosímetro se debe realizar siempre de un mismo modo. Las curvas de histéresis obtenidas, pueden ser útiles para comparar diferentes alimentos, siempre que las condiciones de los ensayos sean idénticas, es decir, que los intervalos de medición entre dos valores de gradiente de velocidad y el tiempo de registro sean iguales y constantes en el experimento.

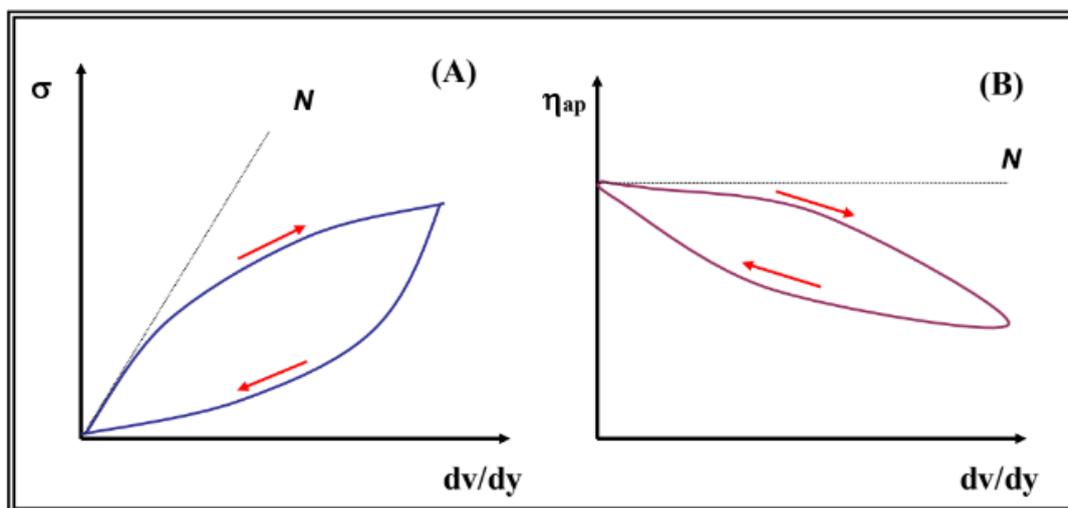


Figura 3.13. (A) Representación gráfica de tensiones de corte vs. gradiente de velocidad y (B) Viscosidad aparente vs. gradiente de velocidad para fluidos tixotrópicos.

Fluidos Reopéticos

Ingeniería Mecánica - 2025

Estos fluidos sufren un espesamiento dependiente del tiempo cuando se los cizalla a un gradiente de velocidad constante. Por consiguiente, la viscosidad aparente η_{ap} también será función del gradiente de velocidad aplicado y del tiempo de cizalla.

Así, las curvas del reograma no coinciden y forman un área de histéresis o bucle, al igual que en el caso anterior. La representación gráfica de σ vs. γ se obtiene aumentando γ a intervalos definidos como en fluidos tixotrópicos, por lo que hace falta un riguroso control de tiempo en las determinaciones, Figura (3.14). Si estos ensayos se realizan con el suficiente tiempo, de manera que se logre llegar a un comportamiento a tiempo infinito, se obtendrá la mayor área de histéresis posible.

En fluidos tixotrópicos, esta área indica el máximo grado de ruptura de la estructura del producto, mientras que áreas intermedias indicarán grados de ruptura intermedios. Para fluidos reopécticos, indica el grado de reorganización estructural [1,5,8].

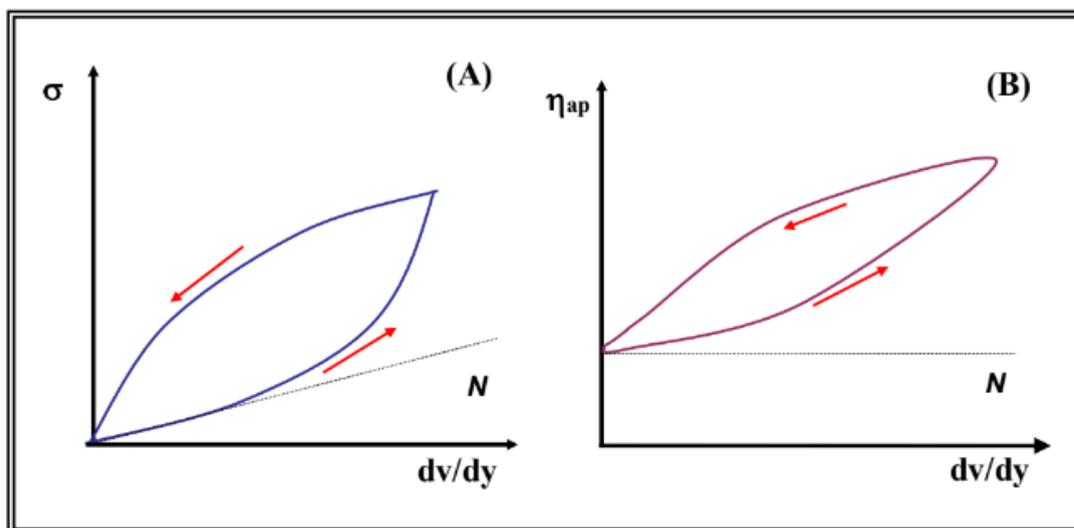


Figura 3.14. (A) Representación gráfica de tensiones de corte vs. gradiente de velocidad para fluidos y (B) Viscosidad aparente vs. gradiente de velocidad para fluidos reopécticos.

y áreas intermedias indicarán diferentes grados de reorganización. El valor del área de histéresis depende por lo tanto del tipo de material, del intervalo de gradientes de velocidad aplicado y de la velocidad en el cambio de ésta última.

Ingeniería Mecánica - 2025

Durante un ensayo, el área de histéresis dependerá del tiempo de cizalla, hasta que se logre la situación de equilibrio en el cual el área permanecerá constante. Una forma de asegurar que se ha alcanzado el estado de equilibrio del producto en cuanto al grado de destrucción — reorganización estructural es efectuar barridos sucesivos de gradiente de velocidades ascendentes o descendentes hasta observar una superposición de curvas.

En la Figura (3.15), se muestra una comparación entre fluidos dependientes e independientes del tiempo para tensión de corte vs. tiempo a gradiente de velocidad constante.

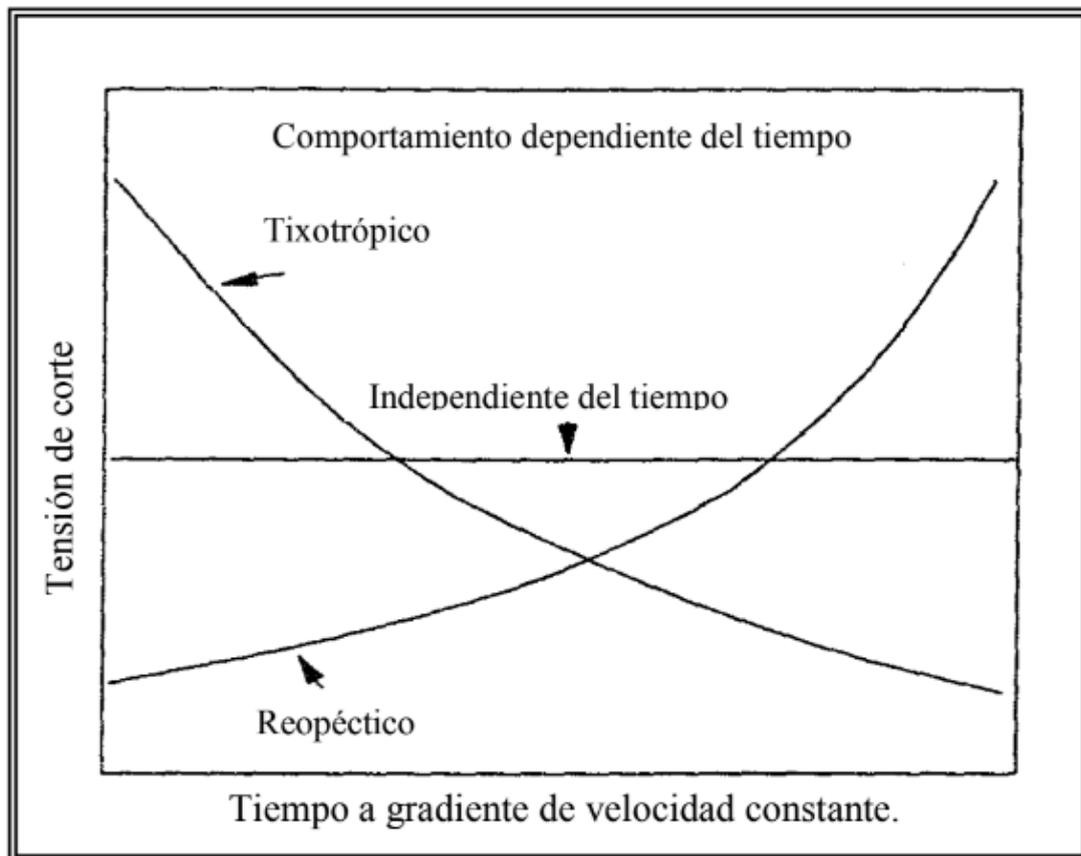


Figura 3.15. Tensión de corte vs tiempo para fluidos independientes y dependientes del tiempo a gradiente de velocidad constante.

Ingeniería Mecánica - 2025

3.3.3 Fluidos Viscoelásticos.

En contraste a lo que ocurre en fluidos plásticos, donde pueden distinguirse dos zonas: una zona elástica, por debajo de la tensión de fluencia, y una plástica, que actúan de forma independiente una de otra; en materiales viscoelásticos estos dos comportamientos se manifiestan simultáneamente. Un ejemplo típico lo representa una tira de masa de harina de trigo. Si se estiran los extremos de la tira, ésta parecerá fluir como un líquido viscoso. Sin embargo, al cesar el esfuerzo en los extremos, ésta se contraerá hasta recuperar parcialmente su forma original, es decir, la recuperación elástica será parcial. Este experimento muestra que la masa exhibe comportamiento viscoso propio de líquidos y comportamiento elástico propio de sólidos, simultáneamente. Otros alimentos que exhiben comportamiento viscoelástico son masas de carne y patés de hígado, masas de pan, masas para galletas y pasteles y la mayoría de los quesos. Dado que en el presente trabajo no se pretende determinar la posible viscoelasticidad de las pulpas de durazno no se profundizará sobre este tema [9].

3.4 Factores que afectan la viscosidad

La viscosidad de un fluido describe la resistencia interna al flujo, generada cuando se lo cizalla o incita a fluir. Es afectada por parámetros independientes tales como: composición química y física, temperatura, presión, gradiente de velocidad, tiempo y tensión eléctrica:

$$\eta = f(c, T, p, \dot{\gamma}, t, V) \quad \text{Ecuación (3.19)}$$

La influencia de estos parámetros sobre el comportamiento del flujo se puede a menudo modelizar matemáticamente a través de ecuaciones simples. Temperatura y concentración de sólidos solubles, son los parámetros más sencillos y de más influencia reológica, por lo que se les prestará más atención en este trabajo.

3.4.1 Presión

Cuando se comprimen los fluidos aumenta la resistencia intermolecular. Por lo tanto al aumentar la presión tenderá a aumentar la viscosidad del fluido. Sin embargo, dada la baja compresibilidad de los fluidos se necesitan altas presiones para apreciar un incremento pequeño de la viscosidad.

3.4.2 Gradiente de Velocidad

La influencia de este parámetro ya se estudió en la parte de comportamientos de fluidos y modelos matemáticos. Se vio que al aumentar el gradiente de velocidad la viscosidad puede disminuir, como en los fluidos pseudoplásticos y tixotrópicos; mantenerse constante en el caso de fluidos Newtonianos o aumentar para fluidos dilatantes y reopéticos.

Ingeniería Mecánica - 2025

3.4.3 Tiempo

Para estudiar la influencia de este parámetro deben conocerse previamente las tensiones y esfuerzos que fueron aplicados al fluido, debido a que si se analizan fluidos dependientes del tiempo, los resultados de la investigación de la tixotropía y reopectía no serán correctos.

3.4.4 Tensión Eléctrica - Voltaje Eléctrico

Muchas suspensiones están fuertemente influenciadas por el campo eléctrico que actúa sobre ellas. Estas sustancias contienen partículas cargadas eléctricamente y se denominan fluidos electroviscosos o fluidos electroreológicos. La aplicación de una tensión eléctrica sobre un fluido electroviscoso hace que éste cambie su viscosidad aumentando en forma instantánea y reversible, para convertirse en líquidos más viscosos o incluso a estados sólidos intermedios, dependiendo del cambio del campo eléctrico.

3.4.5 Temperatura

La influencia de éste parámetro sobre la viscosidad para fluidos newtonianos se puede expresar a través de una ecuación tipo Arrhenius:

$$\mu = f(T) = A e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad \text{Ecuación (3.20).}$$

Donde A es una constante, E_a representa la energía de activación para la viscosidad, T la temperatura absoluta a la que se realiza el ensayo y R la constante universal de los gases. E_a y A son determinados experimentalmente. Valores altos de E_a revelan un cambio más rápido de la viscosidad con la temperatura.

Cuando se intenta determinar la viscosidad de una sustancia newtoniana, a una temperatura T determinada, puede plantearse una ecuación en la cual se toma como referencia una viscosidad conocida μ_r a la temperatura de referencia T_r ; de esta manera puede eliminarse la constante A de la ecuación (3.20) que en forma logarítmica queda:

$$\ln\left(\frac{\mu}{\mu_r}\right) = \left(\frac{E_a}{R}\right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right) \quad \text{Ecuación (3.21).}$$

Para fluidos no newtonianos que sigan la ley de potencia la ecuación de Arrhenius también puede utilizarse para modelizar el cambio de la viscosidad aparente con la temperatura. A un gradiente de velocidad constante y suponiendo que la temperatura no afecta el índice de comportamiento al flujo tenemos:

Ingeniería Mecánica - 2025

$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_r}\right) = \left(\frac{Ea}{R}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right) \quad \text{Ecuación (3.22).}$$

A partir de esta ecuación puede encontrarse η a la temperatura T con valores de referencia adecuados.

La ecuación de Arrhenius puede ser modificada para ser utilizada directamente con fluidos no newtonianos, que no presenten tensión de fluencia, obteniendo resultados satisfactorios. Así la influencia que la temperatura ejerce sobre el índice de consistencia al flujo K de estos fluidos se expresa de la siguiente manera:

$$K = f(T) = K_T e^{\left(-\frac{Ea}{RT}\right)} \quad \text{Ecuación (3.23).}$$

donde K es el índice de consistencia al flujo y K_T una constante de proporcionalidad. Los términos K_T y Ea/R son utilizados en las ecuaciones presentadas en la Sección 3.4.7. donde se modeliza el efecto conjunto de la temperatura y el gradiente de velocidad sobre las propiedades de flujo [7,8].

3.4.6. Composición Química y Física.

Los componentes de cualquier producto afectan notablemente sus propiedades de flujo. Así, al comparar un fluido clarificado y despectinizado respecto al mismo producto con pulpa y pectinas en suspensión, puede observarse que, mientras el primero presenta habitualmente propiedades newtonianas, el segundo tendrá un comportamiento no newtoniano, generalmente pseudoplástico para la mayoría de los alimentos. También el tipo y tamaño de partículas influye considerablemente sobre la viscosidad de una determinada muestra. Por ejemplo, puede observarse que la energía de activación al flujo de muestras de puré de tomate es menor que para muestras de triturado del mismo producto, a pesar de poseer un contenido de sólidos solubles mucho mayor. Esto se debe a que el producto triturado posee semillas y partículas en suspensión de gran tamaño, mientras que en purés las semillas han sido eliminadas y el tamaño de partículas es pequeño.

Otro factor que influye sobre la viscosidad es la cantidad de sólidos solubles presentes en el alimento considerado. Si el contenido en sólidos solubles es mayor, la viscosidad aumenta. Según Ibarz Vitali, A. y col. (1992), la variación de la viscosidad con respecto al contenido en sólidos solubles puede describirse mediante ecuaciones del tipo potencial y exponencial, como se muestra a continuación:

Ingeniería Mecánica - 2025

$$\mu = K_1(C)^{A_1} \quad \text{[Función Potencial]} \quad \text{Ecuación (3.24).}$$

$$\mu = K_2(C)^{A_2} \quad \text{[Función Exponencial]} \quad \text{Ecuación (3.25).}$$

donde K_1 es una constante de proporcionalidad expresada en Pa.s.°Brix^{-A1}, A_1 es una constante de proporcionalidad adimensional, K_2 una constante de proporcionalidad expresada en Pa.s, A_2 una constante expresada en °Brix⁻¹, C la concentración de sólidos solubles expresada en °Brix y μ la viscosidad expresada en Pa.s.

3.4.7. Efectos Combinados.

También puede relacionarse en forma conjunta la temperatura con otros parámetros como el gradiente de velocidad, concentración o ambos. Así, de acuerdo a lo expresado por Harper y El Sahrigi, (1965) los efectos de la temperatura y el gradiente de velocidad se pueden combinar en una expresión simple:

$$\eta = f(T, \dot{\gamma}) = K_T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) (\dot{\gamma})^{\bar{n}-1} \quad \text{Ecuación (3.26).}$$

Donde \bar{n} es el índice de comportamiento al flujo medio basado en todo el rango de temperaturas trabajado. La ecuación (3.26) expresada en términos de tensiones de corte queda:

$$\sigma = f(T, \dot{\gamma}) = K_T \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) (\dot{\gamma})^{\bar{n}} \quad \text{Ecuación (3.27).}$$

Los términos K_T , E_a/R y n se determinan experimentalmente. Este modelo puede utilizarse cuando se necesita conocer o predecir los perfiles de velocidad de un fluido o la caída de presión durante el flujo en tubos.

Diversos autores como Vitali y Rao, (1984) o Castaldo y colaboradores, (1990) estudiaron el efecto conjunto de la temperatura y la concentración sobre la viscosidad aparente a un gradiente de velocidad constante que puede modelizarse con la siguiente ecuación.

$$\eta = f(T, C) = K_{T,C} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) (C)^B \quad \text{Ecuación (3.28).}$$

Ingeniería Mecánica - 2025

donde los términos K_T , C , E_a y B se determinan experimentalmente. Según Mackey (1989), la temperatura, el gradiente de velocidad y la concentración pueden combinarse en una ecuación simple:

$$\eta = f(T, \dot{\gamma}, C) = K_{\dot{\gamma}, T, c} (\dot{\gamma})^{\bar{n}-1} \exp \left[\left(\frac{E_a}{RT} \right) + B(C) \right] \quad \text{Ecuación (3.29).}$$

donde la influencia del gradiente de velocidad está dado en términos de la ley de potencia. Los parámetros $K_{\dot{\gamma}, T, c}$, E_a y B no pueden dar una interpretación física exacta, porque la secuencia de pasos utilizados en la resolución de cada uno de ellos influye en la magnitud de las constantes. Los parámetros de la ecuación pueden resolverse usando un análisis de regresión en el que se toma la condición de que determinados efectos pueden ser eliminados, por ejemplo la influencia de la temperatura sobre n y B .

El comportamiento reológico de los alimentos es complejo e influenciado por numerosos factores. La ecuación (3.29) permite predecir la viscosidad aparente basándose en la temperatura, gradiente de velocidad y contenido de sólidos. Existen otras ecuaciones matemáticas que además de los parámetros anteriores incluyen esfuerzos, temperaturas y tiempos de cizalla sufridos por el alimento antes de ser sometido a nuevos ensayos reológicos.

El siguiente modelo es el descrito por P. J. Fito y colaboradores (1983), para relacionar la viscosidad o la tensión de corte con la temperatura y la concentración.

$$\eta_a = A \cdot e^{\frac{E}{RT}} \cdot c^{a(c)} \cdot (\dot{\gamma})^{n(c)} \quad \text{Ecuación (3.30).}$$

$$\eta_a = A \cdot e^{\frac{E}{RT}} \cdot c^{a(c)} \cdot (\dot{\gamma})^{n(c)-1} \quad \text{Ecuación (3.31).}$$

donde σ es la tensión de corte expresada en N/m^2 , A es una constante, E es la energía de activación cuyas unidades son $MJ \text{ kg mol}^{-1}$, c es la concentración en $^\circ\text{Brix}$, α es una constante, T es la temperatura en $^\circ\text{C}$, $\dot{\gamma}$ es el gradiente de velocidad y η_a es la viscosidad aparente expresada en Nsm^{-2} .

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 El equipo

El analizador de textura TA-XT2i - Stable Micro System, 1996- utilizado en el presente trabajo para realizar el ensayo de retroextrusión se muestra en la Figura (4.1). Este instrumento está conectado a una computadora, un monitor y un teclado de control. El sistema funciona por medio del programa Texture Expert –Stable Micro. System, 1997- con ambiente Windows. El analizador de textura puede programarse para mantener un esfuerzo o una deformación constantes, o bien puede especificarse una velocidad de carga cruzada constante. Algunas de las pruebas que es posible llevar a cabo con el TA-XT2i son:

1. Prueba de relajamiento del esfuerzo.
2. Prueba de penetración.
3. Prueba de fluencia en caliente.
4. Prueba de doblado en tres puntos.
5. Ensayo de tensión.
6. Prueba de extensibilidad.



Figura 4.1. Analizador de textura TA-TX2i y panel de control.

Ingeniería Mecánica - 2025

La muestra se coloca en la plataforma destinada a ello; luego, el dispositivo medidor se baja para comprimir la muestra o se eleva para estirla, para lo cual la muestra debe estar fija por ambos extremos.

4.1.1. Base Portadora o Elemento de Prueba

Esta base es la parte mecánica del sistema. La misma cuenta con un porta elemento de prueba que se adapta a cada uno de los test que se quiere realizar, por ejemplo: medición de textura, tensión, retroextrusión, entre otros. Para ello se dispone de una gama de accesorios como soportes y sondas de diferentes dimensiones y formas.

Cuenta además con dos anillos de seguridad, que definen el recorrido del brazo móvil. También posee un botón de seguridad que detiene completamente el funcionamiento del equipo y debe usarse en caso de emergencias.

4.1.2. Consola o Panel de Control

La consola permite operar la parte mecánica del sistema utilizando una serie de teclas que además pueden usarse para programar ciertas funciones tales como velocidad de trabajo, distancia a recorrer, etc. La misma consta de tres pantallas en la parte superior y cuatro listas iluminadas con luces dispuestas verticalmente, un teclado numérico y distintos botones de selección. En el Apéndice A se muestra una foto de dicho dispositivo y se describen las teclas de uso más frecuente.

Desde la consola sólo se puede manejar el equipo y visualizar los valores programados, pero los resultados de la prueba no se visualizan. Posee una llave de seguridad que protege de posibles cambios de configuración y parámetros no autorizados. Las posiciones para dicha llave son:

- Machine configuration, Modo configuración de máquina. Permite realizar las calibraciones necesarias para un ensayo, establecer especificaciones generales tales como la celda de carga usada, configurar una impresora y adicionar parámetros como velocidad de pre- y post-ensayo, etc.
- Test Set Up: Establecer un ensayo. Se utiliza para determinar el tipo de ensayo, ya sea medición de fuerza o de distancia, y la forma de ejecutarlo: compresión o tensión. También sirve para fijar parámetros específicos de ensayo tales como velocidad de ensayo, distancia a recorrer por la sonda, etc.
- Run: Corrida. Sólo se utilizan las teclas negras. Las pantallas muestran únicamente los resultados de los ensayos.

Es importante destacar que para la operación manual del Analizador de Textura se deben configurar los parámetros de ensayo de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

Ingeniería Mecánica - 2025

Sin embargo, dado que también se dispone del programa Texture Expert para operar el equipo, la posición de la llave debe permanecer en el modo Run para poder transferir los parámetros desde dicho programa.

4.1.3. Dispositivos de Ensayo

El texturómetro cuenta con una serie de accesorios, entre los que podemos encontrar sondas de distintas formas y dimensiones al igual que diferentes tipos de celdas que se seleccionan de acuerdo al tipo de ensayo a realizar. En el Apéndice B se muestra una lista de los accesorios disponibles para el equipamiento utilizado. Cabe mencionar que la sonda PC que aparece en dicha lista, junto con su contenedor de acero inoxidable, se fabricaron especialmente para la técnica de retroextrusión por flujo anular que se utilizó en este trabajo. Esta sonda es una modificación de la sonda P1, la cual se usó en la primera parte del trabajo “Determinaciones reológicas de pulpas de durazno por retroextrusión”.

La sonda PC es un cilindro de acero inoxidable calefaccionado internamente por una resistencia eléctrica. La temperatura final de la sonda se controla por un sensor y un controlador de temperatura universal. Esta modificación con respecto a la sonda original P1, fue necesaria para mantener la temperatura constante y así lograr disminuir los errores experimentales que inciden directamente en los valores de índice de consistencia, siendo mayor el efecto de los mismos a altas concentraciones de las muestras y elevadas temperaturas de ensayo. El uso del sistema de calefacción de la sonda y el calentamiento previo de las pulpas permite reducir la falta de homogeneidad térmica en la muestra, evitando de esta manera los diferentes grados de adhesión de la pulpa a las paredes del cilindro contenedor.

Como se mencionó anteriormente, se construyó además el recipiente contenedor de muestra, el cual es un cilindro de acero inoxidable cuya base se fija mediante tornillos a la plataforma del analizador de textura. Dada la importancia que tiene la posición de la sonda con respecto al contenedor para producir un correcto flujo anular, también se fabricó un nuevo posicionador de PVC de acuerdo a las dimensiones de ambos dispositivos. Las respectivas dimensiones de la sonda y del contenedor se exponen en la Tabla 4.1.

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

Tabla 4.1. Dimensiones de la sonda PC y del contenedor de acero.

	Diámetro [m]	Longitud [m]
Sonda	0,0257	0,145
Contenedor de Acero	0,038	0,168

En la Figura (4.2) se muestra la sonda modificada, el cilindro contenedor y su base de fijación.



Figura 4.2. Sonda PC y Contenedor de muestra utilizado en el ensayo de retroextrusión.

4.1.4. Baño Termostático y Termómetro Digital

El baño consiste en un pulmón de agua con doble camisa a modo de aislamiento, en la que se encuentra inmersa una resistencia eléctrica, la que calefacciona y mantiene al

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

agua a la temperatura deseada, mediante un termostato que controla el encendido y apagado de dicha resistencia eléctrica. Este dispositivo se utilizó para acondicionar las muestras a las diferentes temperaturas de trabajo.

En la Figura (4.3) se muestra el baño termostático O.R.L. Modelo Balus utilizado para acondicionar la temperatura de la muestra.



Figura 4.3. Baño Termostático.

4.1.5. Adquisición de Datos

Los datos recolectados con el Analizador de textura fueron registrados por una PC mediante el programa Texture Expert, especialmente fabricado por la empresa Stable Micro System. El Texture Expert funciona bajo sistema operativo Windows 3.11 o superior. Usa un sistema de almacenamiento digital cuyos datos de distancia y fuerza medios son determinados y almacenados en intervalos discretos de tiempo. Este software permite programar las condiciones de trabajo y especificar, entre otros parámetros, la sonda que se utilizará en el ensayo. Además se puede usar el Texture Expert para: obtener datos en tiempo real, ver gráficamente los datos obtenidos, presentar los datos en forma numérica y gráfica, guardar los datos en el disco para analizarlos posteriormente, realizar cálculos con las mediciones y transferir los datos a otro programa. Este programa provee un visor gráfico en tiempo real del progreso del

Ingeniería Mecánica - 2025

experimento que se exhibe en la Figura (4.4). Igualmente, puede abrir copias de datos guardados en el disco y analizarlos de diferentes maneras. Se proveen las herramientas para hacer mediciones, tales como distancia, radios de fuerza, áreas, gradientes y punto medio entre dos puntos así como también valores de posición.

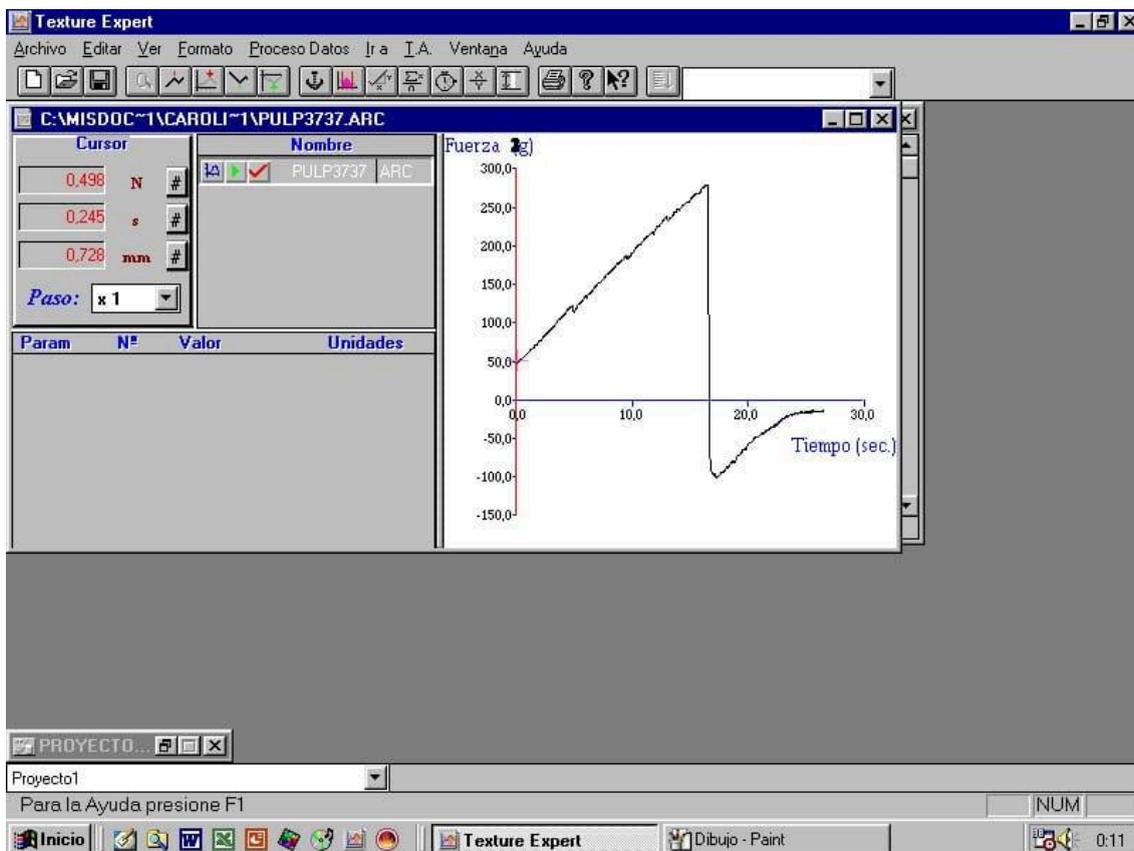


Figura 4.4. Visor del programa.

4.1.6. Calibración del Analizador de Textura

Este procedimiento debe realizarse antes de ejecutar un ensayo. Existen dos tipos de calibración para el texturómetro: calibración de la celda de carga o de fuerza y calibración de la altura o posición de la sonda. La primera es importante porque de esta forma el texturómetro puede conocer y determinar la relación fuerza-resistencia impartida en el ensayo y para que el programa determine los factores de conversión necesarios que permiten la medición de la fuerza en unidades adecuadas. La calibración se efectúa luego de la instalación de la celda de carga y solo debe repetirse si el equipo

Ingeniería Mecánica - 2025

ha sufrido algún movimiento brusco, cambio de posición o cada vez que se cambie la sonda.

La segunda calibración se requiere cuando se desea registrar información de deformación ya que el Analizador de Textura puede medir la altura o el largo de la muestra y transmitir esta información al Texture Expert. Se debe realizar cada vez que se cambia la sonda, accesorios y adaptadores o si se detiene el ensayo por cualquier causa.

Tanto la calibración de la sonda como la calibración de la fuerza se realizan a través del programa Texture Expert como se detalla en el Apéndice C.

4.2. Secuencia operativa del ensayo de retroextrusión

En esta sección se detalla la serie de etapas realizadas en el manejo de las muestras, previo a la medición propiamente dicha, y conjuntamente, el funcionamiento del programa Texture Expert. En el Anexo I se dan más detalles acerca de la selección de los parámetros requeridos para realizar el ensayo.

- a) Llenar el contenedor de muestra, con ayuda de una jeringa modificada, evitando la inclusión de aire en el producto, especialmente en las pulpas más concentradas. El volumen de pulpa introducido para cada ensayo es de 83 ml. Éste es el volumen mínimo requerido para las condiciones de trabajo establecidas a fin de disminuir los efectos de fondo y asegurar la distancia que puede penetrar la sonda PC sin que se detenga el ensayo a causa de la forma de la misma.
- b) Conectar el dispositivo con la muestra en su interior en el baño termostático para llevar la muestra a la temperatura de ensayo y esperar unos minutos para minimizar los gradientes térmicos. Simultáneamente, seleccionar la temperatura deseada en el controlador de temperatura por arduino y posterior activación la calefacción de la sonda PC.
- c) Realizar la calibración de fuerza con el Texture Expert utilizando la carga patrón correspondiente a la celda de carga de 5 kg.
- d) Fijar el contenedor a la plataforma del Analizador de Textura en forma concéntrica con la sonda usando para ello el posicionador.
- e) Configurar las condiciones de ensayo desde el comando del menú “T.A. Parámetros del Analizador de Textura”.
- f) Realizar la calibración de la posición de la sonda con el Texture Expert.

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

- g) Ejecutar el ensayo desde el comando del menú “T.A. Ejecutar Ensayo” seleccionando la sonda utilizada y la velocidad de adquisición de datos, PPS.
- h) Finalizado el ensayo se procede al análisis de los datos. Se debe hacer el anclaje del gráfico en un intervalo que contenga el pico de fuerza máxima. Luego desde el comando del menú “Proceso de datos” seleccionar “Fuerza máxima” y la distancia recorrida para dicha fuerza.
- i) Exportar los resultados a una lista y guardarlos para utilizarlos posteriormente en los cálculos matemáticos.

Debido a que el modelo matemático empleado para obtener los parámetros reológicos requiere por lo menos dos valores de fuerza máxima obtenidos a diferentes velocidades, los ensayos se realizaron en las siguientes condiciones: 1, 3 y 5 mm/s. Estos valores se eligieron arbitrariamente teniendo en cuenta que el intervalo entre velocidades debe tener una amplitud tal que evidencie un aumento de la fuerza máxima obtenida al aumentar la velocidad de ensayo para una misma concentración y temperatura de la muestra. Por otro lado, es importante destacar que las velocidades de pre-y post-ensayo al igual que la distancia de penetración de la sonda se mantuvieron constantes en todas las determinaciones.

En la Figura (4.5) se exhibe un documento gráfico obtenido con el Texture Expert luego de realizar un ensayo y en el cual se han establecido los anclajes necesarios para obtener los valores de fuerza máxima y de distancia recorrida para dicha fuerza. Estos valores aparecen en la lista de datos presentada a la izquierda del gráfico.

Ingeniería Mecánica - 2025

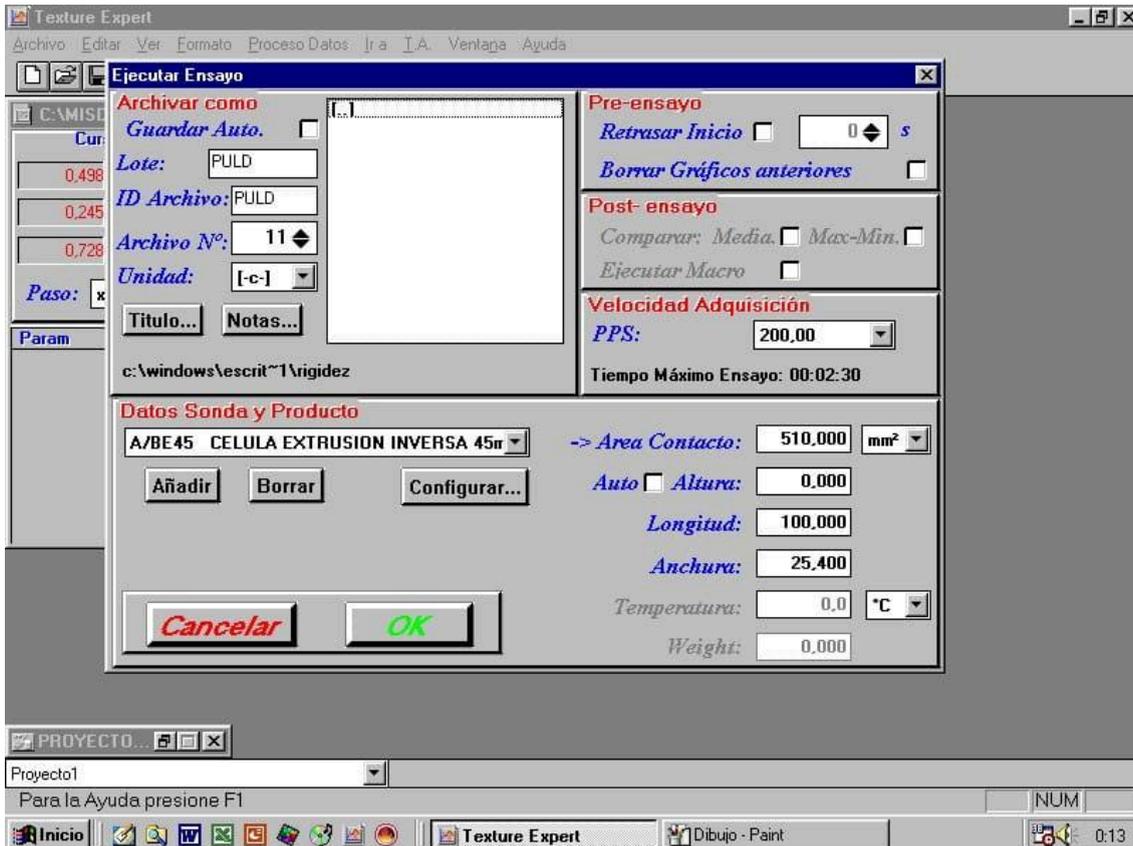


Figura 4.5. Visor del programa.

4.3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO

Su función principal es mantener uniforme y controlar la temperatura de todo el dispositivo durante la duración del ensayo utilizando un sistema de control y adquisición de datos. El principio de funcionamiento se basa en la conducción de calor a través de diferentes fluidos tanto por conducción como por convección. El objetivo en concreto es poder determinar las propiedades reológicas del fluido a ensayar (pulpas, semilíquidos, semisólidos, etc.) manteniendo controlada la temperatura.

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

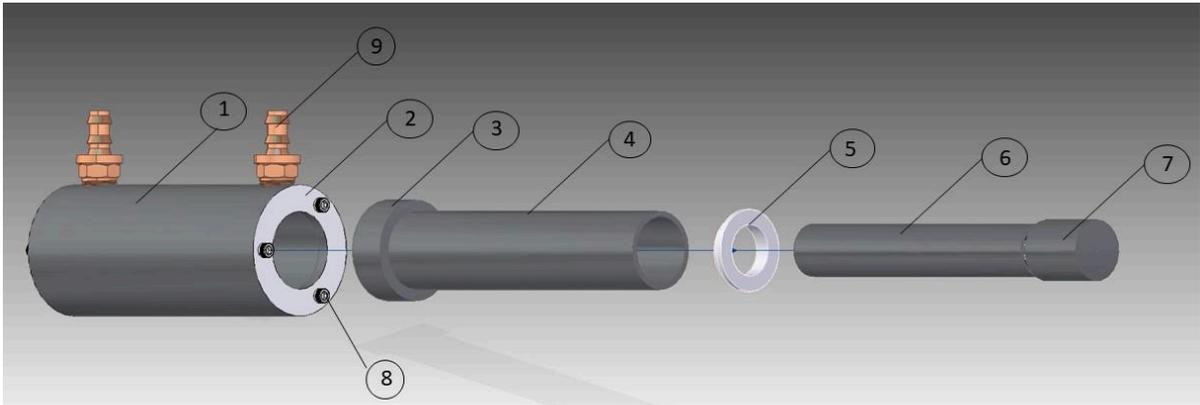


Figura 4.6. Descripción del modelo tridimensional del dispositivo completo, en vista explotada.

Tabla 4.2. Descripción de los componentes generales utilizados en el dispositivo, con sus dimensiones y materiales de fabricación.

N °	PARTE	DIMENSIONES	MATERIAL
1	CAMISA	Longitud: 154,5 mm Radio: Re=64 mm , Ri= 44 mm	Nylon 66
2	SELLO CAMISA/TUBO	Longitud: 6 mm Radio: Re= 44 mm , Ri= 38 mm	Nylon 66
3	TAPA TUBO	Longitud Total: 19 mm Radio: Re= 39 mm , Ri= 38 mm Longitud Interior: 17 mm	Acero Inoxidable
4	TUBO	Longitud: 168 mm Radio: Re= 38mm , Ri= 33.4 mm	Acero Inoxidable
5	SELLO TUBO/SONDA	Longitud 1: 3 mm Radio 1: Re=40 mm , Ri=25.4 mm Longitud 2: 5 mm Radio 2: Re=33.4 mm , Ri=25.4 mm	Nylon 66

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

6	SONDA	Longitud Total: 172 mm Longitud Interior: 169 mm Longitud Rosca: 15 mm Radio: Re=25.4 mm , Ri=19.4 mm	Acero Inoxidable
7	TAPA SONDA	Longitud Total: 35 mm Radio: Re=29.5 mm , Ri=24 mm Longitud Interior: 30 mm	Acero Inoxidable
8	TORNILLOS		Acero al Carbono
9	CONECTOR RACORD		Bronce

Tubo, su función es contener el fluido a analizar. Dentro del mismo alberga la pieza “Tubo Sonda”, donde la diferencia de volumen entre ambos será el volumen a llenar con el fluido que se quiere analizar.

Camisa, su función es mantener la temperatura exterior del “Tubo” a una temperatura uniforme y constante durante el periodo de prueba. Esta pieza funciona similar a un intercambiador de calor, donde a través de un baño termostático y una bomba exterior se hace circular agua por la pieza propiamente dicha. El objetivo de este mecanismo es que a través de transferencia de calor se mantenga a una temperatura dada la superficie exterior de la pulpa.

Sonda, esta parte del dispositivo contendrá dentro de ella aceite hidráulico, el cual a través de una resistencia será calentado hasta una temperatura específica y será controlada a través de un sensor de temperatura RTD: PT100. La función de esta parte del dispositivo es mantener la temperatura interna del fluido a analizar a una temperatura uniforme y constante sobre la base inferior de la pulpa.

Ingeniería Mecánica - 2025

5. SISTEMA DE CONTROL Y MEDICIÓN DE TEMPERATURA.

5.1. Dispositivo de medición.

Este componente es uno de los encargados del control de la temperatura junto con la camisa, y presenta un desafío considerable en nuestro análisis, dado que su eficacia se basa en un control preciso de la temperatura del aceite alojado en el tubo sonda. Este proceso, en conjunto con el uso de la camisa, tiene como objetivo mantener la pulpa a una temperatura uniforme y constante, lo que nos permite llevar a cabo posteriormente análisis de viscosidad y densidad del fluido mencionado anteriormente.

Se presenta un sistema de control diseñado para controlar la temperatura exterior de la sonda, utilizando un puente de Wheatstone en conjunto con un sensor de resistencia RTD de platino (PT100), también, un amplificador operacional funcionando como un restador (LM358). El valor de las resistencias necesarias para utilizar con el amplificador será especificado en función de las necesidades del sistema de adquisición de datos.

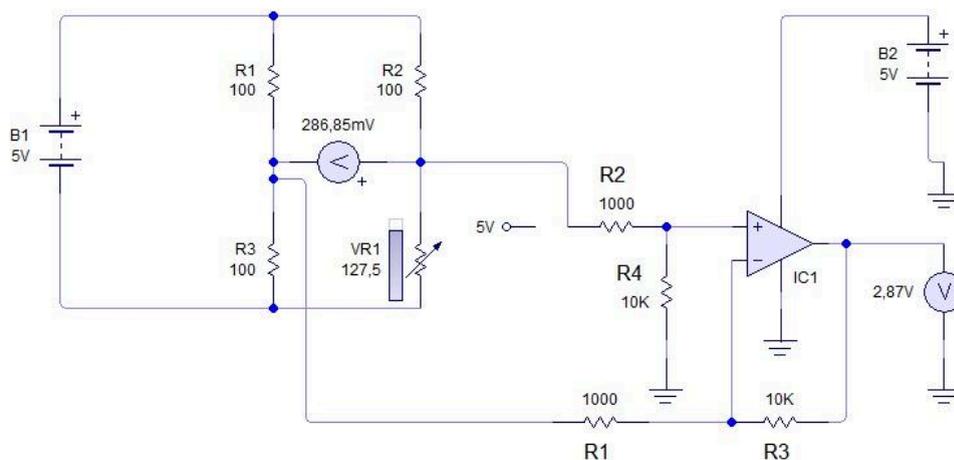


Figura 5.1. Descripción del circuito utilizado para la medición de temperatura utilizado en la sonda.

El sensor de resistencia de platino (PT100) se sitúa estratégicamente en el tubo para medir la temperatura en tiempo real. El sensor aprovecha la variación de la resistencia de un alambre de platino para realizar esta medición. Para medir la resistencia del PT100, se utiliza un puente de Wheatstone, un circuito eléctrico diseñado para detectar pequeñas variaciones en la resistencia. Este puente de Wheatstone convierte la

Ingeniería Mecánica - 2025

resistencia del PT100 en una señal eléctrica, en forma de diferencia de potencial, proporcional a la temperatura.

Para mejorar la precisión y sensibilidad de esta señal, se emplea un amplificador operacional (LM358) que amplifica la salida del puente de Wheatstone. Finalmente, el microcontrolador Arduino recibe la señal amplificada, la procesa y controla el sistema de calefacción del tubo, asegurando que la temperatura se mantenga dentro de los límites deseados.

5.2. Dispositivo de control.

El dispositivo de control se basa en el encendido programado y controlado de una resistencia calefactora, con el objetivo de mantener en un rango de temperaturas específico para cada ensayo a la sonda al momento de realizar el mismo.

Se integra una serie de condiciones y calibraciones de control que se podrán observar en el código controlador del Arduino UNO, “ANEXO N° 12.2: Código de Arduino”. El código se subdivide en una serie de funciones que se identifican con una variable de estado, la cual se va modificando al accionar los botones de control del sistema. El estado o la sección que se encuentra seleccionada se observa en una pantalla LCD y las modificaciones de los Setpoints se observan en pantalla para poder seleccionar los valores deseados correctamente.

A la hora de encender o no la resistencia calefactora, y sin entrar en detalles extensos, para distintas mediciones de temperatura se proporcionan distintos tiempos de activación para la resistencia calefactora en función de diferentes situaciones. Con el fin de mantener lo más constante posible los valores de temperatura total de la sonda.

5.2.1. Sistema de Adquisición de Datos

Para el sistema de control propuesto, se ha desarrollado un prototipo de adquisición de datos utilizando los siguientes componentes:

- Arduino Uno
- Protoboard
- Juego de LEDs
- Botones
- Potenciómetro
- Pantalla LCD 20x4
- Relé

Ingeniería Mecánica - 2025

- Ojo de Buey
- Sensor PT100
- Resistencia

Este sistema de adquisición de datos tiene como objetivo controlar la temperatura del sistema, manteniéndola dentro de un rango establecido, entre un valor mínimo (SPL, Set Point Low) y un valor máximo (SPH, Set Point High). El sensor PT100, que es un detector de temperatura hecho de platino y cuya resistencia es de 100 Ohm a 0°C, se encargará de medir la temperatura en tiempo real.

Los elementos mencionados han sido dispuestos en un circuito electrónico montado sobre una protoboard, lo que permite construir el sistema de adquisición de datos y ejecutar el control de temperatura de manera eficiente.

5.3. Funcionamiento

El principio de funcionamiento de nuestro sistema se basa en los siguientes pasos:

1. Alimentar el Arduino Uno con energía eléctrica.
2. Cargar un programa preconfigurado con los parámetros específicos para el ensayo en el Arduino Uno.

El sistema utiliza dos juegos de LEDs: uno para indicar el modo de operación del dispositivo y otro para mostrar el estado de la resistencia.

En cuanto a los modos de operación, tenemos tres LEDs de diferentes colores que indican el estado del dispositivo:

- **Listo para Configurar** (LED amarillo)
- **Modo Edición** (LED azul)
- **Modo Ejecución** (LED verde)

Inicialmente, el sistema se encuentra en el **Modo Listo para Configurar**, por lo que el LED amarillo está encendido. A través de un conjunto de botones, es posible cambiar el modo de operación. Al presionar el botón de edición, en la pantalla LCD aparecerán programas precargados con distintas configuraciones de ensayo (a diferentes temperaturas) o la opción de configurar un nuevo sistema de forma manual.

Ingeniería Mecánica - 2025



Figura 5.2. Pantalla principal al alimentar con tensión el arduino.

Para seleccionar una de las opciones se debe presionar nuevamente el botón de **Edición**. Al seleccionar un programa precargado, saldrá del modo edición volviendo al modo **Listo para Configurar** y en el LCD se mostrarán los parámetros seteados en nuestro programa. En el caso de seleccionar la opción **Configurar Sistema Libre** el programa nos pedirá el ingreso de los siguientes datos:

- SPL (Set Point Low) [°C].
- SPH (Set Point High) [°C].
- Duración de Ensayo [minutos].



A)



B)

Ingeniería Mecánica - 2025



C)

Figura 5.3. A) Edición de Tiempo de duración de Ensayo, B) Edición de SPH y C) Edición de SPL.

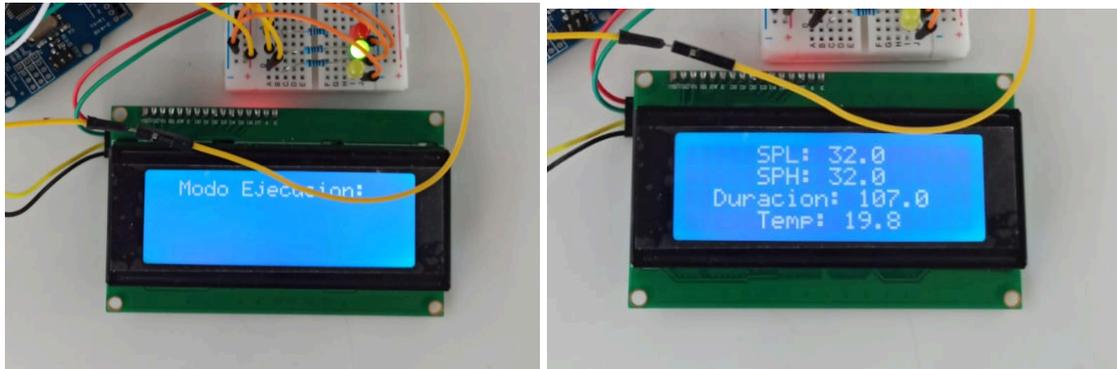
Para modificar el valor del parámetro a modificar se utiliza un potenciómetro. Inicialmente se modifica el valor de SPL, y una vez ubicado el valor deseado se vuelve a presionar el botón **Edición** para fijar el valor del parámetro. A continuación, se debe repetir el procedimiento para modificar los parámetros de SPH y Duración del Ensayo. Al finalizar, se cambiará nuevamente al modo **Dispositivo Configurado**.



Figura 5.4. Lectura del dispositivo una vez ya configurado.

A través del botón **Inicio/Parada** damos inicio al funcionamiento de nuestro sistema. En la pantalla se observará **Modo Ejecución** seguido de los valores de parámetros de ensayo y la temperatura sensada en tiempo real.

Ingeniería Mecánica - 2025



A)

B)

Figura 5.5. A) Modo de ejecución y B) Lectura del dispositivo en ejecución.

El otro juego de led nos indica el estado de funcionamiento de la resistencia de calefacción del dispositivo interior. El sistema responde a las variaciones de temperatura de la siguiente manera:

- **Temperatura por debajo de SPL:** Si la temperatura desciende por debajo del Set Point Low (SPL), se encenderá un LED de color amarillo, indicando que la temperatura está por debajo del valor mínimo establecido. En este caso, se activará el relé, alimentando con tensión a la resistencia de calefacción para aumentar la temperatura del sistema.
- **Temperatura entre SPL y SPH:** Cuando la temperatura se encuentra dentro del rango establecido, es decir, entre SPL y SPH, se encenderá un LED de color verde. Este indicador confirma que la temperatura está dentro de los parámetros aceptables, pero no produce ninguna acción sobre la resistencia de calefacción.
- **Temperatura por encima de SPH:** Si la temperatura supera el Set Point High (SPH), se encenderá un LED de color rojo. En este punto, el relé dejará de suministrar tensión a la resistencia de calefacción, deteniendo el aumento de temperatura.

Como puntapié inicial partimos de un diseño que permita el fácil acceso y la visualización de los datos de entrada y salida necesarios para verificar que el control de temperaturas funciona correctamente.

Iniciamos con el diseño general el cual se piensa mostrando en primera plana la pantalla LCD y los botones de cambio de estados y el potenciómetro, así como también los LEDs indicadores mencionados anteriormente en esta misma sección. Luego acoplamos un módulo el cual contiene el transformador y el relé, estos dos módulos se conectan de

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

forma sencilla y pudiendo formar un cuerpo completo entre ambos para facilitar el traslado.



Figura 5.5. Dispositivo de Control de Temperatura

Ingeniería Mecánica - 2025

5.4. Calibración

Inicialmente, para llevar a cabo la calibración del sistema de medición de temperatura, se empleó un baño termostatzado, que proporciona un control preciso de la temperatura a lo largo de un rango específico. Este baño fue complementado con un termómetro de mercurio de alta precisión, cuyo objetivo fue actuar como referencia confiable durante todo el proceso de calibración. La medición de las temperaturas a distintas condiciones fue esencial, ya que permite verificar la exactitud del sensor en comparación con un dispositivo de alta precisión. Además, se utilizó un multímetro digital para medir con exactitud los valores de voltaje generados por el sensor a medida que se incrementó la temperatura. La combinación de estos dos equipos permitió obtener mediciones robustas y fiables.

Como parte del procedimiento de calibración, se registraron, de forma sistemática, tanto los valores de voltaje como las señales de entrada del sensor conectado al Arduino. En cada ajuste de temperatura, el sensor debía generar una señal de voltaje, la cual, se relaciona de forma directa a la variación de temperatura. A medida que la temperatura en el baño termostatzado aumentaba o disminuía en incrementos controlados, se tomaron mediciones en varios puntos, con el fin de registrar cómo respondía el sensor a estos cambios térmicos. Los valores de voltaje se registraron junto con las temperaturas correspondientes proporcionadas por el termómetro de mercurio.

Estos datos fueron organizados en una tabla de calibración, que sirvió como base para la posterior regresión lineal. A través de este primer análisis, se intentó ajustar el comportamiento del sensor y corregir posibles desviaciones. A continuación, se muestran algunos de los datos obtenidos durante este proceso de calibración inicial:

Ingeniería Mecánica - 2025

Tabla 5.1. Mediciones de Voltaje y valor de Señal a Temperatura específica.

TEMPERATURA [°C]	VOLTAJE [V]	VALOR DE A1
26	2,513	340
31	2.521	360
33	2.531	379
35	2.543	403
40,5	2.560	440
43	2.564	460
45,5	2,579	478
49,75	2,596	512
54	2,602	548
58	2.614	571
58,5	2,615	580
60	2,616	592
64,75	2,639	628

A partir de los datos obtenidos durante el proceso de calibración, se realizó un ajuste por regresión lineal para evaluar la relación entre el voltaje generado por el sensor y la temperatura medida. Esta regresión permitió determinar la ecuación que describe el comportamiento del sensor en función de los cambios de temperatura, lo que es esencial para obtener una precisión adecuada en el control del sistema. En la figura a continuación, se muestra el resultado de la regresión lineal, donde se observa una correlación directa entre el voltaje registrado y la temperatura.

Ingeniería Mecánica - 2025

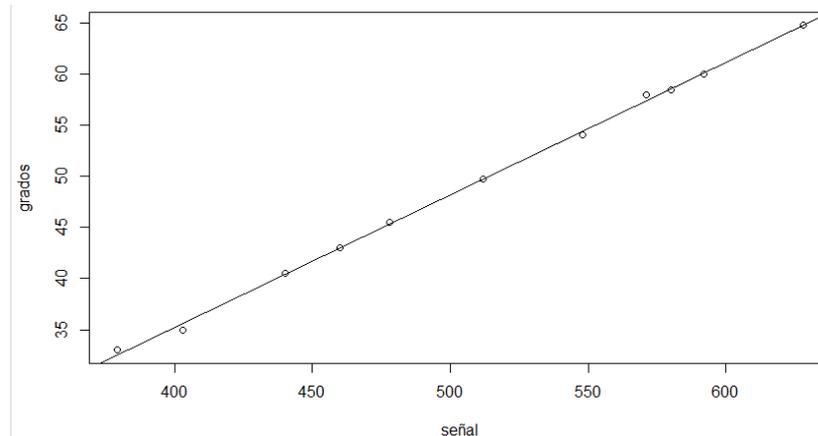


Figura 5.7. Regresión Lineal del Sensor 1

Una vez calibrado el primer sensor, se procede a repetir el proceso utilizando un segundo sensor, el cual será responsable de medir la diferencia de temperatura entre el interior del aceite, cuya temperatura ya está siendo medida por el primer sensor, y la temperatura en el exterior del cilindro, la cual se obtiene a partir de las lecturas de los sensores 2 y 3. Para llevar a cabo este ensayo, se activa la resistencia situada dentro del aceite, lo que permite generar una variación térmica controlada. Durante este proceso, en intervalos regulares de tiempo, se registran las temperaturas en los dos puntos de medición, asegurando que ambas mediciones, tanto la interna como la externa, se tomen con precisión. El procedimiento se repite en diferentes ubicaciones a lo largo del tubo externo para evaluar las variaciones térmicas a lo largo de su extensión. Esta serie de mediciones es fundamental para desarrollar una función matemática que describa adecuadamente la relación entre las temperaturas de ambos puntos y permita ajustar con exactitud los valores de los Set Points (SPL y SPH). Con base en estas mediciones, se busca garantizar que la diferencia de temperatura no se desvíe más de 1°C tanto por encima (SPH) como por debajo (SPL) de la temperatura objetivo establecida para el ensayo.

Este procedimiento permite, mediante un análisis detallado de las variaciones térmicas en distintos puntos del sistema, ajustar con precisión los parámetros necesarios para controlar de manera eficiente el rango de temperaturas durante el funcionamiento del dispositivo. La calibración detallada de los valores SPL y SPH asegura que el sistema mantenga una regulación precisa de la temperatura durante su operación, mejorando la confiabilidad del proceso de medición y control.

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

A continuación, se procesan las mediciones obtenidas de cada sensor utilizando el software "RStudio", donde se lleva a cabo un análisis mediante regresión lineal. Este análisis tiene como objetivo generar una curva que ajuste los datos de manera precisa, permitiendo optimizar el control de temperatura del sistema y mejorando su precisión y rendimiento en función de las mediciones registradas.

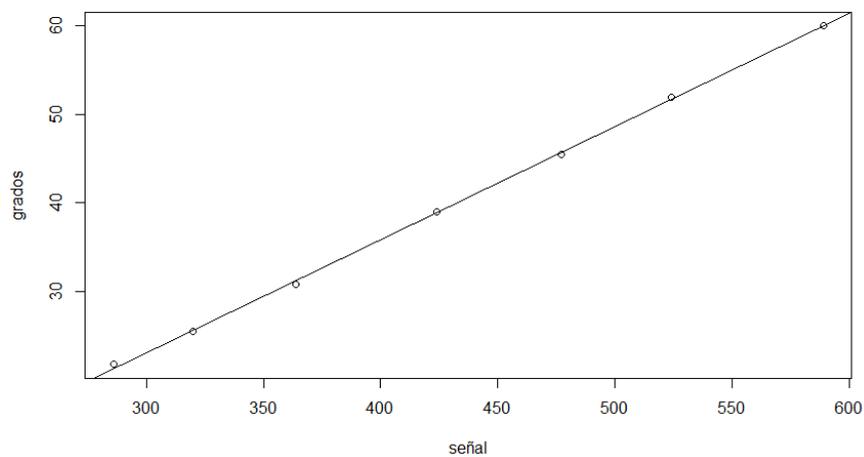


Figura 5.8. Regresión Lineal Final

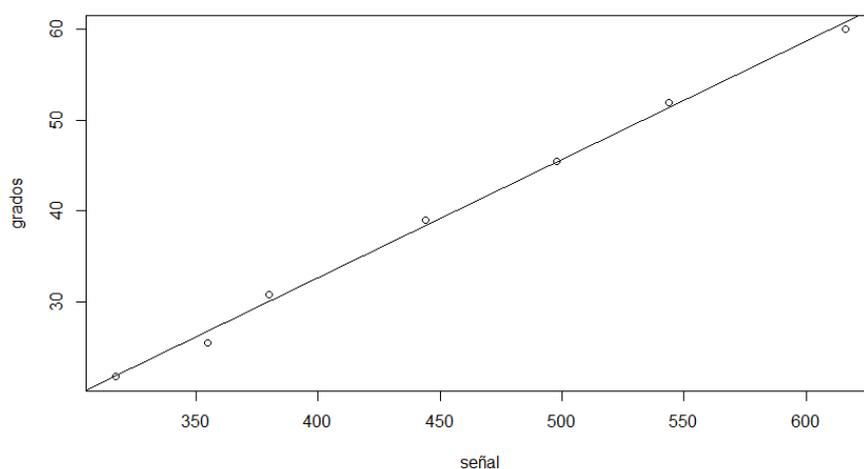


Figura 5.9. Regresión Lineal Final

Ingeniería Mecánica - 2025

Después de realizar varias calibraciones y considerando que el dispositivo ya estaba operativo, comenzamos a medir un ciclo completo de trabajo y comparamos los resultados con los de nuestro termómetro de mercurio de alta precisión. Sin embargo, se detectó una discrepancia entre las mediciones de temperatura del termómetro y los valores registrados por los sensores calibrados.

Esto se puede explicar porque, inicialmente, el sensor se colocaba directamente sobre el baño termostático para realizar las mediciones de temperatura. Sin embargo, al observar variaciones en las lecturas, se decidió modificar el procedimiento. En lugar de colocar el sensor directamente sobre el baño, comenzamos a medir la sonda completa, sumergiendo el sensor dentro de la sonda y llenándola con aceite hidráulico (10W40). Esta modificación permitió obtener mediciones más precisas y coherentes con el comportamiento esperado del sistema.

Así mismo, para mejorar la precisión de las mediciones, se adoptó un enfoque basado en el promedio de 120 mediciones, tomadas cada segundo, en lugar de realizar mediciones instantáneas. Este método permitió reducir las fluctuaciones y obtener un valor más representativo del comportamiento del sensor. Además, se incorporó un periodo de espera de 10 minutos antes de comenzar a registrar los datos, lo cual permitió estabilizar las temperaturas y equilibrar la sonda, asegurando así que las mediciones fueran consistentes y precisas durante todo el proceso de calibración.

Con el método de calibración descrito, se repitió el proceso en diversas condiciones ambientales, variando las temperaturas del laboratorio, que oscilaron entre los 20 y 27°C. Este procedimiento se llevó a cabo en diferentes días para asegurar que las mediciones fueran consistentes bajo distintas condiciones ambientales, lo que ayuda a validar la precisión del sensor en diversos escenarios.

Una vez obtenida una serie de mediciones repetitivas y consistentes, se procedió a realizar una regresión lineal final con todos los datos recopilados. Esta regresión permitió ajustar los resultados y confirmar que el sensor se comporta de manera adecuada y precisa dentro del rango de temperaturas requerido para el proceso de medición. Gracias a este análisis, se pudo garantizar que el sensor cumpliría con los estándares de exactitud necesarios para el control de temperatura en las condiciones de operación previstas.

Ingeniería Mecánica - 2025

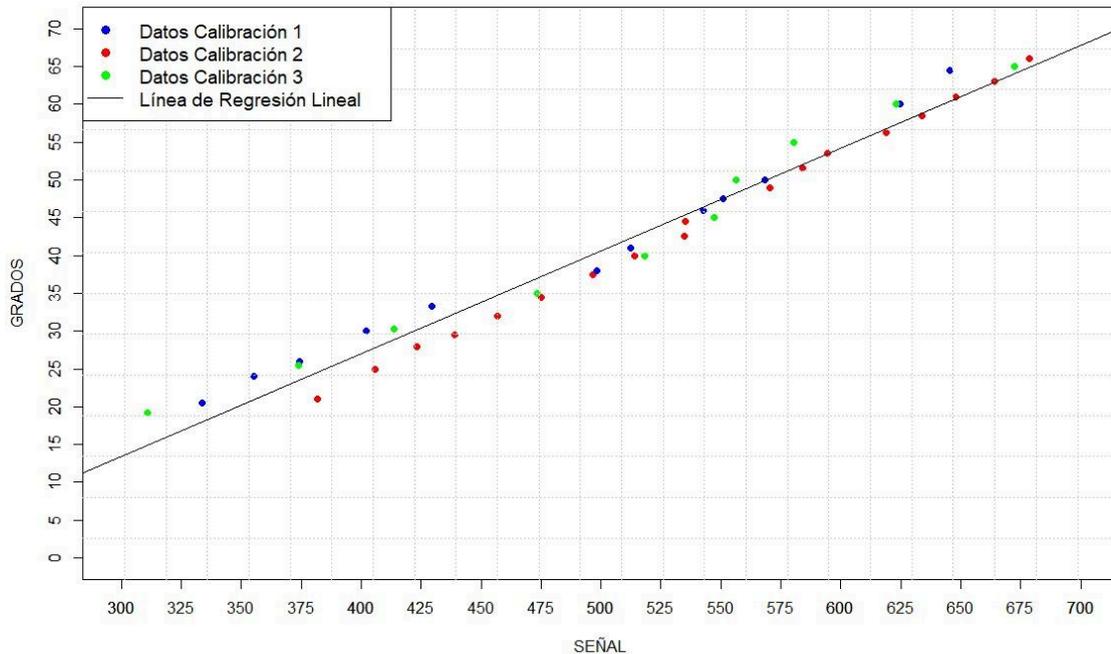


Figura 5.10. Regresión Lineal Final

El proceso de calibración realizado ha logrado optimizar el rendimiento del sistema de medición de temperatura, garantizando que el sensor funcione de manera precisa y fiable dentro del rango requerido. Mediante el uso de un baño termostático y un termómetro de mercurio de alta precisión como referencia, se minimizó la variabilidad de las mediciones. Además, al emplear un enfoque de medición promediada y un periodo de espera para equilibrar las temperaturas, se lograron resultados consistentes y estables. Las calibraciones se realizaron en diferentes condiciones ambientales, lo que permitió validar la precisión del sensor en diversas situaciones. Finalmente, las regresiones lineales realizadas a lo largo del proceso confirmaron que el sensor se comporta correctamente y que el sistema de medición es adecuado para su uso en aplicaciones industriales, cumpliendo con los estándares de exactitud necesarios para el control de temperatura.

Ingeniería Mecánica - 2025

5.5. Medición en tiempo real

Para monitorear y registrar en tiempo real las mediciones de temperatura obtenidas desde el sensor conectado al Arduino, utilizaremos el software PuTTY. Este proceso permitirá capturar los datos en un archivo de texto, facilitando posteriormente su análisis y representación gráfica.

Pasos para la Captura de Datos en Tiempo Real con PuTTY

1. Conectar el Arduino a la computadora:
 - Usar un cable USB para conectar el Arduino a un puerto disponible en la PC.
 - Asegurarse de que el Arduino esté encendido y correctamente reconocido por el sistema.
2. Identificar el puerto COM asignado:
 - En Windows, abrir el Administrador de dispositivos (Win + X > Administrador de dispositivos).
 - Buscar en Puertos (COM & LPT) el puerto COM asignado al Arduino (Ejemplo: COM3, COM4).

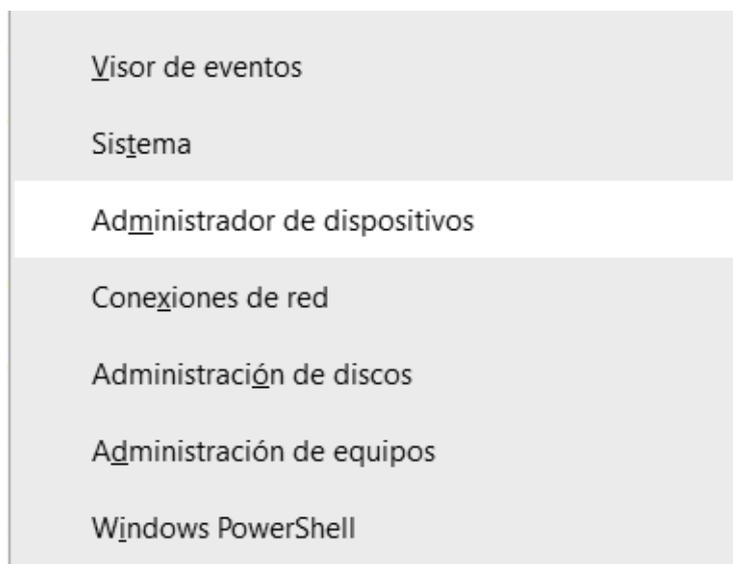


Figura 5.11. Menú de acceso rápido en Windows, mostrando opciones avanzadas del sistema, incluyendo el Administrador de dispositivos, útil para identificar el puerto COM al que está conectado un Arduino.

Ingeniería Mecánica - 2025

3. Configurar PuTTY para comunicación serial:

- Abrir PuTTY.
- En la sección "Session", seleccionar la opción "Serial".
- En el campo "Serial Line", ingresar el número del puerto identificado previamente (COM3, COM4, etc.).
- En "Speed (baud rate)", establecer 9600 baudios (o el que corresponda al código del Arduino).
- Ir a la pestaña "Connection > Serial" y verificar los siguientes parámetros:
 - Baud rate: 9600
 - Data bits: 8
 - Parity: None
 - Stop bits: 1
 - Flow control: None

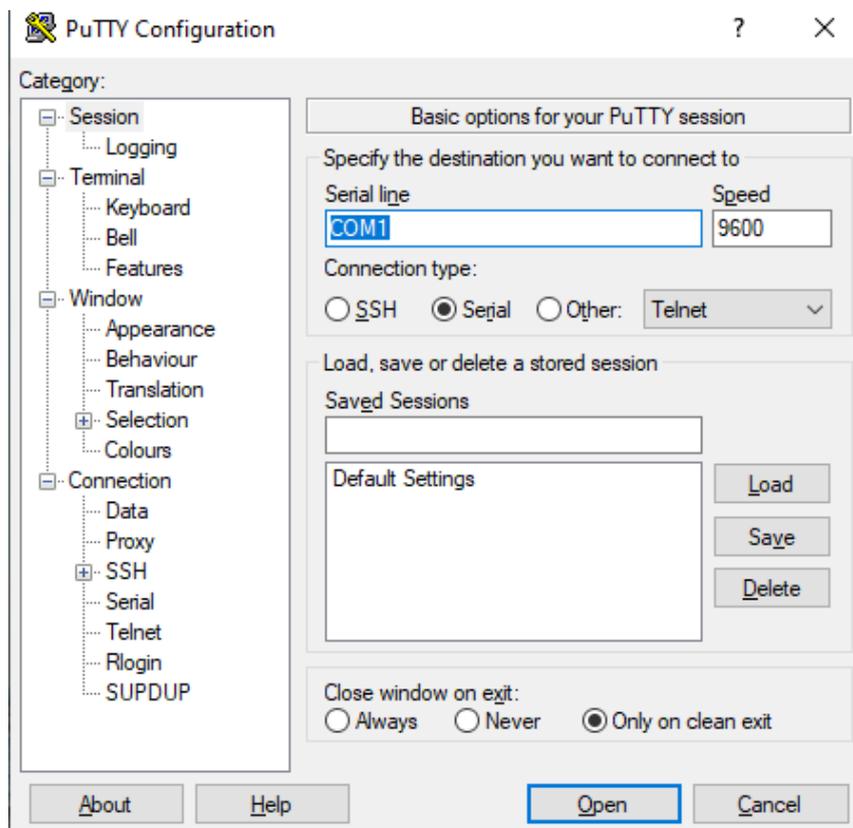


Figura 5.12. Configuración del Putty.

Ingeniería Mecánica - 2025

4. Guardar las mediciones en un archivo de texto:
 - En la pestaña "Logging", seleccionar:
 - "All session output" (Registrar toda la salida de la sesión).
 - "Log file name": Hacer clic en "Browse" y elegir la ubicación y nombre del archivo donde se guardarán los datos (mediciones_temperatura.txt).
 - Guardar la configuración y hacer clic en "Open".

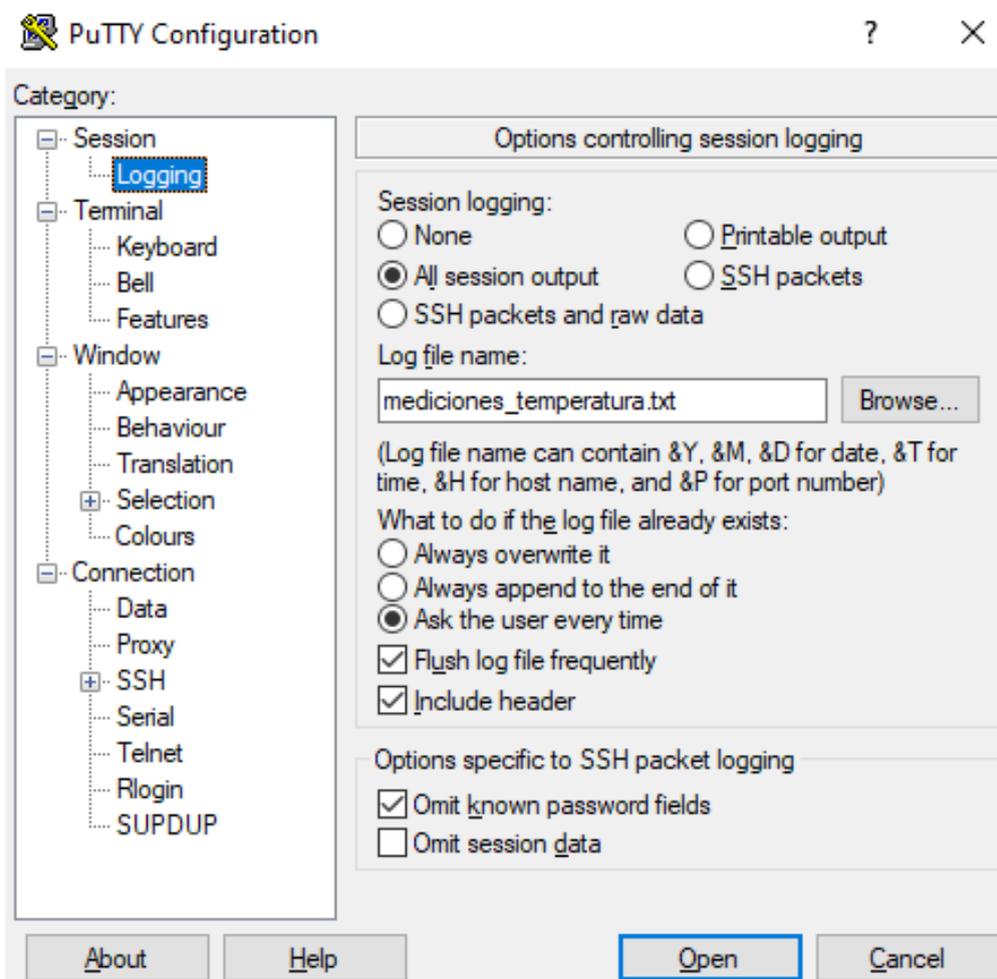


Figura 5.13. Configuración del Putty.

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

5. Iniciar la captura de datos:
 - Si la configuración es correcta, la ventana de PuTTY mostrará en tiempo real los valores de temperatura enviados por el Arduino.
6. Detener y guardar el archivo de registro:
 - Una vez finalizada la captura de datos, cerrar PuTTY.
 - El archivo mediciones_temperatura.txt contendrá todas las mediciones registradas en tiempo real.

Ingeniería Mecánica - 2025

6. PLAN DE ENSAYOS Y MUESTREO.

El desarrollo y la obtención de resultados confiables en el estudio de la viscosidad de fluidos no newtonianos, específicamente de pulpa de durazno, requiere la implementación de un plan de ensayos detallado y una metodología rigurosa para garantizar la validez de los datos obtenidos. En este contexto, se ha diseñado un plan experimental que busca determinar la muestra mínima viable, de manera que los resultados sean representativos y estadísticamente confiables. Este enfoque permitirá obtener una evaluación precisa de las variaciones de viscosidad bajo distintas condiciones experimentales.

6.1. Selección del rango de temperatura y procedimiento experimental

Para estudiar el comportamiento reológico de la pulpa de durazno, se ha determinado que el rango de temperaturas a emplear en los ensayos se encuentra entre 30°C y 60°C, con incrementos de 5°C. La elección de este rango responde a la necesidad de cubrir un espectro representativo de las condiciones térmicas bajo las cuales podrían observarse cambios significativos en las propiedades reológicas del fluido. Al variar la temperatura, se pretende estudiar el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de la muestra y cómo este comportamiento se ve modificado a lo largo de los distintos valores de concentración.

La pulpa de durazno seleccionada para estos ensayos presenta inicialmente una alta concentración de sólidos disueltos, lo que conlleva una viscosidad alta. Este comportamiento es típico de los fluidos no newtonianos, en los cuales la viscosidad no se mantiene constante, sino que depende de factores como la temperatura y la concentración de los sólidos.

Adicionalmente, para cada ensayo realizado a diferentes temperaturas será necesario cambiar la muestra de pulpa de durazno, asegurando que cada una esté preparada de manera óptima para las condiciones experimentales específicas. Además, se ha determinado que para cada temperatura se realizarán un total de tres mediciones, con el fin de garantizar la fiabilidad de los resultados y obtener un valor promedio representativo para cada condición térmica evaluada.

6.2. Análisis de la viscosidad a diferentes concentraciones

En cuanto al análisis de la viscosidad en función de la concentración de la muestra, se ha identificado que la muestra ideal para estudiar las variaciones de la viscosidad es aquella que oscila entre 12,5 °Brix y 28 °Brix. Sin embargo, en este caso específico no se emplea un enfoque de regresión equiespaciada para determinar las concentraciones,

Ingeniería Mecánica - 2025

como se hace en el caso de las temperaturas. En lugar de ello, se optará por realizar los ensayos con concentraciones específicas, seleccionadas en función de los objetivos experimentales y la necesidad de explorar un rango de comportamiento reológico que permita identificar tendencias y patrones en la viscosidad a medida que varían las condiciones de concentración.

Estas concentraciones seleccionadas son con valores de: 12.5 °Brix, 16 °Brix y 24 °Brix.

6.3. Preparación de las muestras

- **Medición de la Viscosidad Inicial**
 - **Objetivo:** Obtener el valor de viscosidad inicial de la muestra de pulpa de durazno antes de cualquier modificación.
 - **Método:** Utilizar un **texturómetro** para medir la viscosidad de la muestra recién extraída del recipiente sellado al vacío. Este paso es crucial para contar con una referencia de viscosidad antes de iniciar cualquier tratamiento en la muestra.
- **Cálculo del Balance de Masas**
 - **Objetivo:** Determinar las cantidades exactas de pulpa de durazno y agua necesarias para obtener la concentración deseada en la muestra.
 - **Método:** Realizar un **balance de masa** para calcular la cantidad de pulpa y agua a añadir. Este cálculo es fundamental para asegurar que la concentración final de la muestra esté dentro del rango deseado y sea uniforme.
 - **Nota:** [Aquí se debe incluir el cálculo detallado de balance de masas que se utilizará en cada caso específico].
- **Mezcla de los Componentes**
 - **Objetivo:** Garantizar que los sólidos y líquidos se distribuyan de manera homogénea, evitando la formación de grumos o zonas de concentración no deseada.
 - **Método:** En un **vaso de precipitados**, mezclar cuidadosamente la pulpa de durazno y el agua en las proporciones calculadas. Para asegurar la homogeneidad de la mezcla:
 - **Recomendación:** Utilizar una **cuchara** para agitar la mezcla durante al menos **10 minutos**. Verificar visualmente que no queden grumos o áreas de alta concentración de sólidos.

Ingeniería Mecánica - 2025

- **Importancia:** La mezcla adecuada es esencial, especialmente en fluidos no newtonianos, donde la consistencia de la mezcla puede afectar la reología.
- **Verificación de la Concentración Final**
 - **Objetivo:** Confirmar que la concentración de la muestra corresponde al valor deseado, de acuerdo con los cálculos previos.
 - **Método:** Utilizar un **refractómetro** para medir la concentración de sólidos disueltos en la muestra. Esta medición debe realizarse después de haber completado la mezcla de los componentes.
 - **Acción Correctiva:** Si la concentración medida no coincide con el valor esperado, ajustar la mezcla agregando más pulpa o agua según sea necesario, hasta alcanzar la concentración deseada.
- **Preparación del Volumen de Muestra para Ensayos**
 - **Objetivo:** Asegurar que el volumen de muestra sea el adecuado para los ensayos de viscosidad, evitando derrames o inconsistencias durante la medición.
 - **Método:** Utilizando una **jeringa**, llenar un **tubo sonda** con la mezcla homogénea. El volumen debe ser de **80 ml a 85 ml**, garantizando que la cantidad de muestra sea suficiente para realizar los ensayos de manera confiable.
 - **Precaución:** Asegurarse de que el llenado del tubo se realice sin derrames y de manera cuidadosa, ya que cualquier fuga podría alterar el ensayo y comprometer los resultados.
- **Almacenamiento y Manejo de las Muestras**
 - **Objetivo:** Evitar la contaminación y alteración de las propiedades de las muestras antes de los ensayos.
 - **Método:** Las muestras preparadas deben mantenerse en condiciones controladas hasta el momento de su análisis, asegurando que no estén expuestas a temperaturas extremas o contaminantes que puedan modificar sus características reológicas.

6.4. Preparación para los ensayos de viscosidad

Para los ensayos de viscosidad, se debe preparar cada muestra de forma que se garantice un volumen adecuado para las mediciones, sin riesgo de derrames o alteraciones durante el proceso. Utilizando una jeringa, se debe llenar un tubo sonda con un volumen mínimo de 80 ml y máximo de 85 ml de la muestra preparada. Este rango de volumen es fundamental para asegurar que el ensayo se realice bajo condiciones controladas y que los resultados obtenidos sean confiables.

Ingeniería Mecánica - 2025

Es importante destacar que, durante este proceso, se debe tener especial cuidado para evitar la contaminación de las muestras, lo que podría alterar las mediciones de viscosidad y, en última instancia, afectar la validez de los resultados. Además, la manipulación de las muestras debe ser lo más eficiente posible para evitar que se alteren sus propiedades físicas o químicas antes de su evaluación.

6.5. Calibración del texturómetro

Para iniciar la calibración del texturómetro, es fundamental conectar el dispositivo a una computadora que tenga instalado el software correspondiente. Una vez realizado esto, abre el programa y asegúrate de que el dispositivo esté correctamente detectado. Desde el menú principal del software, selecciona la opción de calibración para comenzar con el proceso. Este incluye dos etapas esenciales: la calibración de la fuerza de la sonda y la calibración de su carrera. Ambas deben configurarse de acuerdo con las especificaciones del equipo, asegurando que los parámetros iniciales sean correctos y que los resultados de las pruebas sean precisos.

La primera etapa de calibración se centra en ajustar la fuerza de la sonda mediante la configuración de las propiedades de la celda de carga. En el software, selecciona el tipo de celda que estás utilizando. Una vez ajustadas las preferencias, inicia el proceso de calibración colocando una pesa de 5 kg sobre la celda de carga cuando el programa lo solicite. El dispositivo registrará el peso y realizará los cálculos necesarios para ajustar la celda de carga. Después de unos segundos, la calibración de fuerza estará completa, y el texturómetro estará listo para realizar mediciones precisas en ensayos futuros.

Por último, antes de comenzar un ensayo, es crucial definir el punto inicial del análisis. Esto se logra configurando varios parámetros en el software, entre ellos la sensibilidad, que determina con qué precisión la sonda detectará el contacto con el fluido. Una vez configurados los valores, utiliza el panel de control para mover manualmente la sonda, llevándola cerca de la superficie libre de la muestra. Cuando esté en la posición adecuada, inicia la calibración para que el texturómetro detecte automáticamente la altura de la superficie y la registre como punto cero. Este paso es esencial para asegurar que las mediciones y los gráficos generados durante el ensayo sean correctos y estén alineados con los objetivos del análisis.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección, se presenta el procedimiento y la metodología utilizada para analizar los resultados de los 24 ensayos realizados. El objetivo es caracterizar las propiedades reológicas de las pulpas evaluadas, identificando cómo la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix), la temperatura y la velocidad de extrusión afectan parámetros clave como el índice de flujo (n) y el índice de consistencia (K). Además, se estudia el error relativo entre las mediciones experimentales y los valores ajustados por regresión, asegurando la fiabilidad de los datos obtenidos.

El análisis se divide en varias etapas claramente definidas, siguiendo una metodología sistemática que incluye la adquisición de datos, el procesamiento de los mismos mediante un código personalizado en Octave, y la presentación visual e interpretación de los resultados. A continuación, se describe en detalle el paso a paso del análisis y cómo cada uno de estos elementos será presentado en la Sección 8.

7.1. Metodología de Análisis

Paso 1: Adquisición de Datos

Los datos experimentales de cada ensayo incluyen tres mediciones de fuerza y desplazamiento a lo largo de la extrusión. Estos datos se almacenan en archivos .csv y posteriormente se procesan para obtener valores promedio, eliminando posibles valores atípicos y asegurando una mejor representatividad de los resultados.

Paso 2: Procesamiento de Datos

Se desarrolló un código en Octave que automatiza el procesamiento y análisis de los datos. Este código permite:

- Calcular el índice de flujo (n) y el índice de consistencia (K) para cada ensayo.
- Ajustar los datos mediante una regresión polinómica para calcular el esfuerzo de corte (τ) y la tensión adimensional (Tw).
- Comparar las mediciones experimentales con los valores ajustados y calcular el error relativo.
- Clasificar los materiales en pseudoplásticos, dilatantes o newtonianos en función del índice de flujo.

Ingeniería Mecánica - 2025

El código incluye funciones específicas para graficar los resultados y generar salidas en formato CSV, facilitando la exportación y el análisis de los datos.

Paso 3: Representación Gráfica de Resultados

En la Sección 8, los resultados se presentan en gráficos agrupados para facilitar la interpretación de los datos. Los principales gráficos incluyen:

- Gráficos de esfuerzo de corte (τ) en función de la distancia para cada ensayo y agrupados por concentración de sólidos solubles.
- Gráficos del índice de consistencia (K) para todos los ensayos, resaltando los promedios por grupo y mostrando cómo varía este índice con la concentración y la velocidad de extrusión.
- Análisis del error relativo, destacando que la mayoría de las mediciones se encuentran dentro de un rango aceptable de $\pm 5\%$.
- Tabla de resultados consolidada, que incluye todos los parámetros calculados para cada ensayo, como el índice de flujo, el índice de consistencia y el tipo de material.

7.2. Descripción del Código

El código desarrollado en Octave es una pieza clave para el análisis de resultados, diseñado para automatizar y estandarizar el proceso, reduciendo la posibilidad de errores humanos y asegurando la coherencia en el análisis de los datos. A continuación, se resumen las principales secciones del código:

- Cálculo de la Fuerza Promedio: Para cada ensayo, se realizan tres mediciones independientes. Estas mediciones se promedian para obtener un valor más representativo y reducir el impacto de posibles fluctuaciones puntuales. A partir del promedio de estas mediciones, se calcula la fuerza promedio en función de la distancia recorrida por el texturómetro..
- Regresión Lineal para el Cálculo de la Fuerza y el Esfuerzo de Corte: Se aplica una regresión lineal en dos tramos diferenciados: uno para la fase inicial del ensayo y otro para la fase final. Esto permite identificar el comportamiento lineal de la fuerza con la distancia y calcular el esfuerzo de corte a partir de la relación obtenida.

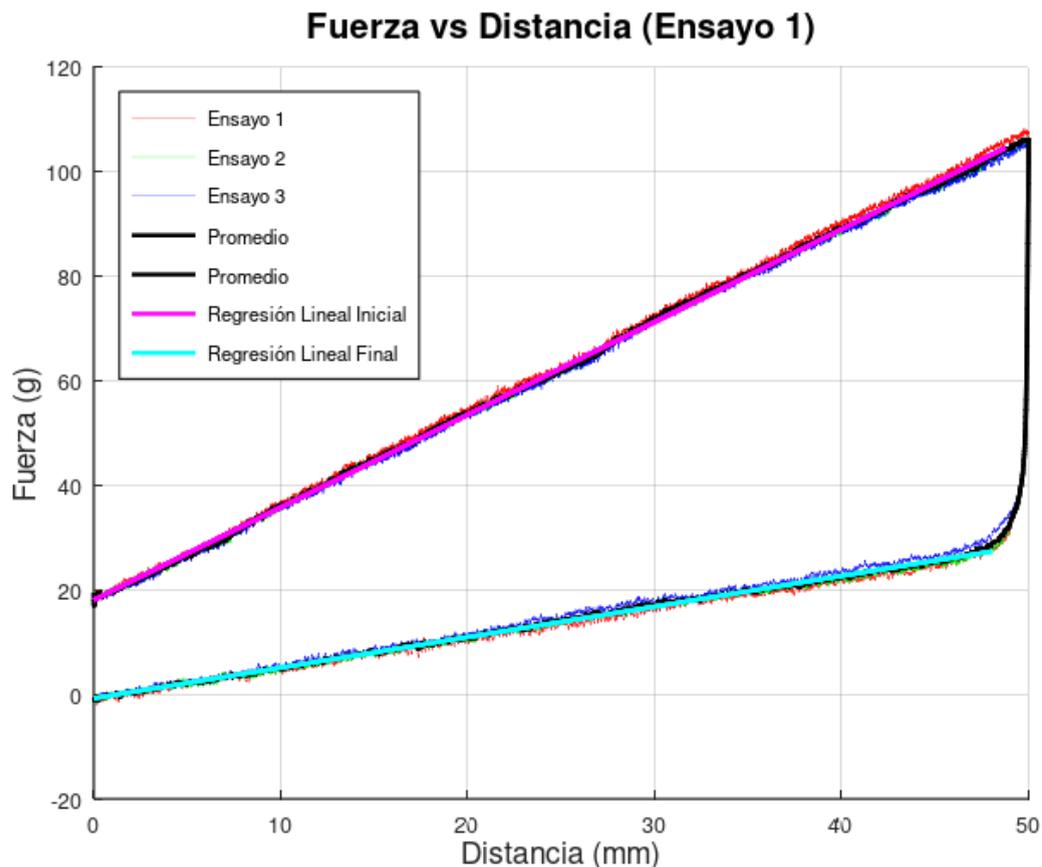


Figura 7.1. Gráfico de Fuerza vs Distancia para el Ensayo 1, mostrando las tres repeticiones individuales (Ensayos 1, 2 y 3) junto con la fuerza promedio calculada y las regresiones lineales ajustadas en las secciones inicial y final del ensayo

- Cálculo del Índice de Flujo (n): A partir de la regresión, se determina el índice de flujo para cada ensayo, lo que permite clasificar el material como pseudoplástico, dilatante o newtoniano.
- Cálculo del Índice de Consistencia (K): Este parámetro refleja la viscosidad inicial del material y se calcula para cada ensayo. Los resultados se agrupan posteriormente por concentración de sólidos ($^{\circ}$ Brix) para identificar patrones.
- Clasificación del Tipo de Material: Basada en el valor del índice de flujo (n), los materiales se clasifican como pseudoplásticos ($n < 1$), newtonianos ($n = 1$) o dilatantes ($n > 1$).

Ingeniería Mecánica - 2025

- Generación de Gráficos Personalizados: Se incluyen funciones para graficar el esfuerzo de corte, el índice de consistencia y el error relativo, con etiquetas y leyendas detalladas para facilitar la interpretación.
- Exportación de Resultados: Los resultados de los 24 ensayos se consolidan en un archivo CSV que incluye la temperatura, el índice de flujo, el índice de consistencia y la clasificación del tipo de material.

7.3. Plan de Presentación en la Sección 8

La Sección 8 se organiza de manera que cada subsección explore un aspecto específico del análisis:

- 8.1. Análisis del Esfuerzo de Corte (τ): Presentación de gráficos del esfuerzo de corte para cada grupo de concentración, analizando la relación con la velocidad de extrusión.
- 8.2. Índice de Flujo (n): Confirmación del comportamiento pseudoplástico del material, mostrando que el índice de flujo permanece constante en todos los ensayos.
- 8.3. Índice de Consistencia (K): Análisis detallado del índice de consistencia, identificando patrones claros en función de la concentración de sólidos y la velocidad de extrusión.
- 8.4. Error Relativo: Evaluación de la precisión del ajuste de regresión, destacando que la mayoría de los errores se encuentran dentro de un rango aceptable de $\pm 5\%$.
- 8.5. Clasificación del Tipo de Material: Clasificación final del tipo de material para cada ensayo, basada en el valor de n .
- 8.6. Relación con Palatabilidad y Aceptación Sensorial: Discusión de cómo las propiedades reológicas afectan la aceptabilidad del producto, con recomendaciones para su uso en distintas aplicaciones alimenticias.

7.4. Resumen de los Ensayos

Los ensayos descritos en la Tabla 7.1 corresponden a mediciones realizadas para caracterizar el comportamiento reológico de la pulpa de durazno, un fluido no newtoniano. Cada ensayo incluye tres mediciones independientes, realizadas a distintas temperaturas (30°C a 60°C), con tres concentraciones diferentes de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$): 12.5, 16 y 24. La velocidad de medición fue constante a 1 mm/s, 3 mm/s o 5

Ingeniería Mecánica - 2025

mm/s, dependiendo del grupo de ensayo. El promedio de estas mediciones y el ajuste mediante regresión lineal permite obtener datos representativos y confiables para el análisis posterior.

Resumen de Ensayos: Condiciones Experimentales y Repeticiones

Tabla 7.1. Descripción de los ensayos realizados para caracterizar el comportamiento reológico de la pulpa de durazno. La tabla muestra las condiciones experimentales, incluyendo la temperatura, la concentración de sólidos solubles (°Brix), el número de repetición y la velocidad de extrusión utilizada en cada caso.

Nº de ensayo	Temperatura (C)	°Brix	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Velocidad
1	30	12.5	D001	D002	D003	1
2	35	12.5	D004	D005	D006	1
3	40	12.5	D007	D008	D009	1
4	45	12.5	D010	D011	D012	1
5	50	12.5	D013	D014	D015	1
6	55	12.5	D016	D017	D018	1
7	60	12.5	D019	D020	D021	1
8	40	12.5	D022	D023	D024	1
9	40	16	D025	D026	D027	1
10	45	16	D028	D029	D030	1
11	40	24	D031	D032	D033	1
12	45	24	D034	D035	D036	1
13	30	24	D037	D038	D039	3
14	35	24	D040	D041	D042	3
15	30	16	D043	D044	D045	3
16	35	16	D046	D047	D048	3
17	30	12,5	D049	D050	D051	5

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

18	35	12,5	D052	D053	D054	5
19	30	16	D055	D056	D057	5
20	35	16	D058	D059	D060	5
21	30	24	D061	D062	D063	5
22	35	24	D064	D065	D066	5
23	30	12,5	D067	D068	D069	5
24	30	12,5	D070	D071	D072	3

7.5. Conclusión de la Metodología

El enfoque adoptado en esta sección asegura un análisis exhaustivo de las propiedades reológicas de las muestras evaluadas. Cada paso del proceso está diseñado para proporcionar una caracterización detallada y confiable, facilitando la interpretación de los resultados y su aplicación en el desarrollo de productos específicos. La utilización del promedio de las tres mediciones garantiza la robustez de los resultados, mientras que las regresiones lineales permiten identificar tendencias y calcular parámetros clave como el índice de flujo y el índice de consistencia. La integración del código automatizado asegura la reproducibilidad y la coherencia en el análisis, reforzando la validez de las conclusiones obtenidas.

En las subsecciones siguientes, se presentarán los resultados obtenidos, acompañados de gráficos y tablas que facilitarán la comprensión del comportamiento del material bajo distintas condiciones de prueba.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos permite caracterizar las propiedades reológicas de las pulpas bajo estudio, considerando tanto su comportamiento frente a variaciones de temperatura como la influencia de la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) en su índice de consistencia (K) e índice de flujo (η). Este enfoque es esencial para determinar el tipo de material (pseudoplástico o dilatante), su adecuación para diferentes aplicaciones alimenticias y su aceptación sensorial.

A partir de los 24 ensayos detallados en la Tabla 7.1, se han identificado patrones clave que permiten caracterizar la reología de las pulpas, evaluando su comportamiento bajo distintas velocidades de extrusión y concentraciones de sólidos. Las figuras presentadas muestran cómo el esfuerzo de corte (τ) aumenta con la distancia recorrida, revelando un comportamiento típico de materiales pseudoplásticos, donde la viscosidad aparente disminuye conforme se incrementa la velocidad de deformación. Este comportamiento es característico de fluidos no newtonianos y es crucial para determinar la viabilidad del producto en distintas aplicaciones.

Además, se realizará un análisis integral considerando la aceptación del producto por parte de personas con problemas de deglución, dado que las propiedades reológicas, como el esfuerzo de corte y la viscosidad, son determinantes para garantizar una textura adecuada, seguridad en el consumo y facilidad de ingesta. Este enfoque multidimensional busca no sólo optimizar los procesos de formulación y producción, sino también asegurar que el producto final cumpla con altos estándares de calidad, tanto desde la perspectiva técnica como sensorial.

8.1. Esfuerzo de corte

El análisis del esfuerzo de corte para este tipo de fluidos presenta ciertas particularidades debido a la metodología empleada. A diferencia de los estudios tradicionales, donde se grafica la tensión de corte (τ) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), en este caso se utilizó un ensayo de extrusión a velocidad constante, lo que imposibilita obtener directamente la relación típica de fluido no newtoniano entre estos parámetros. Por ello, se decidió representar el esfuerzo de corte en función de la distancia de extrusión, lo que permite observar el comportamiento mecánico del material durante el proceso de extrusión.

La Figura 8.1 muestra el esfuerzo de corte para todos los ensayos agrupados por colores según la concentración del fluido. Se observa que el comportamiento del esfuerzo de corte es aproximadamente lineal, lo que indica una relación directa con la distancia

recorrida en el proceso de extrusión. Esta representación sirve como punto de partida para identificar las diferencias de comportamiento entre cada grupo de concentración.

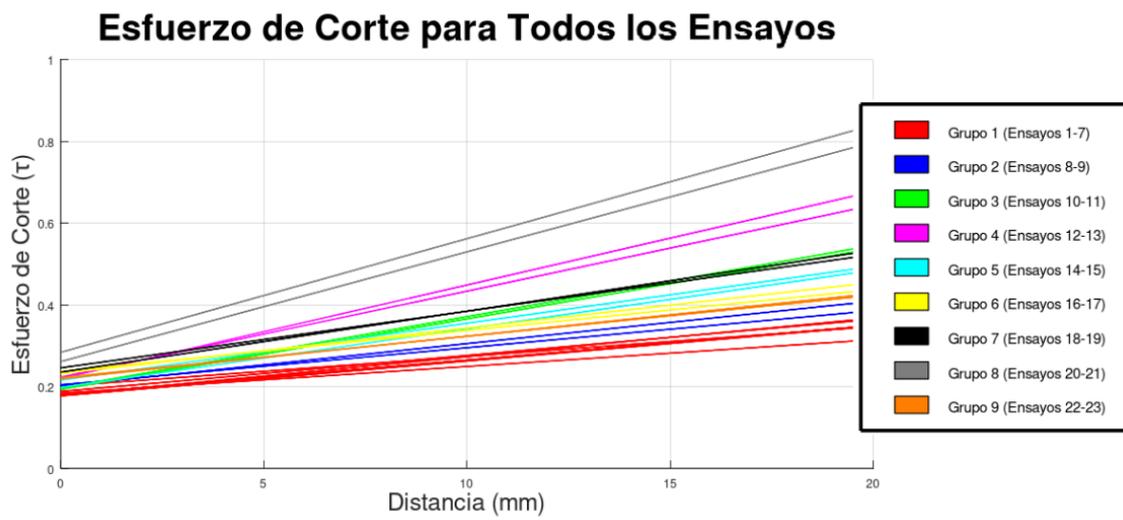


Figura 8.1. Esfuerzo de Corte en los ensayos. Los ensayos con mayor índice de consistencia (K) presentan una pendiente más pronunciada, reflejando una mayor resistencia al flujo, especialmente en el Grupo 3 (24°Brix).

A continuación, se analizará el esfuerzo de corte para cada grupo de concentración por separado. En particular, se comenzará con el análisis de los grupos 1, 6 y 9, correspondientes a una concentración de 12.5 °Brix. Este enfoque permitirá evaluar cómo varía el esfuerzo de corte en función de la velocidad de extrusión, lo que brindará una visión más detallada del comportamiento de cada concentración y su respuesta mecánica bajo condiciones de extrusión constante. Consecuentemente se presentarán los resultados de los grupos 2, 5 y 7 que son los ensayos realizados con concentración de 16° Brix. Y por último, se presentan los resultados de los grupos, 3, 4 y 8 realizados con una concentración 24°Brix.

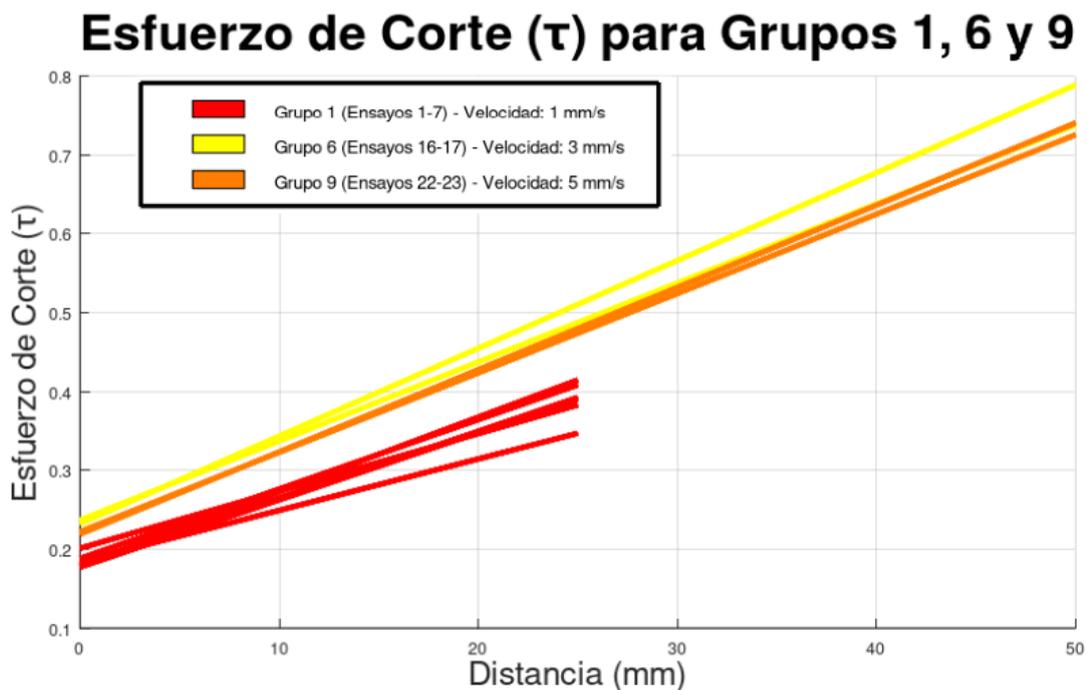


Figura 8.2. Esfuerzo de Corte (τ) en función de la distancia para los Grupos 1, 6 y 9, correspondientes a una concentración de 12.5 °Brix. Se observa que el esfuerzo de corte aumenta a medida que incrementa la velocidad de extrusión.

En la Figura 8.2 se observa el comportamiento del esfuerzo de corte (τ) en función de la distancia para los Grupos 1, 6 y 9, correspondientes a una concentración de 12.5 °Brix y velocidades de extrusión de 1, 3 y 5 mm/s, respectivamente. Se evidencia claramente que el esfuerzo de corte aumenta de manera proporcional a la velocidad de extrusión, lo cual es consistente con la naturaleza de estos sistemas semisólidos. Este comportamiento sugiere que, al incrementar la velocidad de extrusión, se genera una mayor resistencia al flujo debido a las características reológicas del material, lo que resulta en mayores esfuerzos. Esta tendencia confirma la dependencia directa entre el esfuerzo y la velocidad de deformación, proporcionando información clave para el diseño y control del proceso de extrusión.

Esfuerzo de Corte (τ) para Grupos 2, 5 y 7

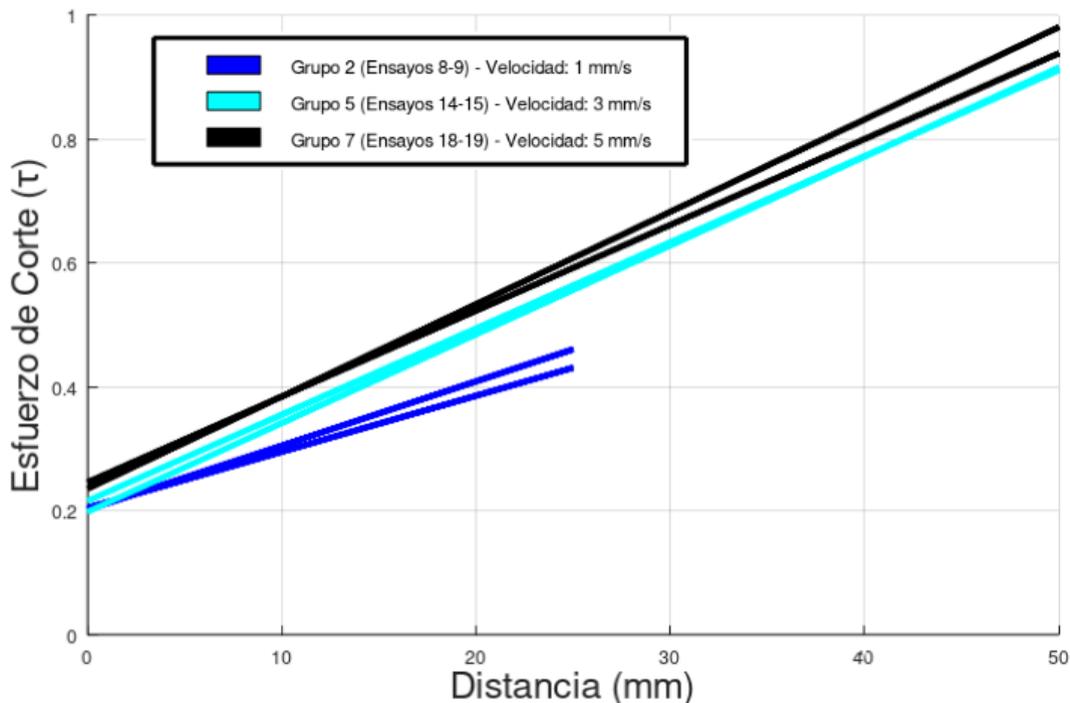


Figura 8.3. Esfuerzo de Corte (τ) en función de la distancia para los Grupos 2, 5 y 7, correspondientes a una concentración de 16 °Brix. Se observa un incremento en el esfuerzo de corte a medida que aumenta la velocidad de extrusión.

En las Figuras 8.3 y 8.4 se presenta el comportamiento del esfuerzo de corte (τ) para concentraciones de 16 °Brix. En ambas gráficas, se evidencia que el esfuerzo de corte incrementa a medida que la velocidad de extrusión aumenta, siguiendo una tendencia lineal con la distancia. Cada grupo presenta un comportamiento característico influenciado por la concentración del fluido y la velocidad aplicada, confirmando la relación directa entre estas variables y el esfuerzo de corte registrado.

Esfuerzo de Corte (τ) para Grupos 3, 4 y 8

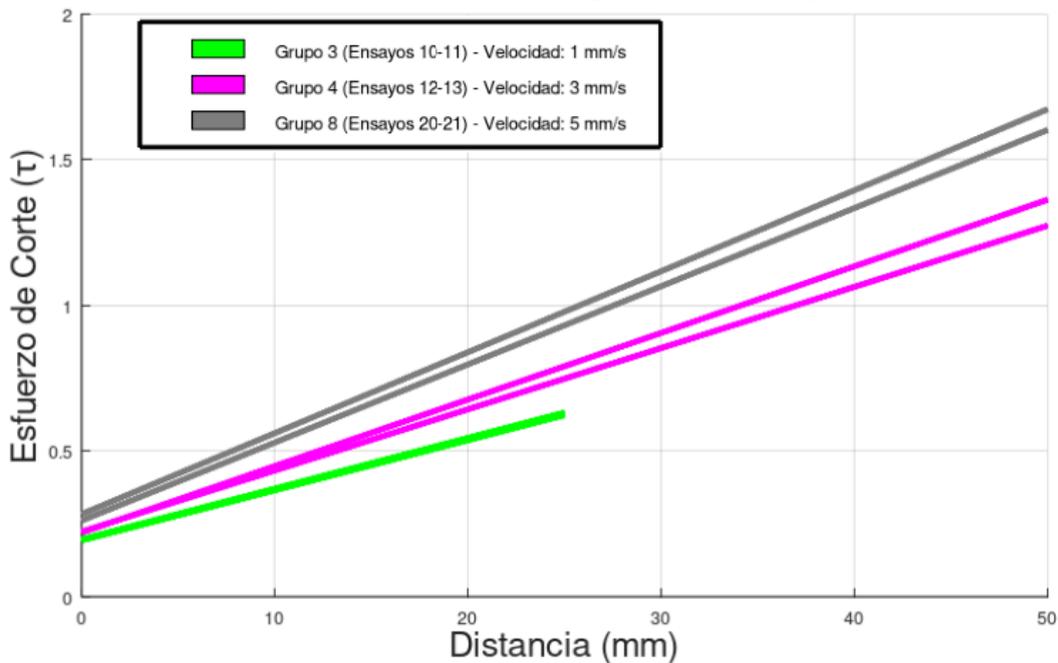


Figura 8.4. Esfuerzo de Corte (τ) en función de la distancia para los Grupos 3, 4 y 8, correspondientes a una concentración de 24 °Brix. El esfuerzo de corte aumenta consistentemente con la distancia y la velocidad de extrusión.

El comportamiento observado es característico de fluidos pseudoplásticos, donde el esfuerzo de corte aumenta significativamente tanto con la concentración como con la velocidad de extrusión. Este tipo de comportamiento es común en suspensiones y soluciones complejas, ya que su viscosidad disminuye con el incremento de la velocidad de cizalladura, facilitando el flujo a mayores velocidades. Estos resultados confirman la naturaleza no newtoniana del fluido y su dependencia de las condiciones de extrusión, lo que resulta clave para su caracterización reológica y aplicaciones industriales.

Ingeniería Mecánica - 2025

8.2. Índice de flujo (η)

En esta sección, se analizará el índice de flujo (n) calculado para los 24 ensayos descritos en la Tabla 7.1. Este índice es una herramienta fundamental para caracterizar el comportamiento reológico del material, permitiendo establecer si el fluido se comporta como newtoniano, dilatante o pseudoplástico. Un valor constante o cercano a 1 indicaría un comportamiento newtoniano, mientras que desviaciones por debajo de 1 podrían sugerir un comportamiento más complejo, asociado a estructuras internas susceptibles al esfuerzo de corte. La revisión de este índice es clave para confirmar las observaciones realizadas previamente sobre el esfuerzo de corte y su relación con la velocidad de extrusión.

A continuación, se presenta la gráfica del índice de flujo para cada uno de los ensayos, lo que permitirá identificar la posible naturaleza del material y establecer tendencias generales.

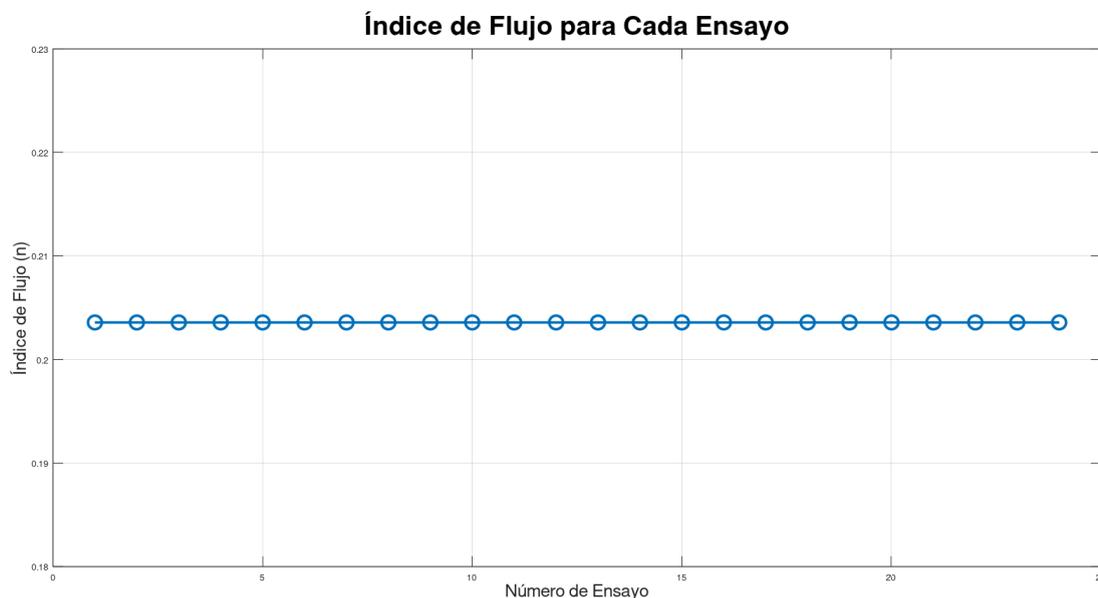


Figura 8.5. Índice de flujo (η) para cada ensayo. Se observa un comportamiento constante.

El índice de flujo (η) se mantiene uniforme en todos los ensayos, con un valor promedio de $n=0.2035$. Este comportamiento uniforme indica que el material tiene una estructura reológica consistente, independiente de la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) o la temperatura.

Ingeniería Mecánica - 2025

En términos prácticos, esto significa que el producto será predecible en su comportamiento reológico, facilitando tanto su procesamiento industrial como su aceptación por parte del consumidor. La constancia de η es una ventaja para el diseño de procesos y productos alimenticios, ya que asegura que el material se comportará de manera similar independientemente de variaciones térmicas típicas.

8.3. Índice de consistencia (K)

El índice de consistencia (K) es un parámetro clave para caracterizar el espesor aparente de los materiales bajo diferentes condiciones de prueba. A diferencia del índice de flujo (n), que describe la dependencia de la viscosidad respecto al esfuerzo de corte, K refleja la magnitud de la viscosidad inicial del material. Este valor está directamente relacionado con la concentración de sólidos solubles, lo que afecta significativamente la resistencia del material al flujo.

Índice de Consistencia para Cada Ensayo por Grupo

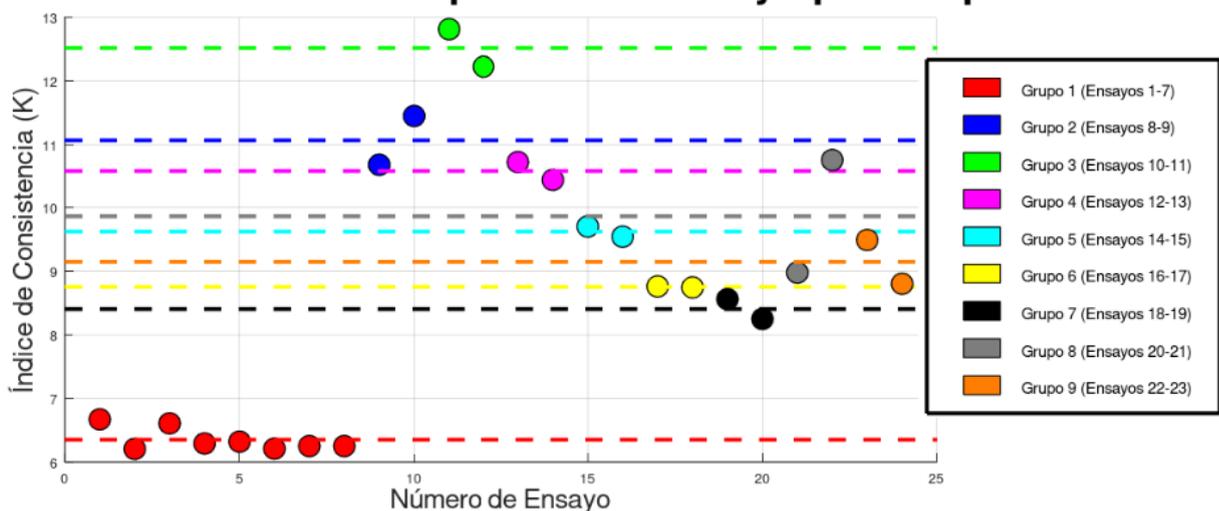


Figura 8.6. Índice de consistencia (K) para los 24 ensayos descritos en la *Tabla 7.1*. Se observan niveles bien definidos de K correspondientes a las distintas concentraciones de sólidos solubles, con líneas horizontales que representan el promedio de cada grupo.

Ingeniería Mecánica - 2025

Luego de analizar el esfuerzo de corte en función de la distancia para diferentes grupos, es fundamental profundizar en el comportamiento del índice de consistencia (K). Este análisis proporciona información clave sobre la viscosidad aparente del material a distintas concentraciones de sólidos solubles. Al igual que en el análisis del esfuerzo de corte, agrupamos los ensayos en tres conjuntos diferenciados según la concentración, lo que facilita la interpretación del comportamiento de K en función de las condiciones experimentales.

Al igual que en el análisis anterior, agrupamos los ensayos en tres conjuntos diferenciados según la concentración, lo que facilita la interpretación del comportamiento de K en función de las condiciones experimentales.

Índice de Consistencia (K) para Grupos 1, 6 y 9

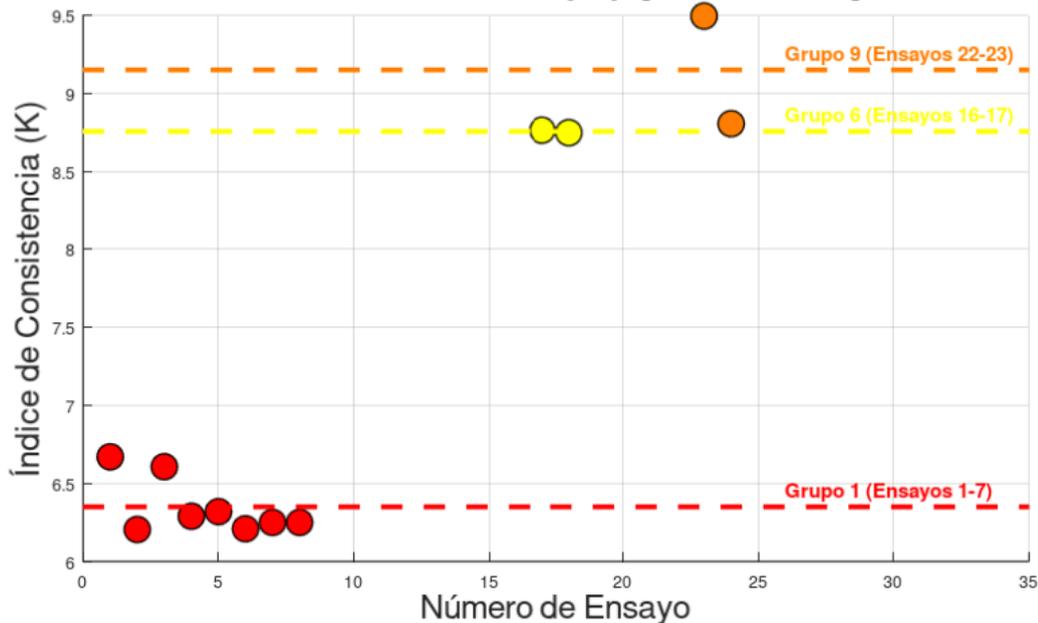


Figura 8.7. muestra el índice de consistencia para los Grupos 1, 6 y 9, que corresponden a una concentración de 12.5 °Brix. Se observa que los valores de K aumentan con la velocidad de extrusión. El Grupo 1 (ensayos 1-7), con la menor velocidad (1 mm/s), presenta los valores más bajos, mientras que el Grupo 9 (ensayos 22-23), extruido a 5 mm/s, muestra los valores más altos.

Índice de Consistencia (K) para Grupos 2, 5 y 7

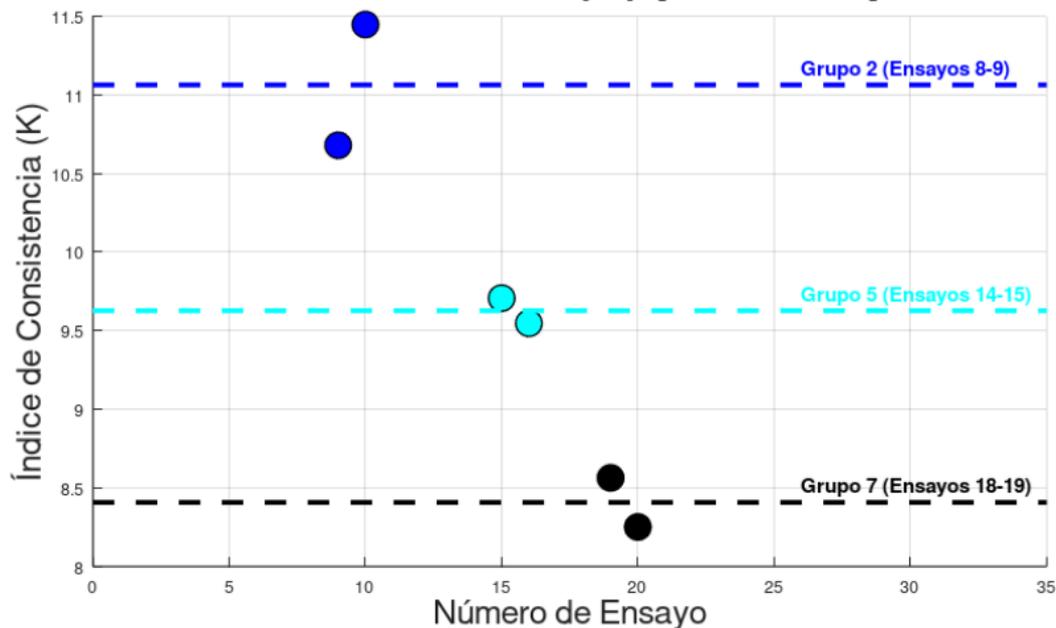


Figura 8.8. representa el índice de consistencia para los Grupos 2, 5 y 7, con una concentración de 16 °Brix. Se aprecia nuevamente la tendencia decreciente de K a medida que aumenta la velocidad de extrusión.

En las Figuras 8.6 a 8.8 se analizan los valores de K para distintos grupos de ensayos, organizados según la concentración de sólidos (12.5, 16 y 24 °Brix). En cada figura se observa una tendencia clara de aumento del índice de consistencia a medida que se incrementa la velocidad de extrusión, confirmando un comportamiento consistente con materiales no newtonianos. Por ejemplo, en la Figura 8.6, el Grupo 1 presenta los valores más bajos de K, mientras que el Grupo 9 muestra valores más altos debido a la mayor velocidad de extrusión (5 mm/s).

Índice de Consistencia (K) para Grupos 3, 4 y 8

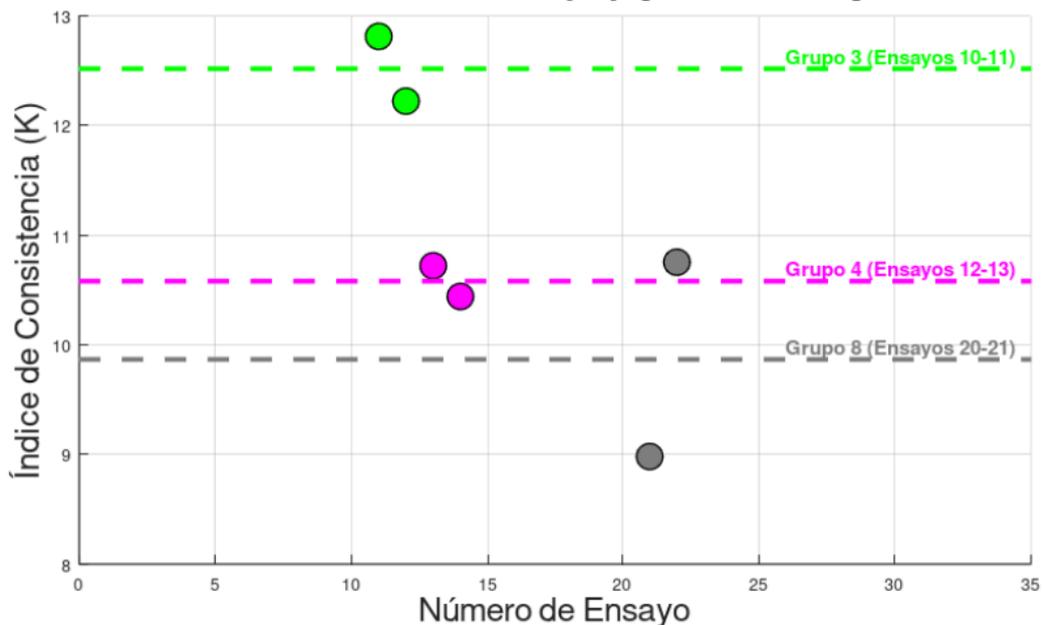


Figura 8.9. muestra los resultados para los Grupos 3, 4 y 8, correspondientes a una concentración de 24 °Brix. Aquí, el índice de consistencia alcanza sus valores más altos, destacándose el Grupo 3 (ensayos 10-11) a baja velocidad como el más consistente.

En términos de aplicación, un valor más alto de K implica un material más denso o espeso, lo cual puede ser deseable en productos como cremas, salsas o aderezos donde se busca una textura rica y consistente. Por otro lado, valores más bajos de K serían más apropiados para productos líquidos o semilíquidos que necesitan fluir fácilmente, como jugos o purés. En términos de aplicación, como resumen:

- Las pulpas con K bajo (12.5°Brix) son ideales para productos más fluidos como jugos o bebidas.
- Las pulpas con K intermedio (16°Brix) son adecuadas para productos con textura intermedia, como néctares.
- Las pulpas con K alto (24°Brix) son más apropiadas para productos densos, como mermeladas o purés espesos.

Ingeniería Mecánica - 2025

Tabla 8.1. Análisis de resultados y determinación del tipo de fluido

Ensayo	Temperatura (°C)	Indice Flujo (n)	Indice Consistencia (K)	Tipo Material
1	30	0.203582	6.670.636	Pseudoplástico
2	35	0.203582	6.205.126	Pseudoplástico
3	40	0.203582	6.607.400	Pseudoplástico
4	45	0.203582	6.290.473	Pseudoplástico
5	50	0.203582	6.319.666	Pseudoplástico
6	5	0.203582	6.209.806	Pseudoplástico
7	55	0.203582	6.250.382	Pseudoplástico
8	60	0.203582	6.250.382	Pseudoplástico
9	60	0.203582	10.678.520	Pseudoplástico
10	40	0.203582	11.446.622	Pseudoplástico
11	45	0.203582	12.812.892	Pseudoplástico
12	40	0.203582	12.222.348	Pseudoplástico
13	45	0.203582	10.720.411	Pseudoplástico
14	30	0.203582	10.440.514	Pseudoplástico
15	35	0.203582	9.706.634	Pseudoplástico
16	30	0.203582	9.546.532	Pseudoplástico
17	35	0.203582	8.763.451	Pseudoplástico
18	30	0.203582	8.747.471	Pseudoplástico
19	35	0.203582	8.563.402	Pseudoplástico
20	30	0.203582	8.251.079	Pseudoplástico
21	35	0.203582	8.981.018	Pseudoplástico
22	30	0.203582	10.753.335	Pseudoplástico
23	35	0.203582	9.494.507	Pseudoplástico
24	30	0.203582	8.805.101	Pseudoplástico

La misma muestra la descripción de los resultados de los 24 ensayos, incluyendo la temperatura del ensayo, el índice de flujo (n), el índice de consistencia (K) y la clasificación del tipo de material según su comportamiento reológico. Los resultados reflejan un comportamiento consistentemente pseudoplástico en todos los ensayos, con valores de $n < 1$, lo que sugiere una reducción de la viscosidad aparente con el aumento de la velocidad de deformación, típica de este tipo de fluidos.

La Tabla 8.1 resume los resultados de los 24 ensayos descritos en la Tabla 7.1, destacando el comportamiento consistentemente pseudoplástico de todos los materiales evaluados ($n < 1$). Este comportamiento es típico de productos en los que la viscosidad disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación, asegurando una textura suave y estable durante el consumo.

Ingeniería Mecánica - 2025

Desde una perspectiva industrial, controlar el índice de consistencia es esencial para garantizar la estabilidad y la calidad del producto final, especialmente en la producción de alimentos para poblaciones con necesidades específicas, como personas con dificultades de deglución. Un K elevado puede proporcionar mayor cuerpo y una sensación de firmeza en boca, mejorando la aceptación sensorial y la experiencia del consumidor. Asimismo, comprender y ajustar estos parámetros facilita la optimización de los procesos de producción y asegura un producto consistente y predecible en distintas condiciones.

8.4. Análisis del Error Relativo de las mediciones

El análisis del error relativo entre la regresión ajustada y el promedio de las mediciones permite evaluar la precisión del modelo utilizado para representar el comportamiento del material. Este tipo de análisis es clave para identificar posibles desviaciones y garantizar que el ajuste matemático sea lo suficientemente preciso para describir las propiedades reológicas del material. En la Figura 8.7, se presenta el error relativo calculado para cada ensayo a lo largo de los puntos de datos. La zona sombreada en verde delimita el rango de aceptación entre $\pm 5\%$, lo que representa un nivel de error aceptable para aplicaciones industriales.

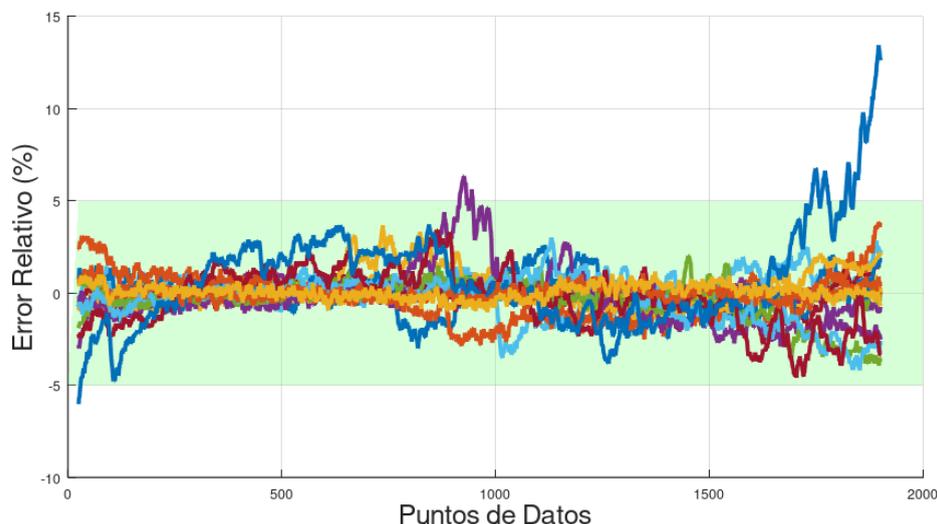


Figura 8.10. Error relativo entre la regresión ajustada y el promedio de las mediciones para cada ensayo. La mayoría de los datos se encuentran dentro del rango de $\pm 5\%$, lo que indica una buena precisión del modelo y una baja dispersión entre la regresión y las mediciones experimentales.

Ingeniería Mecánica - 2025

Los resultados del análisis del error relativo muestran que la gran mayoría de las mediciones están contenidas dentro del rango de $\pm 5\%$, lo que refleja la consistencia y precisión del ajuste realizado. Esto confirma que el modelo de regresión propuesto es adecuado para describir el comportamiento del material bajo las condiciones experimentales evaluadas. Además, la baja dispersión observada es un indicador de la reproducibilidad de las mediciones, lo que resulta fundamental para garantizar la confiabilidad de los resultados. Este nivel de precisión es especialmente relevante para aplicaciones industriales, ya que asegura que las propiedades del material puedan ser modeladas y controladas de manera predecible durante el procesamiento y desarrollo de productos.

8.5. Análisis del tipo de material

De acuerdo con los datos obtenidos del índice de flujo (n), todos los materiales analizados presentan valores inferiores a 1 ($n \approx 0.2035$), lo que clasifica a estos materiales como pseudoplásticos. Este comportamiento reológico es característico de materiales cuya viscosidad disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación. Esta propiedad es clave en la industria alimentaria, ya que mejora tanto el manejo del producto durante su procesamiento como su aceptabilidad sensorial durante el consumo.

En términos reológicos, los fluidos pseudoplásticos fluyen más fácilmente al ser sometidos a esfuerzo, lo que permite que productos como salsas, purés y yogures sean más manejables al ser servidos o consumidos, sin perder su estabilidad estructural cuando están en reposo. Esta característica es especialmente importante para productos diseñados para personas con dificultades de deglución, ya que proporciona una textura suave y uniforme que facilita el consumo sin riesgos adicionales.

La Figura 8.5, que muestra el índice de flujo para los 24 ensayos, confirma que este parámetro permanece constante a lo largo de todas las pruebas y no presenta una variación significativa con la temperatura en el rango de 30°C a 60°C . Este hallazgo indica que el comportamiento pseudoplástico del material es estable frente a variaciones térmicas moderadas, lo que es deseable para productos que deben mantener sus propiedades reológicas durante el almacenamiento o el consumo a diferentes temperaturas.

Ingeniería Mecánica - 2025

8.6. Relación con palatabilidad y aceptación por el cuerpo humano

El análisis del índice de consistencia (K) y del comportamiento pseudoplástico revela que las características reológicas de las pulpas evaluadas están directamente relacionadas con la textura y la aceptación del producto por parte del consumidor. En función de la concentración de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) y la velocidad de extrusión, se identifican tres grupos principales con distintas aplicaciones potenciales:

- **Grupo 1 (12.5 $^{\circ}$ Brix):** Estas pulpas presentan los valores más bajos de índice de consistencia, lo que las hace ideales para productos más fluidos, como jugos o bebidas funcionales. Gracias a su baja viscosidad, estos productos son fáciles de beber y digerir, lo que puede mejorar su aceptación, especialmente entre personas que prefieren texturas ligeras o requieren productos de fácil ingestión.
- **Grupo 2 (16 $^{\circ}$ Brix):** Representa una categoría intermedia, con una textura más densa y equilibrada, adecuada para néctares o productos en los que se busca una experiencia sensorial más rica, pero sin llegar a ser demasiado espesa. Este grupo combina fluidez y cuerpo, ofreciendo una mayor versatilidad en el desarrollo de productos.
- **Grupo 3 (24 $^{\circ}$ Brix):** Las pulpas más densas y consistentes se encuentran en este grupo. Estas son ideales para productos como mermeladas, salsas espesas o purés, donde se desea una textura firme y una mayor resistencia al flujo. Aunque pueden ser menos favorables para el consumo directo como bebida, son indispensables para aplicaciones donde la retención de forma y estabilidad estructural son esenciales.

El comportamiento pseudoplástico observado en todos los grupos asegura una experiencia de consumo agradable. Los productos fluyen con facilidad al ser sometidos a presión (durante la masticación o el vertido), pero mantienen su integridad estructural en reposo, evitando la separación de fases o la sedimentación.

Desde una perspectiva industrial, comprender y controlar estas propiedades reológicas es fundamental para garantizar la calidad, la estabilidad y la aceptabilidad sensorial del producto final. Esto facilita el diseño de productos específicos para distintas necesidades del consumidor, incluyendo aquellos destinados a personas con dificultades de deglución, quienes se benefician de texturas suaves y seguras para el consumo. Además, permite optimizar los procesos de producción y almacenamiento, asegurando la reproducibilidad y consistencia del producto bajo distintas condiciones.

Ingeniería Mecánica - 2025

9. ANÁLISIS ECONÓMICO.

En esta sección se realizará un análisis de prefactibilidad económica, comparando las distintas opciones de mercado para el análisis reológico, considerando tanto la adquisición de equipamiento propio como el envío de muestras a laboratorios especializados. Este análisis busca brindar una visión clara del panorama económico, destacando factores clave como la precisión, aplicabilidad, costos de adquisición y operación de los equipos más relevantes en la industria. Asimismo, se revisarán los costos asociados a los equipos utilizados en la facultad, evaluando su viabilidad en comparación con otras alternativas comerciales.

El análisis incluye una descripción de dispositivos disponibles en el mercado, tales como viscosímetros y analizadores de textura, para determinar las ventajas y desventajas de cada uno desde una perspectiva económica y operativa.

9.1. Factores para análisis de prefactibilidad:

9.1.1. Precisión y Aplicabilidad de las Mediciones

El viscosímetro Brookfield es ampliamente reconocido en la industria por su capacidad para medir la viscosidad de una variedad de fluidos, incluyendo aquellos no newtonianos. Ofrece una amplia gama de velocidades de rotación y un rango de viscosidad de 100 a 13,000 cP, con una precisión del $\pm 1\%$ del rango total, lo que lo hace versátil y adaptable a diferentes aplicaciones.

Por otro lado, el retroextrusómetro, aunque menos convencional, ha demostrado ser una herramienta efectiva para obtener mediciones reológicas confiables con un error de mediciones de $\pm 5\%$. Su simplicidad operativa y adaptabilidad lo convierten en una opción viable, especialmente para aplicaciones específicas en la industria alimentaria.

9.1.2. Costos de Adquisición y Operación

El costo de adquisición de un viscosímetro Brookfield puede variar significativamente según el modelo y las características específicas. Por ejemplo, en plataformas como MercadoLibre Argentina, se encuentran viscosímetros Brookfield usados con precios que oscilan entre \$6.000.000 ARS - \$9,250,000 ARS, dependiendo del modelo y su estado.

Ingeniería Mecánica - 2025

Además del costo inicial, es importante considerar los gastos asociados al mantenimiento y calibración periódica de estos equipos para garantizar la precisión de las mediciones.

9.1.3. Envío de Muestras a Laboratorios Especializados

Otra alternativa es enviar muestras a laboratorios especializados para realizar análisis reológicos. Los costos asociados a este servicio pueden variar dependiendo del laboratorio y el tipo de análisis requerido. Por ejemplo, el Laboratorio Físico-Químico del Instituto de la Grasa en España ofrece servicios de preparación de muestras con precios que van desde 2,50 € por unidad para hasta 10 muestras, incrementándose a 6,00 € por unidad para más de 20 muestras.

Además del costo del análisis en sí, es crucial considerar los gastos de envío de las muestras al laboratorio, que pueden variar según la ubicación geográfica y las condiciones de transporte necesarias para preservar la integridad de las muestras.

9.2. Análisis de texturometros disponibles en el mercado

9.2.1. Analizador de Textura Lamy Rheology TX-700

El Lamy Rheology TX-700 es un dispositivo de alto rendimiento diseñado para evaluar las propiedades físicas de una amplia variedad de materiales. Se destaca por su pantalla táctil de 7 pulgadas, que facilita la interacción del usuario, y la posibilidad de utilizar diferentes sensores para adaptarse a diversas aplicaciones industriales. Es especialmente útil en la industria alimentaria y farmacéutica, donde la precisión en el análisis de textura es clave.



Figura 9.1. Analizador de Textura Lamy Rheology Tx-700.

Costo estimado: \$14,370.83 USD.

Fuente: MEGAEQUIPAMIENTO.COM

9.2.2. Analizador de Textura TA.XT Plus

El TA.XT Plus es un analizador versátil y preciso, ampliamente utilizado para medir diversas características físicas de alimentos, cosméticos y productos farmacéuticos, las cuales incluyen la medición de dureza, fracturabilidad, adhesividad y cohesividad, esenciales para garantizar la calidad del producto final.

Este equipo soporta fuerzas de hasta 50 kg, lo que lo hace adecuado para probar tanto productos delicados como materiales más resistentes. Su software avanzado facilita la recolección y análisis de datos, proporcionando resultados reproducibles.



Figura 9.2. Analizador de Textura TA.XT Plus.

Costo estimado: \$5000 USD.

Aplicaciones: Alimentos, geles, adhesivos, productos farmacéuticos y cosméticos.

Fuente: TEXTUROLAB.COM

Ingeniería Mecánica - 2025

9.2.3. Analizador de Textura y Firmeza de Alimentos FTM-50

El FTM-50 es un dispositivo diseñado específicamente para analizar la firmeza y textura de una amplia gama de productos alimenticios. Equipado con un sistema de análisis de perfil de textura (TPA), permite obtener información clave sobre la calidad del producto, como su elasticidad, cohesividad y resistencia al corte. Este equipo tiene una capacidad máxima de 1 kN de fuerza, haciéndolo ideal para productos como carnes, frutas y productos lácteos.

El FTM-50 también incluye un software intuitivo para generar gráficos y resultados comparativos, facilitando la toma de decisiones en procesos de control de calidad.



Figura 9.3. Analizador de Textura y Firmeza de Alimentos FTM-50.

Costo estimado: \$1100 USD.

Fuente: TECHLABSYSTEMS.COM

9.2.4. Analizador de Textura para Alimentos

Este dispositivo, disponible en plataformas como Mercado Libre, es una solución más económica para el análisis de textura en productos alimenticios. Es utilizado principalmente por pequeñas y medianas empresas que buscan evaluar las propiedades físicas de sus productos sin necesidad de invertir en equipos de alta gama.

Aplicaciones: Análisis de textura en productos horneados, carnes, frutas, y productos lácteos.

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025



Figura 9.4. Analizador de Textura para Alimentos.

Costo estimado: \$1100 USD.

Fuente: LISTADO.MERCADOLIBRE.COM.MX

9.2.5. Presupuesto Armado de Taller

9.2.5.1 Presupuesto Dispositivo

Cantidad	Producto	Especificación	Precio
1	Pantalla LCD	I2C 20x4	\$18,500
1	Arduino Uno		\$12,000
1	Set de Cables		\$6,500
2	Botones		\$2,000
1	Potenciómetro	10 kOhm	\$10,000
6	Leds		\$4,500
6	Resistencias	220 Ohm	\$1,800
1	Set Amplificador	Consta de 3 resistencias	\$900

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

	operacional	de 100 Ohm,	
		2 resistencias de 1000 Ohm,	\$900
		2 resistencias de 10000 Ohm	\$900
		y un Amplificador Operacional LM358	\$1,000
		placa agujereada 5x5	\$4,000
1	Impresión 3D	1 kg de PLA	\$21,000
1	Estaño	Rollo	\$10,000
1	Relé	1 canal con entrada TTL	\$3,000
TOTAL			\$102,200

Tabla 9.1. Presupuesto Dispositivo.

9.2.5.2 Presupuesto Baño Termostático de circulación con calefacción

En nuestro proyecto es necesario utilizar un baño termostático para mantener la temperatura externa de nuestro dispositivo a temperatura constante. Además, se necesita que tenga circulación el fluido a través del dispositivo. Debido a las consideraciones solicitadas, se determinó que el valor del baño termostático necesario ronda los valores de 4500 - 5100 USD.

9.2.5.3 Presupuesto Mano de Obra de Dispositivo

Además, hay que tener en cuenta el precio de la mano de obra de este control de temperatura a través de un Arduino.

Estimación de tiempo de trabajo:

- Diseño y ensamblaje del circuito: 6 horas
- Soldadura de componentes y cableado: 4 horas
- Programación del Arduino (código largo y funcional): 10 horas
- Pruebas, depuración y ajustes: 6 horas
- Total estimado: 26 horas

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

Costo de mano de obra:

Si seguimos con una tarifa promedio de \$4,000 ARS por hora, el nuevo cálculo es:

$$26 \text{ horas} \times \$4,000 \text{ ARS} = \$104,000 \text{ ARS}$$

Resumen final del presupuesto:

- Materiales: \$102,200 ARS
- Mano de obra (actualizada): \$104,000 ARS
- Total del proyecto: \$206,200 ARS

9.2.5.4 Presupuesto de Ensayo

Si cada ensayo tiene un costo estimado de entre \$5,000 y \$20,000 ARS por muestra, podemos calcular el costo total considerando las combinaciones de variables.

Cantidad de ensayos:

- Brix: 12.5, 16 y 24 (3 niveles)
- Temperatura: 30°C y 35°C (2 niveles)
- Velocidad: 1 mm/s, 3 mm/s y 5 mm/s (3 niveles)
- Repeticiones: 3 por cada combinación
- Total de ensayos = 3 (Brix) × 2 (Temperaturas) × 3 (Velocidades) × 3 (Repeticiones) = 54 ensayos

Costo estimado:

- Mínimo: 54 ensayos × \$5,000 = \$270,000 ARS
- Máximo: 54 ensayos × \$20,000 = \$1,080,000 ARS

9.3. Análisis de viscosímetros en el mercado

9.3.1. Viscosímetro Brookfield DVNext

El viscosímetro Brookfield DVNext se destaca por su pantalla táctil, que permite la visualización de gráficos en tiempo real durante el ensayo, facilitando un análisis inmediato de los resultados. Este equipo es altamente versátil y compatible con múltiples accesorios, como peines y husillos coaxiales, lo que amplía las posibilidades de adaptación a diferentes tipos de muestras. Además, ofrece una integración sencilla con el software RheocalcT, que permite un análisis detallado y la generación de

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

informes completos. El rango de viscosidad que puede medir es notablemente amplio, desde 1 cP hasta 320 millones de cP, dependiendo del husillo utilizado, lo que lo convierte en una herramienta ideal para ensayos en alimentos de distintas consistencias y comportamientos reológicos.



Figura 9.5. Viscosímetro Brookfield DVNext.

Costo estimado: \$9500 USD.

Fuente: www.brookfieldengineering.com

9.4. Prefactibilidad económica

9.4.1. Introducción

En esta sección, realizaremos un análisis de prefactibilidad económica mediante la elaboración de **flujos de caja proyectados** para cada una de las alternativas propuestas,

Ingeniería Mecánica - 2025

con el fin de comparar la rentabilidad y viabilidad económica de cada opción. El objetivo es determinar cuál de las alternativas representa la mejor oportunidad en términos de costos, ingresos proyectados y retorno de inversión. Para ello, consideraremos tanto nuestra situación actual como los costos asociados a los servicios ofrecidos por dos laboratorios especializados.

9.4.2. Alternativas Consideradas

- **Opción 1: Adquisición de Equipamiento Propio:**
Descripción del costo inicial, costos operativos y mantenimiento. Ingreso proyectado por ensayo y tiempo de recuperación de la inversión.
- **Opción 2: Envío de Muestras a Laboratorio Especializado N°1:**
Descripción del costo por ensayo, costo de envío de las muestras, y comparación del tiempo y costo total para obtener resultados.
- **Opción 3: Envío de Muestras a Laboratorio Especializado N°2:**
Descripción del costo por ensayo, costo de envío de las muestras, y comparación del tiempo y costo total para obtener resultados.

9.4.3. Suposiciones y Parámetros del Análisis

Factores clave a incluir:

- **Horizonte de tiempo:** ¿Durante cuántos años evaluarán la viabilidad? Generalmente 5 años es un estándar.
- **Costo de inversión inicial:** Equipamiento propio vs. costo de envío y ensayo externo.
- **Costos operativos:** Mantenimiento de equipos, costos de insumos, calibración anual.
- **Precio por ensayo:** Tarifa a cobrar por cada ensayo si se realiza en la facultad.
- **Número de ensayos proyectados:** ¿Cuántos ensayos se realizarán por año? Considerar la capacidad máxima.
- **Costo de oportunidad:** Alternativas económicas comparables.
- **Tasa de descuento:** Si quieres calcular el Valor Actual Neto (VAN).
- **Tasa de inflación o ajuste de costos:** Proyectar el aumento de costos a lo largo del tiempo.

Ingeniería Mecánica - 2025

9.4.3.1. Determinación de la tasa de descuento

Para ajustar la tasa de descuento y reflejar los riesgos específicos de la inversión en la industria alimenticia (procesamiento de fluidos no newtonianos) y la industria cosmética en Argentina, consideraremos varios factores adicionales de riesgo:

Factores a Considerar en la Tasa de Descuento

1. Tasa Libre de Riesgo
 - 4,69% (Bonos del Tesoro de EE.UU. a 10 años en enero de 2025).
2. Riesgo País
 - 5,90% (Promedio del riesgo país argentino en enero de 2025).
3. Riesgo Sectorial - Industria Alimenticia (Fluidos No Newtonianos)
 - Procesos de fluidos no newtonianos pueden requerir equipos especializados y altos costos de inversión en infraestructura.
 - Riesgos asociados a la calidad del producto y cumplimiento de normativas sanitarias.
 - Alta regulación y costos de cumplimiento en Argentina.
 - Se estima un +3,0% adicional.
4. Riesgo Sectorial - Industria Cosmética
 - Fuerte competencia con productos importados y locales.
 - Dependencia de materias primas, muchas de ellas importadas y sujetas a fluctuaciones cambiarias.
 - Regulaciones específicas para cosméticos en términos de salud y seguridad.
 - Estimamos un +2,5% adicional.
5. Riesgo Cambiario y Macroeconómico en Argentina
 - Alta volatilidad del tipo de cambio.
 - Incertidumbre en la política económica y fiscal.
 - Inflación elevada que puede afectar los costos operativos.
 - Se agrega un +4,0% adicional.
6. Riesgo Financiero y de Liquidez
 - Dificultad para acceder a financiamiento en pesos o dólares a tasas competitivas.
 - Altos costos financieros debido a la prima de riesgo del país.
 - Estimamos un +3,0% adicional.
7. Riesgo Empresarial y de Ejecución
 - Riesgos relacionados con la implementación del proyecto (retrasos, costos adicionales).

Ingeniería Mecánica - 2025

- Capacidad de gestión y experiencia en el sector.
- Posibles barreras de entrada y estrategias de diferenciación necesarias.
- Se agrega un +2,0% adicional.

Tasa de descuento $[r] = 4,69\% + 5,90\% + 3,0\% + 2,5\% + 4,0\% + 3,0\% + 2,0\% \cong 25 \%$

9.4.6. Elaboración del Flujo de Caja

Se presentará un flujo de caja proyectado que permita evaluar la viabilidad económica del proyecto. Para ello, se costeará la realización de un número idéntico de ensayos en cada alternativa, lo que garantizará una comparación homogénea. Posteriormente, se utilizarán herramientas financieras como: el Valor Actual Neto (VAC) y el Coste Anual Equivalente (CAE), para identificar la opción más conveniente desde el punto de vista económico.

- Año
- Costos fijos y variables (mantenimiento, insumos, calibración, etc.)
- Inversión inicial (en el año 0)
- Flujo de caja neto por año

Tabla 9.2. Flujo de Caja.

Año	Ingresos (ARS)	Costos Fijos (ARS)	Costos Variables (ARS)	Inversión Inicial (ARS)	Flujo de Caja Neto (ARS)
0	0	0	0	-2.000.000	-2.000.000
1	500.000	50.000	100.000	0	350.000
2	600.000	60.000	120.000	0	420.000

9.4.7. Análisis de Resultados

Analiza el flujo de caja para cada alternativa. Considera aspectos como:

Valor Actual Neto (VAN / VAC): Si aplicas una tasa de descuento, este cálculo te ayudará a determinar la rentabilidad real del proyecto. Usaremos el VAC debido a que solo estimaremos en base a costos, y no dependerá de los beneficios del servicio, para un análisis más preciso y homogéneo.

Costo Anual Equivalente (CAE): ¿Cuál es el costo anual a lo largo del tiempo considerando todos los factores?

Ingeniería Mecánica - 2025

9.5 Análisis de Proyecto

En el análisis del proyecto se evaluarán tres alternativas distintas.

1° La primera alternativa consiste en utilizar el equipamiento proporcionado por la facultad, como el baño termostático y el texturómetro, mientras que nuestro aporte se centrará en el desarrollo y suministro del dispositivo de control de temperatura, además de brindar el servicio de realización de ensayos.

Tabla 9.3. Costos y Beneficios.

Alt 1							
Costos Insumos/hs	\$1,000	Ensayos por Hs	4	Precio Ensayo	\$4,813	CF/Anual	\$9,600,000
Sueldo de Operario/Hs	\$6,000	Ensayos por Mes	320	Beneficio Anual	\$18,480,000	CV/Anual	\$960,000
Prima Facultad/Hs	\$4,000	Hs Laborables	160	Sueldo Op/Mes	\$660,000		
Costo Total Ensayo/Hs	\$11,000	Ensayos Lab	640	Sueldo Op/Hs	\$2,063		
Costo Total Ensayo/Anual	\$10,560,000	Ensayos Lab/Año	3840	Dias Lab	20		
Costo Total/Ensayo	\$2,750						

Tabla 9.4. Flujo de Caja.

ALT 1 = USAR EN LA FACULTAD						
Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	-\$206,200					
Costo fijo anual		-\$9,600,000	-\$9,600,000	-\$9,600,000	-\$9,600,000	-\$9,600,000
Costo variable		-\$960,000	-\$960,000	-\$960,000	-\$960,000	-\$960,000
Flujo de Caja	-\$206,200	-\$10,560,000	-\$10,560,000	-\$10,560,000	-\$10,560,000	-\$10,560,000

Tasa de desc (r)	0.25	VAC	-\$28,604,997	CAE	-\$10,636,675
------------------	------	-----	---------------	-----	---------------

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

2° La segunda alternativa consiste en evaluar la adquisición del equipamiento proporcionado por la facultad, como el baño termostático y el texturómetro, mientras que nuestro aporte incluirá el suministro del dispositivo de control de temperatura y la realización de los ensayos.

Tabla 9.5. Costos y Beneficios.

Alt 2							
Costos Insumos/Hs	\$1,000	Ensayos por Hs	4	Precio Ensayo	\$4,800	CF/Anual	\$9,600,000
Sueldo de Operario/Hs	\$8,000	Ensayos por Mes	400	Beneficio Anual	\$23,040,000	CV/Anual	\$1,200,000
Prima Facultad/Hs	\$0	Hs laborables	160	Sueldo Op/mes	\$1,280,000		
Costo Total Ensayo/Hs	\$9,000	Ensayos Lab	640	Sueldo Operario/hs	\$8,000	Texturometro	\$6,000,000
Costo Total Ensayo/Anual	\$10,800,000	Ensayos Lab/Año	4800	Dias Lab	20	Dispositivo	\$206,200
Costo Total/Ensayo	\$2,250					Baño Térmico	\$5,400,000

Tabla 9.6. Flujo de Caja.

ALT 2 = COMPRAR EQUIPAMIENTO						
Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	-\$11,606,200					
Costo fijo anual		-\$9,600,000	-\$9,600,000	-\$9,600,000	-\$9,600,000	-\$9,600,000
Costo variable		-\$1,200,000	-\$1,200,000	-\$1,200,000	-\$1,200,000	-\$1,200,000
Flujo de Caja	-\$11,606,200	\$12,240,000	\$12,240,000	\$12,240,000	\$12,240,000	\$12,240,000

Tasa de desc (r)	0.25	VAC	-\$40,650,424	CAE	-\$15,115,728
------------------	------	-----	---------------	-----	---------------

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

3° La tercera alternativa consiste en evaluar la tercerización del servicio de ensayos, lo que implicaría costos adicionales asociados, como fletes y otros gastos logísticos.

Tabla 9.7. Flujo de Caja.

ALT 3 = TERCERIZAR ENSAYOS						
Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	0					
Costo fijo anual		\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Costo variable		-\$ 42,044,444	-\$ 42,044,444	-\$ 42,044,444	-\$ 42,044,444	42,044,444
Beneficios		0	0	0	0	0
Flujo de Caja	0	-\$42,044,444	-\$42,044,444	-\$42,044,444	-\$42,044,444	-\$42,044,444

Tasa de desc (r)	0.25	VAC	-\$113,069,284	CAE	-\$42,044,444
------------------	------	-----	----------------	-----	---------------

Elección de la Mejor Alternativa

La alternativa más conveniente es la Alternativa 1, ya que tiene el menor VAC (-\$28,604,997), lo que indica que en términos de costo total actualizado es la opción más económica. Presenta el menor CAE (-\$10,636,675), lo que significa un menor costo anual en comparación con las otras opciones.

Aunque la inversión inicial es mayor que la Alternativa 3, el costo total en el horizonte de evaluación es significativamente menor.

La alternativa que menos conviene es la alternativa 3, ya que a pesar de no requerir inversión inicial, su VAC (-\$113,069,284) es el más alto, lo que implica el mayor costo total actualizado. Su CAE (-\$42,044,444) es el más elevado, indicando el mayor costo anual.

Ingeniería Mecánica - 2025

10. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los datos experimentales obtenidos, se confirma la importancia del estudio reológico en la caracterización de alimentos semisólidos. Se demostró que el índice de flujo influye directamente en la aceptabilidad sensorial, la procesabilidad industrial y la estabilidad del producto final. Los resultados evidencian que los alimentos analizados presentan un comportamiento pseudoplástico con un índice de flujo de aproximadamente 0.21, lo que facilita su manipulación durante la producción, mejora la experiencia de consumo y optimiza su comportamiento en almacenamiento. Además, la aplicación de metodologías accesibles para la medición reológica permite extender estos beneficios a sectores industriales con menor capacidad de inversión en equipamiento especializado.

10.1 Relación del índice de flujo con la aceptación de los alimentos

El análisis reológico de los alimentos es un factor determinante en su aceptación sensorial, facilidad de consumo y procesabilidad industrial. En esta investigación, se estudió la relación entre el índice de flujo y la percepción del consumidor, así como su impacto en la manipulación y procesamiento de los alimentos. A partir de los datos obtenidos, se analizaron los efectos del índice de flujo en la experiencia de ingestión, su comparación con equipos de análisis convencionales y su aplicabilidad en la industria alimentaria.

El estudio permitió determinar que los alimentos analizados presentan un índice de flujo (n) de aproximadamente 0.21, lo que los clasifica dentro de los fluidos pseudoplásticos. Este comportamiento reológico implica que su viscosidad disminuye con el esfuerzo aplicado, favoreciendo tanto su procesabilidad durante la producción como su facilidad de consumo. Este aspecto es clave para garantizar la calidad del producto final en términos de textura, estabilidad y aceptación del consumidor.

10.2. Relación entre el índice de flujo y la aceptación sensorial de los alimentos

Diversos estudios han demostrado que los alimentos con índices de flujo entre 0.1 y 0.3 son percibidos como más suaves y fáciles de consumir en comparación con aquellos con índices de flujo entre 0.6 y 0.9, que presentan un comportamiento más cercano al de fluidos newtonianos o dilatantes. En la industria alimentaria, esta relación es clave para la aceptación del consumidor, ya que la percepción sensorial del espesor y la facilidad

Ingeniería Mecánica - 2025

de ingestión influyen directamente en la preferencia del producto. Productos como purés, yogures bebibles y salsas buscan situarse en este rango de índices de flujo para mejorar la experiencia del consumidor y garantizar una sensación de textura agradable y homogénea.

Estudios sobre percepción de textura y aceptación de alimentos en distintos rangos de índice de flujo han indicado que:

- $n \approx 0.1 - 0.3$: Se asocia con productos fáciles de tragar, con buena estabilidad y que mantienen una consistencia uniforme sin formar grumos. Son ampliamente aceptados por consumidores en distintos grupos etarios, incluidas personas mayores y niños.
- $n \approx 0.6 - 0.9$: Se relaciona con productos que ofrecen resistencia al flujo, percibidos como más densos y menos homogéneos en boca, lo que puede afectar negativamente la experiencia sensorial.

La reología no solo influye en la aceptación del consumidor, sino que también impacta directamente en la manipulación y procesamiento de los alimentos durante su fabricación. En el contexto de la producción industrial, los alimentos con un índice de flujo de 0.21 presentan ventajas operativas, ya que permiten:

- **Facilidad de bombeo y llenado:** Durante el procesamiento, los fluidos pseudoplásticos fluyen con mayor facilidad al ser sometidos a esfuerzo de corte, lo que facilita su transporte mediante tuberías y sistemas de bombeo sin riesgo de atascos.
- **Mejor control de la viscosidad en procesos térmicos:** En tratamientos térmicos como la pasteurización o esterilización, los alimentos deben mantener una viscosidad controlada para garantizar la transferencia de calor uniforme, reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento o subproceso.
- **Optimización en el envasado y estabilidad en almacenamiento:** Productos con un índice de flujo adecuado presentan una textura estable y homogénea tras el envasado, evitando fenómenos como la sedimentación o la separación de fases.

La formulación de productos con índices de flujo dentro del rango óptimo no solo mejora la aceptabilidad del consumidor, sino que minimiza problemas operativos en la producción, lo que es clave para lograr procesos eficientes y escalables en la industria alimentaria.

Ingeniería Mecánica - 2025

10.3. Impacto en la deglución y adaptabilidad para personas con dificultades

Un aspecto crucial de la investigación es su aplicación en el desarrollo de **alimentos adaptados para personas con problemas de deglución** (disfagia). La disfagia es una condición prevalente en adultos mayores y en personas con patologías neuromusculares, donde la textura del alimento juega un papel determinante en la seguridad y comodidad de la ingesta.

Los alimentos con **índice de flujo en el rango 0.1 - 0.3** (coincidente con los resultados obtenidos) **favorecen la fluidez en boca y reducen el riesgo de aspiración o atragantamiento**, ya que permiten una mejor formación del bolo alimenticio y facilitan el transporte a través del esófago. Por el contrario, productos con **índices superiores a 0.6** pueden generar resistencia al flujo, dificultando la deglución y aumentando el esfuerzo necesario para el consumo, lo que puede resultar en fatiga y rechazo por parte del paciente.

Desde un enfoque aplicado, los resultados obtenidos permiten sugerir que los productos evaluados pueden ser utilizados en la formulación de **dietas especializadas para personas con disfagia**, cumpliendo con recomendaciones de instituciones como la **IDDSI (International Dysphagia Diet Standardisation Initiative)**, que establece estándares para la consistencia de alimentos según su facilidad de ingestión.

Estos hallazgos no solo permiten comprender cómo la reología impacta la aceptación del consumidor, sino que también pueden servir como base para el desarrollo de alimentos funcionales adaptados a necesidades específicas, incluyendo formulaciones para poblaciones con dificultades de deglución. Además, al validar métodos de análisis accesibles, se abre la posibilidad de que pequeñas y medianas empresas puedan innovar en la industria sin necesidad de grandes inversiones en equipos especializados.

10.4. Comparativa con el viscosímetro brookfield y otros equipos de análisis textural

Si bien el viscosímetro rotacional Brookfield es una herramienta ampliamente utilizada en la industria para la medición de viscosidad, su costo y complejidad pueden representar una barrera para su uso en ciertos sectores. La metodología empleada en esta investigación demuestra que es posible obtener mediciones reológicas confiables a través de métodos más accesibles, lo que amplía su aplicabilidad en la industria

Ingeniería Mecánica - 2025

alimentaria, especialmente para pequeños y medianos productores. Esto representa una ventaja significativa en términos de costo-eficiencia, sin comprometer la calidad de los datos obtenidos.

En comparación con equipos más costosos como el viscosímetro rotacional Brookfield y los analizadores de texturas utilizados en las industrias farmacéutica y cosmética, el enfoque empleado en esta investigación presenta ventajas significativas desde una perspectiva económica y de simplicidad operativa.

1. **Costo-Eficiencia:** Mientras que los equipos de alta precisión como el Brookfield ofrecen resultados altamente detallados y son estándar en sectores industriales especializados, la metodología propuesta en este trabajo utiliza tecnologías accesibles que, aunque menos sofisticadas, permiten obtener resultados confiables y aplicables en el sector alimentario. Esto lo convierte en una herramienta económicamente viable para pequeñas y medianas empresas, o incluso para instituciones académicas.
2. **Adaptabilidad:** La metodología planteada puede ajustarse fácilmente a diversas aplicaciones alimentarias, lo que la hace más versátil en comparación con los equipos de análisis textural de mayor costo.
3. **Análisis de Factibilidad:** Se propone un análisis simple de factibilidad donde el aporte institucional (Facultad) representaría el 40% del costo inicial, mientras que el especialista cubriría el 60%. Este esquema busca promover la accesibilidad de estas herramientas en sectores con recursos limitados.

10.5. Presentación de resultados: modelo alimentario y beneficios en la salud

La caracterización de los alimentos según su índice de flujo y sus propiedades reológicas permite definir un modelo que relaciona estas características con beneficios tangibles para la salud y la percepción de los consumidores.

1. **Facilidad de Ingestión:** Los alimentos con propiedades pseudoplásticas o de flujo ajustado a los índices más aceptados facilitan su incorporación en dietas específicas para personas con dificultades de deglución (ejemplo: disfagia) o digestión, mejorando su calidad de vida.
2. **Percepción Positiva en la Salud:** Los alimentos que se ajustan a estos modelos suelen ser percibidos como más saludables debido a su textura y facilidad de

Ingeniería Mecánica - 2025

consumo, reduciendo el esfuerzo necesario para procesarlos y favoreciendo la adherencia a dietas balanceadas.

3. **Relación con Investigaciones Previas:** Este modelo está respaldado por investigaciones reológicas que avalan cómo la textura y el comportamiento de flujo afectan la percepción y la aceptación de los alimentos, creando una conexión directa entre el análisis científico y las necesidades de los consumidores.
4. **Impacto en la Industria Alimentaria:** Este enfoque presenta oportunidades de innovación en el diseño de alimentos funcionales, dirigidos a poblaciones específicas, con beneficios para su comercialización y aceptación en el mercado.

10.6. CONSIDERACIONES FINALES Y APLICACIONES FUTURAS

- Se confirma que los alimentos con **índices de flujo cercanos a 0.21** presentan ventajas en términos de **aceptación sensorial, facilidad de deglución y adaptabilidad para distintos grupos de consumidores.**
- Se destaca el beneficio de utilizar métodos de análisis reológico más accesibles, en comparación con equipos sofisticados como el viscosímetro Brookfield, facilitando estudios en entornos de producción y desarrollo de alimentos funcionales.
- La información obtenida puede ser utilizada para diseñar **nuevas formulaciones dirigidas a poblaciones vulnerables**, como adultos mayores o pacientes con necesidades específicas de alimentación.

En conclusión, esta investigación evidencia la importancia del análisis reológico en la aceptación de los alimentos y su impacto en la experiencia del consumidor. Los resultados obtenidos no solo permiten establecer criterios para la optimización de formulaciones alimenticias, sino que también abren nuevas oportunidades para el desarrollo de productos con beneficios específicos para la salud, particularmente en el ámbito de la nutrición especializada. La implementación de metodologías accesibles para el análisis reológico facilita la innovación en el sector y promueve el desarrollo de soluciones alimentarias adaptadas a las necesidades de los consumidores.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zhenhua Duan , Shaodan Hou. (2023) Rheological properties of fresh recycled concrete. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Pages 59-83
- [2] Nnyigide OS (2019) A Study of Bovine Serum Albumin (BSA) Hydrogel with Various Chemical Denaturants by Rheological Measurements and Molecular Dynamics Simulation, Ph.D. Thesis. Pusan National University.
- [3] Borwankar RP (1992) Food texture and rheology: a tutorial review. J Food Eng 16:1–16. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(92\)90016-Y](https://doi.org/10.1016/0260-8774(92)90016-Y)
- [4] Melito HS, Daubert CR (2011) Rheological innovations for characterizing food material properties. Annu Rev Food Sci Technol 2:153–179. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022510-133626>
- [5] Tabilo-Munizaga G, Barbosa-Cánovas GV (2005) Rheology for the food industry. J Food Eng 67:147–156. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.062>
- [6] McKenna BM, Lyng JG, (2003), Introduction to Food Rheology and its Measurement. Texture in Food, 2003(1): 130–160.
- [7] L. C. Davis, (1997). Time-dependent and nonlinear effects in electrorheological fluids. J Chem Phys. 81:4 1985–91.
- [8] Lee, B. and S. Koo, (2014). Estimation of microstructure of titania particulate dispersion through viscosity measurement, Powder Technol. 266, 16–21.
- [9] Nasser, M.S., M.J. Al-Marri, A. Benamor, S.A. Onaizi, M. Khraisheh and M.A. Saad, (2016), Flocculation and viscoelastic behavior of industrial papermaking suspensions, Korean J. Chem. Eng. 33, 448–455.
- [10] Clavijo, S., Membrives, F., Boccaccini, Al., Santillán M. (2014) Characterization of polyetheretherketone particle suspensions for electrophoretic deposition. Journal of applied Polymer science June 2014 <https://doi.org/10.1002/app.40953>
- [11] Muñoz Puntos; Luis A. Rubio y María S. Cabeza (2012) “Comportamiento de flujo y caracterización fisicoquímica de pulpas de durazno” Scientia Agropecuaria, Vol. 2 , 107-116.
- [12] Muñoz Puntos, Rubio L., Eirin R., Roggiero A. y Possa, H. Comparación de Técnicas de Retroextrusión y Viscosimetría Rotacional en Fluidos No-Newtonianos. XX Jornadas de Investigación y II Jornadas de Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo” – 12 al 14 de setiembre de 2006 en Mendoza

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

[13] Fernandez, C.; Alvarez, M.C; Canet, W. (2008) Steady shear and yield stress of fresh and frozen mashed potatoes, effect of biopolymers addition. *Foods Hydrocolloids* 22 (7).

[14] Bourne, M.C. (1975) "Texture measurement in vegetables". Reidel Publishing Co. Boston

[15] Austerlitz Howard, (2003) *Data Acquisition Techniques Using PCs* (Second Edition)

Ingeniería Mecánica - 2025

12. ANEXOS

12.1. Cálculos de las regresion lineal

Código

#----*Sensor*----

#Datos de los grados y del valor de señal recibido en el Arduino

GRADOS=c(21, 25, 28, 29.5, 32, 34.5, 37.5, 40, 42.5, 44.5, 49, 51.5, 53.5, 56.25, 58.5, 61, 63, 66, 20.5, 24, 26, 30, 33.25, 38, 41, 46, 47.5, 50, 60, 64.5, 19.25, 25.5, 30.25, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65)

SEÑAL=c(381.7, 405.64, 423.1, 439.11, 456.69, 475.21, 496.54, 513.89, 534.78, 535.25, 570.59, 584.12, 594.63, 618.9, 633.72, 648.02, 664.15, 678.81, 333.77, 355.22, 374.23, 401.94, 429.5, 498.1, 512.17, 542.44, 551.06, 568.46, 624.74, 645.58, 310.84, 373.88, 413.84, 473.26, 518.27, 547.08, 556.31, 580.46, 623.19, 672.36)

Datos

colores <- c(rep("red", 18), rep("blue", 12), rep("green", length(GRADOS) - 30))

Crear gráfico con límites de los ejes

plot(SEÑAL, GRADOS, col=colores, pch=19, xlim=c(300, 700), ylim=c(0, 70))

Eje X

axis(1, at = c(300, 325, 350, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 525, 550, 575, 600, 625, 650, 675, 700))

Eje Y

axis(2, at = c(0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70))

grid(nx=25,

ny=14)

Añadir la leyenda

legend("topleft", legend=c("Datos Calibración 1", "Datos Calibración 2", "Datos Calibración 3", "Línea de Regresión Lineal"),

col=c("blue", "red", "green", "black"), pch=c(19, 19, 19, NA), lty=c(NA, NA, NA, 1), bty="o", bg="white", cex=1.2)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

#Obtención de Ordenada al Origen y Pendiente de la Curva

```
modelo=lm(GRADOS~SEÑAL)
```

```
modelo
```

#Otros datos

```
summary(modelo)
```

```
abline(modelo)
```

#Valor de Ordenada al Origen

```
beta0=modelo$coefficients[1]
```

```
beta0
```

#Valor de Pendiente

```
beta1=modelo$coefficients[2]
```

```
beta1
```

Resultados

```
> modelo
```

```
Call:
```

```
lm(formula = GRADOS ~ SEÑAL)
```

```
Coefficients:
```

```
(Intercept)    SEÑAL
```

```
-27.3300    0.1358
```

```
> #Otros datos
```

```
> summary(modelo)
```

```
Call:
```

```
lm(formula = GRADOS ~ SEÑAL)
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-3.5038	-2.1720	-0.1149	2.1074	4.3688

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-27.330009	1.899131	-14.39	<2e-16 ***
SEÑAL	0.135797	0.003626	37.45	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.309 on 38 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.9736, Adjusted R-squared: 0.9729
 F-statistic: 1403 on 1 and 38 DF, p-value: < 2.2e-16

```

> abline(modelo)
> #Valor de Ordenada al Origen
> beta0=modelo$coefficients[1]
> beta0
(Intercept)
-27.33001
> #Valor de Pendiente
> beta1=modelo$coefficients[2]
> beta1
SEÑAL
0.1357972
  
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

> $modelo_{est} = \beta_0 + (\beta_1 * SEÑAL)$

> $modelo_{est}$

[1] 24.50377 27.75476 30.12577 32.29989 34.68720 37.20217 40.09872 42.45480
45.29160

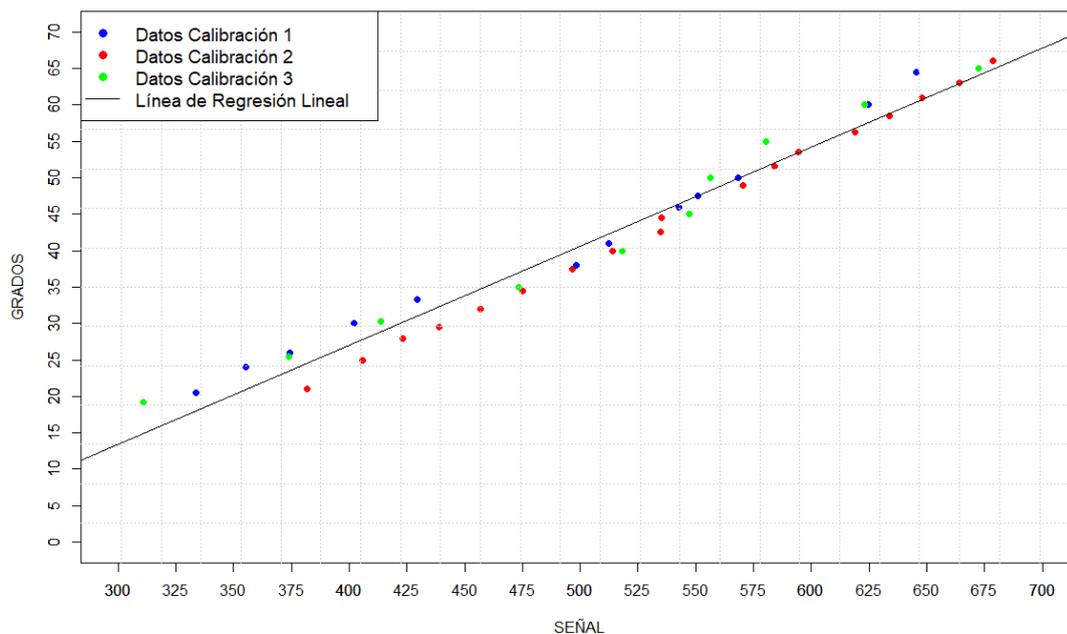
[10] 45.35543 50.15450 51.99184 53.41906 56.71486 58.72738 60.66927 62.85968
64.85047

[19] 17.99501 20.90786 23.48937 27.25231 30.99488 40.31056 42.22123 46.33181
47.50238

[28] 49.86525 57.50792 60.33793 14.88118 23.44184 28.86829 36.93736 43.04959
46.96191

[37] 48.21532 51.49482 57.29743 63.97458

> $\#modelo_{final} = 0.1357972 * señal - 27.3301$



12.2. Código del arduino

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
// Pines para los LEDs, botones y relé
```

```
const int ledAmarillo = 2;
```

```
const int ledVerde = 3;
```

```
const int ledRojo = 4;
```

```
const int ledAmarilloTemp = 5;
```

```
const int ledVerdeTemp = 6;
```

```
const int ledRojoTemp = 7;
```

```
const int botonEdicion = 8;
```

```
const int botonInicio = 9;
```

```
const int relePin = 10; // Pin para el relé
```

```
// Variables para los setpoints y duración
```

```
float setPointLow = 39.0;
```

```
float setPointHigh = 41.0;
```

```
int duracion = 60;
```

```
float temperaturaActual = 0.0;
```

```
// Estados de la máquina de estados
```

```
enum Estado {PREPARADO, EDICION_SPL, EDICION_SPH, EDICION_DURACION,  
INICIO};
```

Ingeniería Mecánica - 2025

Estado estadoActual = PREPARADO;

unsigned long tiempoInicio = 0; // Variable para almacenar el tiempo de inicio

bool conteoEnCurso = false; // Bandera para indicar si el conteo está en curso

// Variables para el temporizador de impresión

unsigned long ultimoTiempoImpresion = 0;

const unsigned long intervaloImpresion = 1000; // 1 segundo

// Variables para la medición de temperatura

const unsigned long intervaloMedicion = 1000; // 1 segundo para tomar una nueva medición

const unsigned long tiempoPromedio = 10000; // 10 segundos para actualizar el promedio

unsigned long ultimoTiempoMedicion = 0;

unsigned long ultimoTiempoPromedio = 0;

float sumaTemperaturas = 0;

int contadorMediciones = 0;

float promedioAnterior = 0.0;

// Inicializar la pantalla LCD 20x4

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

void setup() {

pinMode(ledAmarillo, OUTPUT);

Ingeniería Mecánica - 2025

```
pinMode(ledVerde, OUTPUT);
pinMode(ledRojo, OUTPUT);

pinMode(ledAmarilloTemp, OUTPUT);
pinMode(ledVerdeTemp, OUTPUT);
pinMode(ledRojoTemp, OUTPUT);

pinMode(botonEdicion, INPUT_PULLUP);
pinMode(botonInicio, INPUT_PULLUP);
pinMode(relePin, OUTPUT); // Configurar el pin del relé como salida

Serial.begin(9600);

// Inicializar la pantalla LCD
lcd.init();
lcd.backlight();

// Inicializar el sistema en modo preparado
estadoActual = PREPARADO;
digitalWrite(ledAmarillo, HIGH);
mostrarTextoCentrado("Dispositivo Listo", 1);
mostrarTextoCentrado("para Configurar", 2);
digitalWrite(ledVerde, LOW);
digitalWrite(ledRojo, LOW);
}
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
void loop() {  
    // Control de LEDs y relé según la temperatura  
    controlarLedsTemperatura();  
    controlarRelé();  
  
    // Control de botones y edición de parámetros  
    manejarEdicion();  
  
    // Tomar mediciones de temperatura y calcular promedio (solo si estamos en Modo  
    Ejecución)  
    if (estadoActual == INICIO) {  
        tomarMediciones();  
    }  
  
    // Imprimir valores en el monitor serial  
    if (estadoActual == INICIO) {  
        imprimirValoresSerial();  
    }  
  
    // Llama a la función de inicio de conteo  
    inicioConteo();  
}
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
// Imprimir valores en la pantalla LCD si estamos en Modo Ejecución
if (estadoActual == INICIO) {
    imprimirValoresContinuos();
}

// Imprimir valores del potenciómetro en modo edición
if (estadoActual == EDICION_SPL || estadoActual == EDICION_SPH || estadoActual ==
EDICION_DURACION) {
    mostrarValorPotenciometro();
}

delay(100); // Esperar 100 ms para no saturar la CPU
}

// Función para iniciar el conteo cuando se presiona el botón
void inicioConteo() {
    if (digitalRead(botonInicio) == LOW) { // Verifica si el botón está presionado
        if (!conteoEnCurso) {
            tiempoInicio = millis(); // Guarda el tiempo en que se presionó el botón
            conteoEnCurso = true; // Indica que el conteo ha comenzado
        }
    }
}

if (conteoEnCurso) {
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

```
unsigned long tiempoContador = millis();

unsigned long tiempoTranscurrido = (tiempoContador - tiempoInicio) / 1000; // Tiempo
transcurrido en segundos

// Aquí puedes hacer algo con el tiempo transcurrido, como actualizar la pantalla LCD
Serial.print(tiempoTranscurrido);
Serial.print(",");
Serial.print(temperaturaActual);
Serial.print(",");
Serial.print(setPointLow);
Serial.print(",");
Serial.println(setPointHigh);
delay(1000);
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print("Duracion: ");
lcd.print(tiempoTranscurrido/60);
lcd.print("/");
lcd.print(duracion);
}
}

// Función para leer la temperatura de la PTC
float leerTemperatura() {
int ADCVar = analogRead(A1);
float temperaturaActual = 0.1292 * ADCVar - 16.77;
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
return temperaturaActual;
```

```
}
```

```
// Función para tomar mediciones de temperatura y calcular promedio
```

```
void tomarMediciones() {
```

```
    unsigned long tiempoActual = millis();
```

```
    if (tiempoActual - ultimoTiempoMedicion >= intervaloMedicion) {
```

```
        ultimoTiempoMedicion = tiempoActual;
```

```
        float nuevaMedicion = leerTemperatura();
```

```
        // Verificar si la nueva medición varía más de 1 grado respecto al promedio anterior
```

```
        if (contadorMediciones == 0 || abs(nuevaMedicion - promedioAnterior) <= 1.0) {
```

```
            sumaTemperaturas += nuevaMedicion;
```

```
            contadorMediciones++;
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    if (tiempoActual - ultimoTiempoPromedio >= tiempoPromedio) {
```

```
        ultimoTiempoPromedio = tiempoActual;
```

```
        if (contadorMediciones > 0) {
```

```
            temperaturaActual = sumaTemperaturas / contadorMediciones;
```

```
            sumaTemperaturas = 0;
```

```
            contadorMediciones = 0;
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
    promedioAnterior = temperaturaActual; // Actualizar el promedio anterior
  }
}
}
```

// Función para imprimir valores en el monitor serial

```
void imprimirValoresSerial() {
    static unsigned long ultimoTiempoImpresionSerial = 0;
    if (millis() - ultimoTiempoImpresionSerial >= intervaloImpresion) {
        ultimoTiempoImpresionSerial = millis();

        // Imprimir valores actuales en el monitor serial
        unsigned long tiempo = millis() / 1000; // Convertir tiempo a segundos

    }
}
```

// Función para controlar los LEDs según la temperatura

```
void controlarLedsTemperatura() {
    if (temperaturaActual < setPointLow) {
        digitalWrite(ledAmarilloTemp, HIGH);
        digitalWrite(ledVerdeTemp, LOW);
        digitalWrite(ledRojoTemp, LOW);
    } else if (temperaturaActual <= setPointHigh) {
        digitalWrite(ledAmarilloTemp, LOW);
    }
}
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
digitalWrite(ledVerdeTemp, HIGH);
digitalWrite(ledRojoTemp, LOW);
} else {
digitalWrite(ledAmarilloTemp, LOW);
digitalWrite(ledVerdeTemp, LOW);
digitalWrite(ledRojoTemp, HIGH);
}
}

// Función para controlar el relé según la temperatura
void controlarRele() {
if (estadoActual == INICIO) {
if (temperaturaActual < setPointLow) {
digitalWrite(relePin, HIGH); // Encender el relé
} else if (temperaturaActual > setPointHigh) {
digitalWrite(relePin, LOW); // Apagar el relé
}
}
}

// Función para manejar la edición de los setpoints y duración
void manejarEdicion() {
if (digitalRead(botonEdicion) == LOW) {
delay(200); // Anti-rebote
if (estadoActual == PREPARADO) {
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
estadoActual = EDICION_SPL;
digitalWrite(ledAmarillo, LOW);
digitalWrite(ledRojo, HIGH);
lcd.clear();
mostrarTextoCentrado("Modo Edicion:", 0);
mostrarTextoCentrado("Editando SPL:", 1);
} else if (estadoActual == EDICION_SPL) {
  setPointLow = map(analogRead(A0), 0, 1023, 10, 70);
  estadoActual = EDICION_SPH;
  lcd.clear();
  mostrarTextoCentrado("Modo Edicion:", 0);
  mostrarTextoCentrado("Editando SPH:", 1);
} else if (estadoActual == EDICION_SPH) {
  setPointHigh = map(analogRead(A0), 0, 1023, 10, 70);
  estadoActual = EDICION_DURACION;
  lcd.clear();
  mostrarTextoCentrado("Modo Edicion:", 0);
  mostrarTextoCentrado("Editando Duracion:", 1);
} else if (estadoActual == EDICION_DURACION) {
  duracion = map(analogRead(A0), 0, 1023, 30, 240);
  lcd.clear();
  estadoActual = PREPARADO;
  digitalWrite(ledRojo, LOW);
  digitalWrite(ledAmarillo, HIGH);
  mostrarTextoCentrado("Dispositivo", 0);
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
mostrarTextoCentrado("Configurado", 1);
mostrarTextoCentrado("Listo para Ejecutar", 2);
}
delay(500); // Anti-rebote
}

if (digitalRead(botonInicio) == LOW) {
  delay(200); // Anti-rebote
  if (estadoActual == PREPARADO) {
    estadoActual = INICIO;
    digitalWrite(ledAmarillo, LOW);
    digitalWrite(ledVerde, HIGH);
    lcd.clear();
    mostrarTextoCentrado("Modo Ejecucion", 0);
    mostrarTextoCentrado("Controlando...", 1);
  }
  delay(500); // Anti-rebote
}
}

// Función para mostrar texto centrado en la pantalla LCD
void mostrarTextoCentrado(String texto, int fila) {
  int espacios = (20 - texto.length()) / 2;
  lcd.setCursor(espacios, fila);
  lcd.print(texto);
}
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

```
}
```

```
// Función para mostrar el valor del potenciómetro en la pantalla LCD
```

```
void mostrarValorPotenciometro() {
```

```
    if (estadoActual == EDICION_SPH || estadoActual == EDICION_SPL) {
```

```
        int valor = map(analogRead(A0), 0, 1023, 10, 70); // Ejemplo de lectura de potenciómetro
```

```
        lcd.setCursor(9, 3);
```

```
        lcd.print(valor);
```

```
    } else if (estadoActual == EDICION_DURACION) {
```

```
        int valor = map(analogRead(A0), 0, 1023, 6, 48) * 5; // Ejemplo de lectura de potenciómetro
```

```
        lcd.setCursor(9, 3);
```

```
        lcd.print("  ");
```

```
        lcd.setCursor(9, 3);
```

```
        lcd.print(valor);
```

```
    }
```

```
}
```

```
// Función para imprimir los valores SPL, SPH y duración continuamente cada 5 segundos en la pantalla LCD
```

```
void imprimirValoresContinuos() {
```

```
    unsigned long tiempoActual = millis();
```

```
    if (tiempoActual - ultimoTiempoImpresion >= 5000) {
```

```
        ultimoTiempoImpresion = tiempoActual;
```

```
        lcd.setCursor(0, 0);
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

```
lcd.print("SPL:");  
lcd.print(setPointLow);  
lcd.setCursor(10, 0);  
lcd.print("SPH:");  
lcd.print(setPointHigh);  
}  
  
lcd.setCursor(5, 3);  
lcd.print("Temp: ");  
lcd.print(temperaturaActual);  
}
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

12.3. Manual del texturómetro

El manual del texturómetro puede ser obtenido en la facultad para su consulta.

Ingeniería Mecánica - 2025

12.4. Resultados obtenidos

En este anexo se presentan los resultados de los primeros 11 ensayos realizados, con el objetivo de demostrar la repetitividad de las mediciones y, por ende, la precisión del aparato utilizado. Si bien no era necesario incluir estos datos en el informe principal, su análisis permite evidenciar la consistencia de los resultados obtenidos y respaldar la fiabilidad del método empleado. La repetitividad es un factor clave para evaluar la precisión del sistema de medición, asegurando que los valores registrados sean consistentes bajo las diferentes condiciones experimentales.

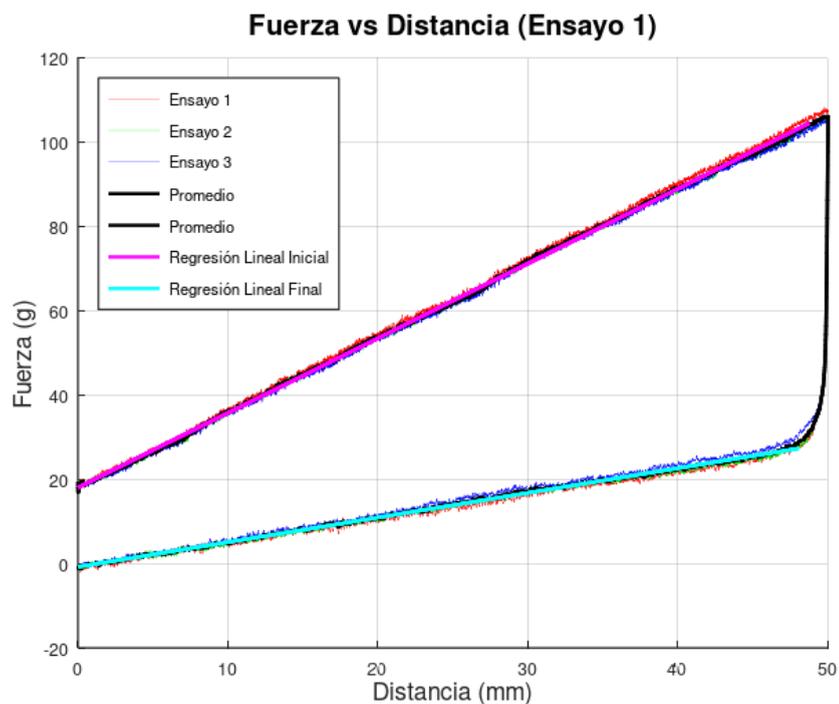


Figura 12.1. Ensayo n° 1 (Fuerza vs Tiempo)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

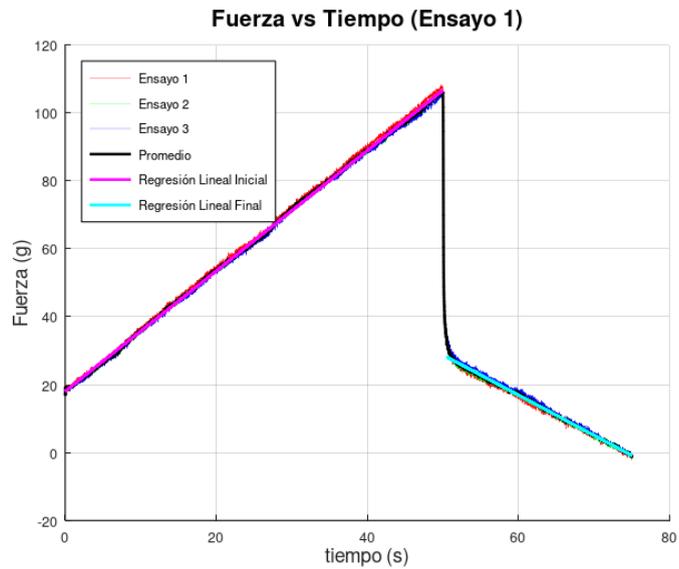


Figura 12.2. Ensayo n° 1 (Fuerza vs Tiempo)

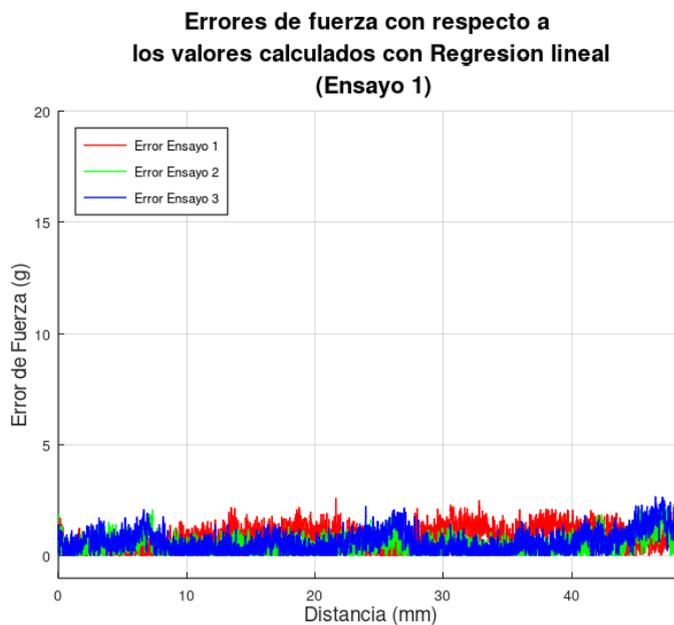


Figura 12.3. Ensayo n° 1 (Error de Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

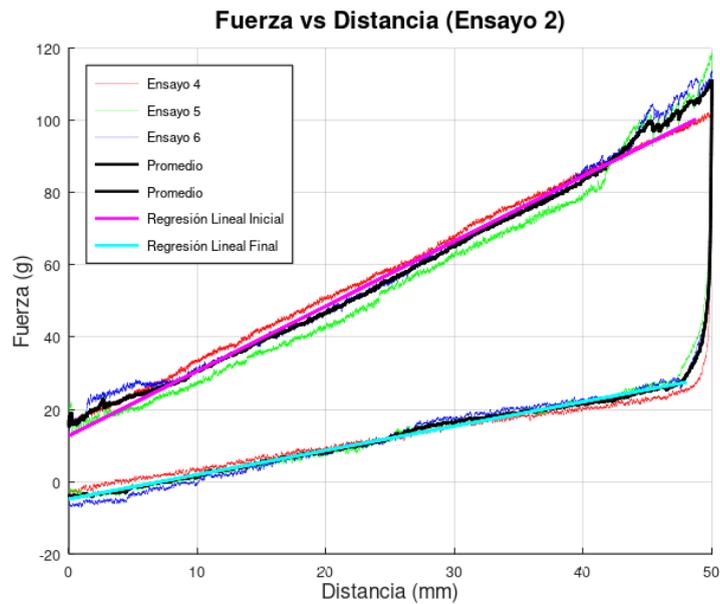


Figura 12.4. Ensayo n° 2 (Fuerza vs Distancia)

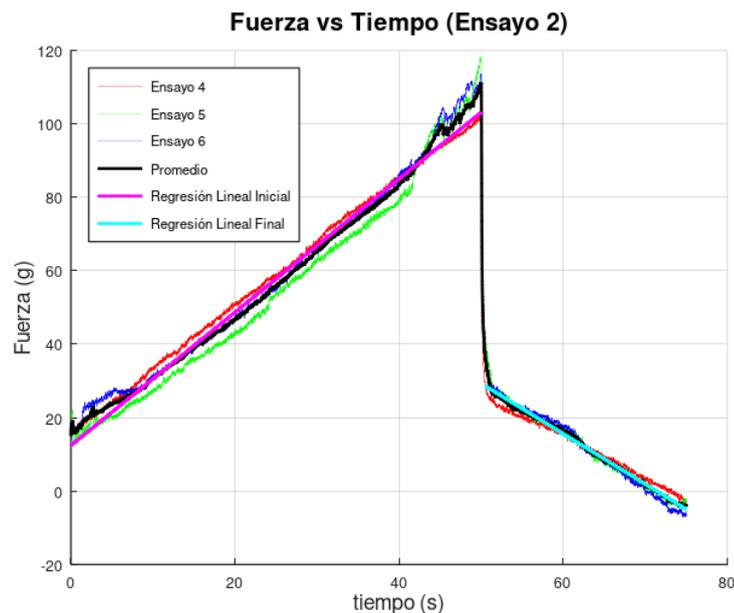


Figura 12.5. Ensayo n°2 (Fuerza vs Tiempo)

Ingeniería Mecánica - 2025

Errores de fuerza con respecto a los valores calculados con Regresion lineal (Ensayo 2)

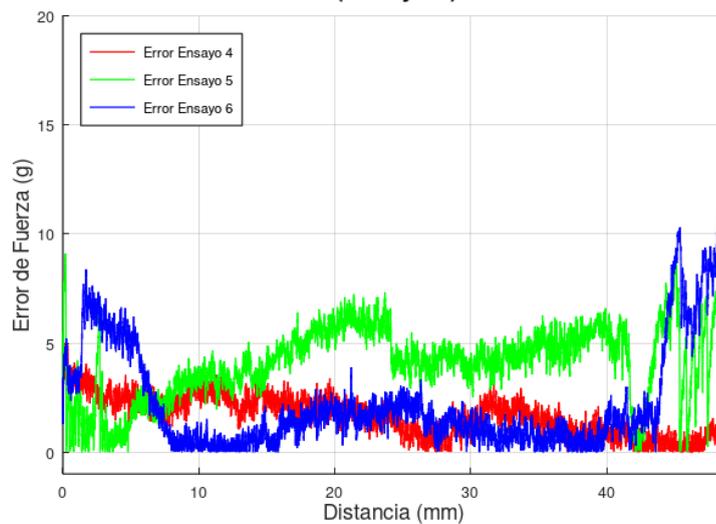


Figura 12.6. Ensayo n° 2 (Error de Fuerza vs Distancia)

Fuerza vs Distancia (Ensayo 3)

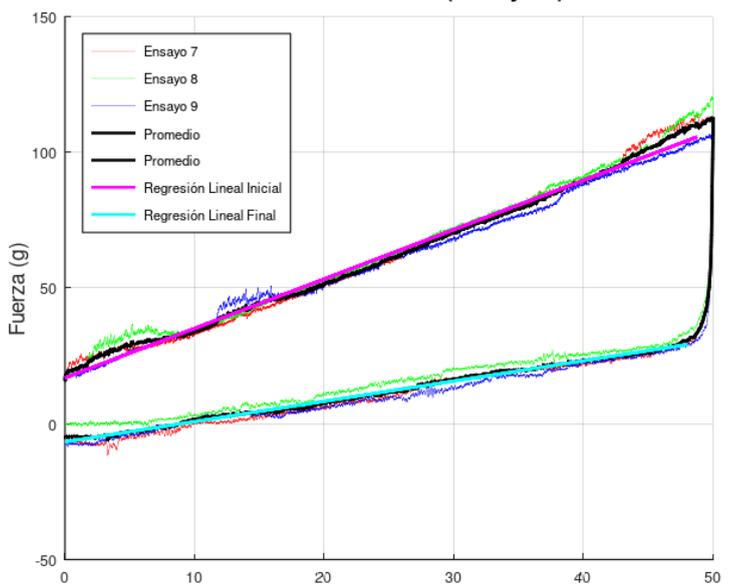


Figura 12.7. Ensayo n° 3 (Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

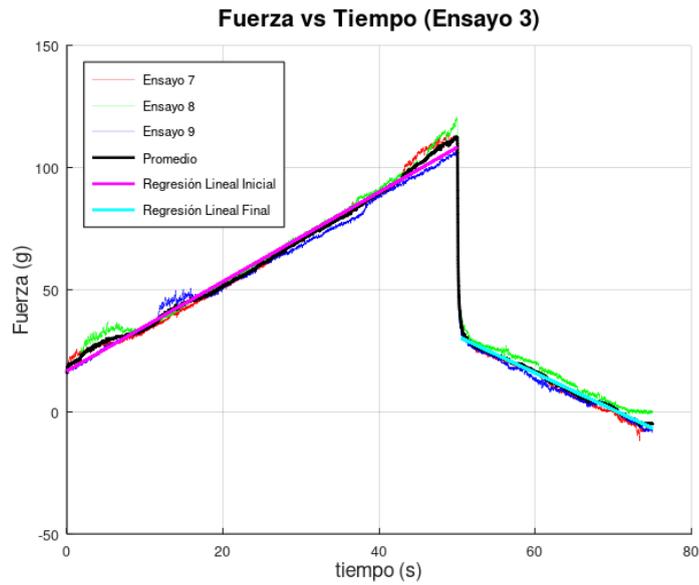


Figura 12.8. Ensayo n° 3 (Fuerza vs Tiempo)

**Errores de fuerza con respecto a
los valores calculados con Regresion lineal
(Ensayo 3)**

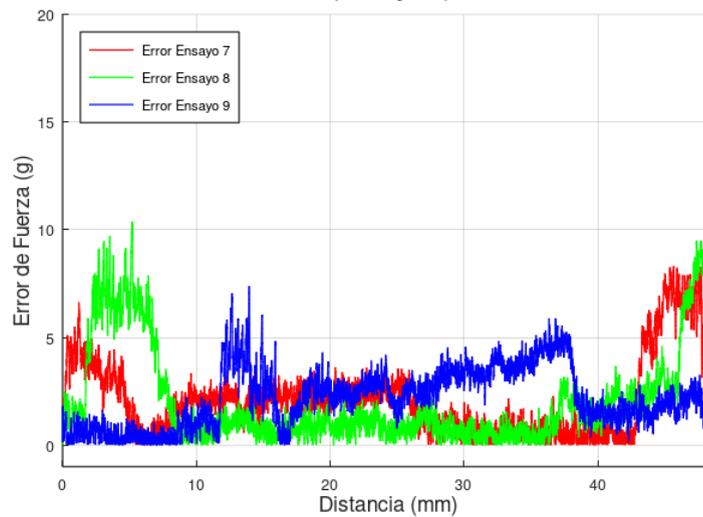


Figura 12.9. Ensayo n° 3 (Error de Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

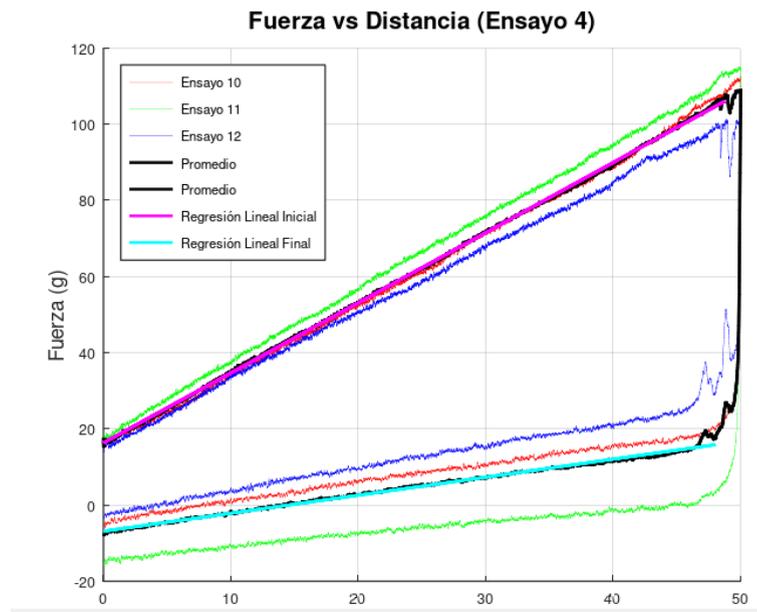


Figura 12.10. Ensayo n° 4 (Fuerza vs Distancia)

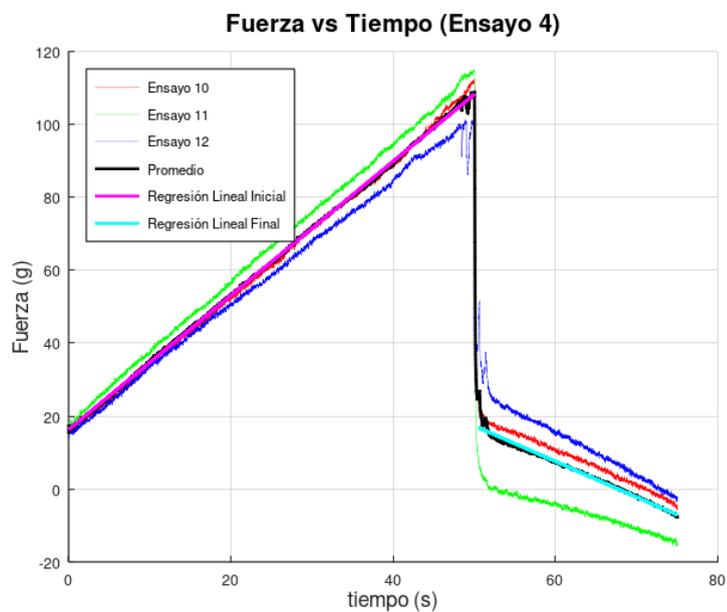


Figura 12.11. Ensayo n° 4 (Fuerza vs Tiempo)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

Errores de fuerza con respecto a los valores calculados con Regresion lineal (Ensayo 4)

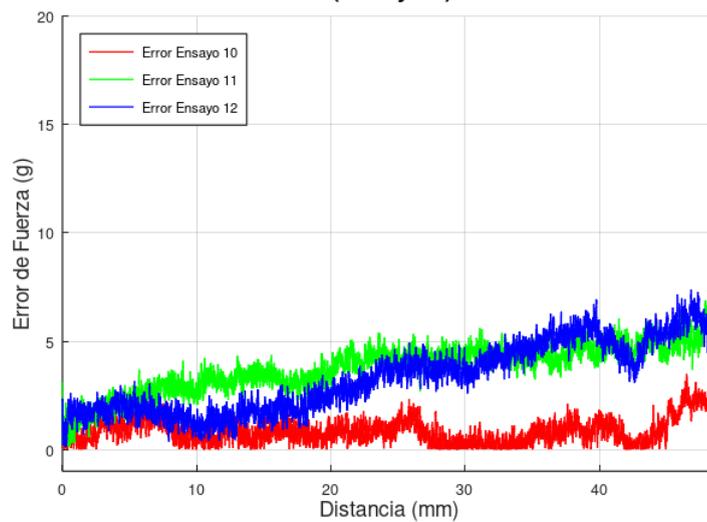


Figura 12.12. Ensayo n° 4 (Error Fuerza vs Distancia)

Fuerza vs Distancia (Ensayo 5)

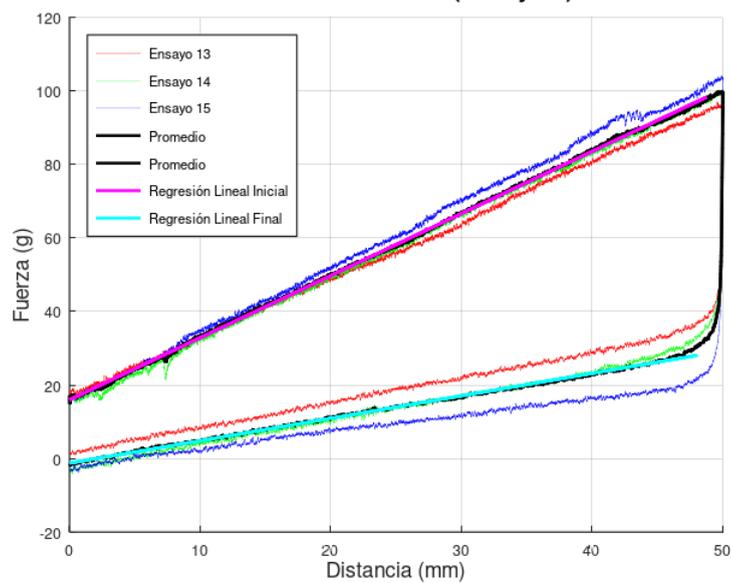


Figura 12.13. Ensayo n° 5 (Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

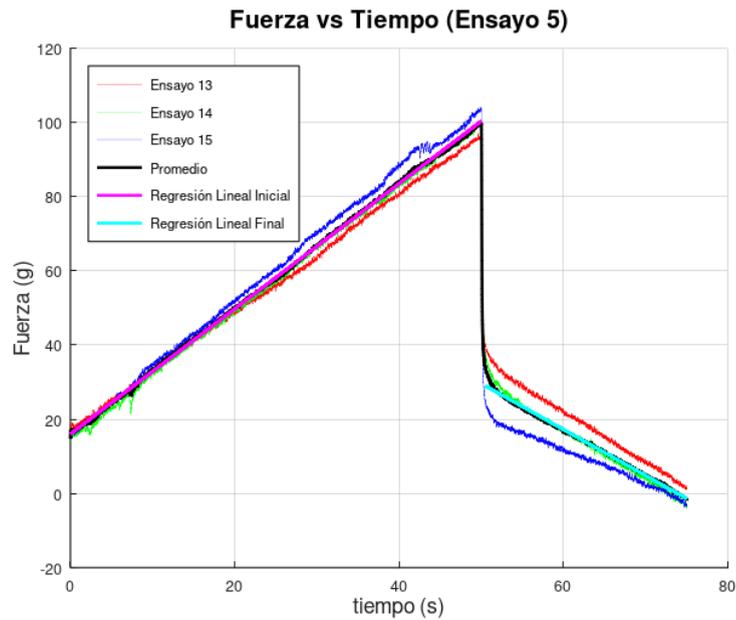


Figura 12.14. Ensayo n°5 (Fuerza vs Tiempo)

**Errores de fuerza con respecto a
los valores calculados con Regresion lineal
(Ensayo 5)**

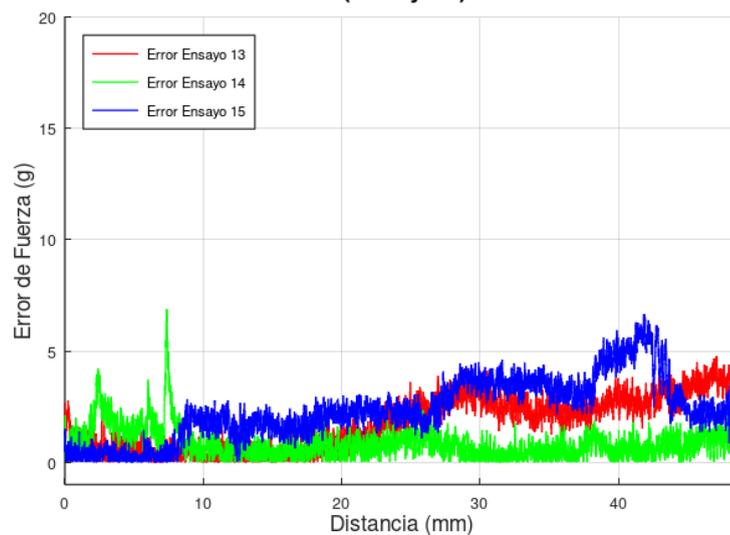


Figura 12.15. Ensayo n°5 (Error de Fuerza vs Distancia)

Ingeniería Mecánica - 2025

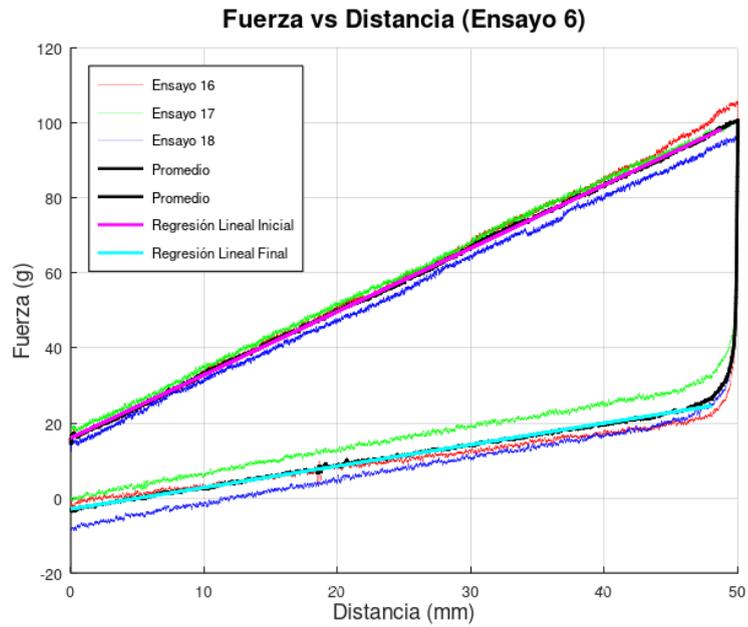


Figura 12.16. Ensayo n° 6 (Fuerza vs Distancia)

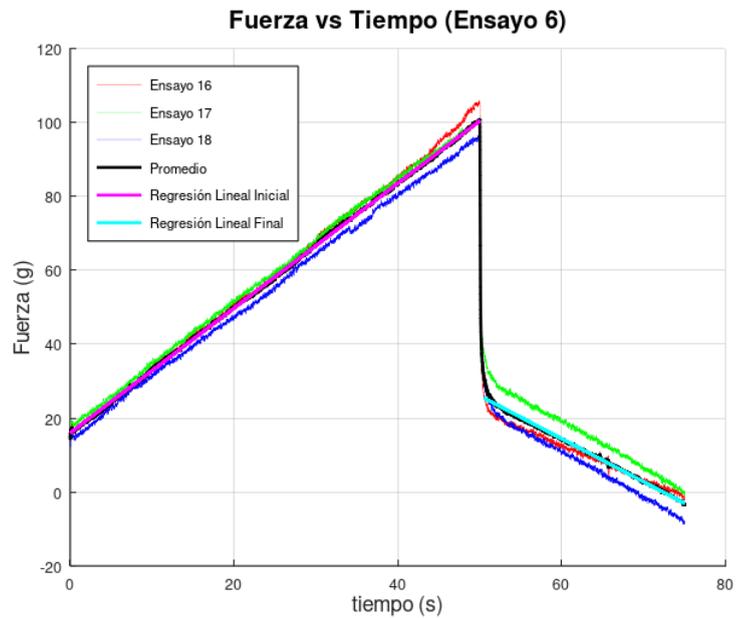


Figura 12.17. Ensayo n° 6 (Fuerza vs Tiempo)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

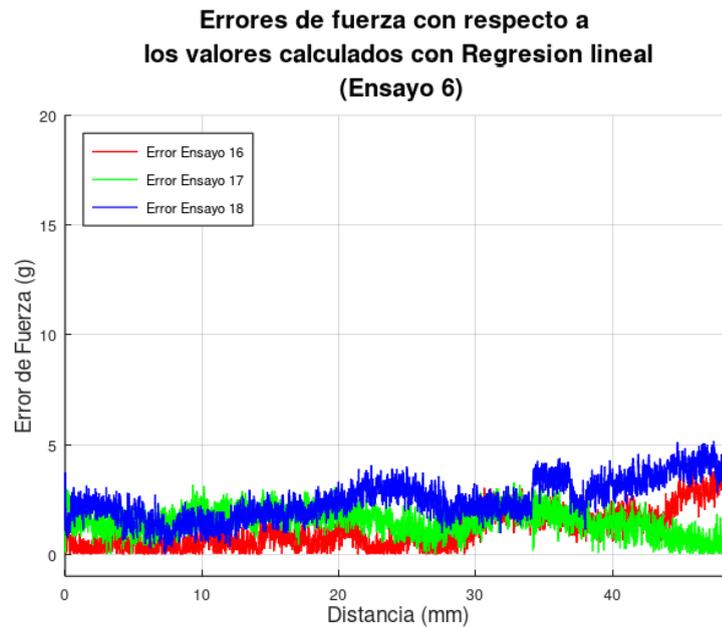


Figura 12.18. Ensayo n°6 (Error de Fuerza vs Distancia)

7.7. Ensayo N°7

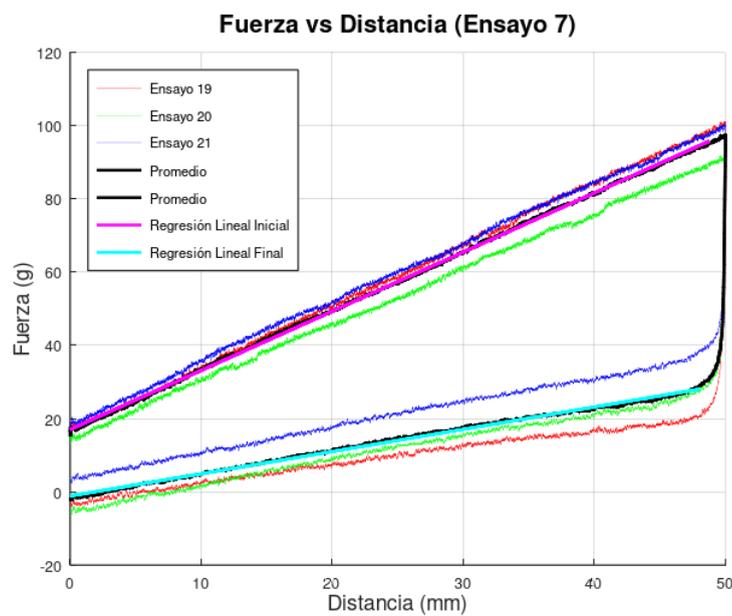


Figura 12.19. Ensayo n° 7 (Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

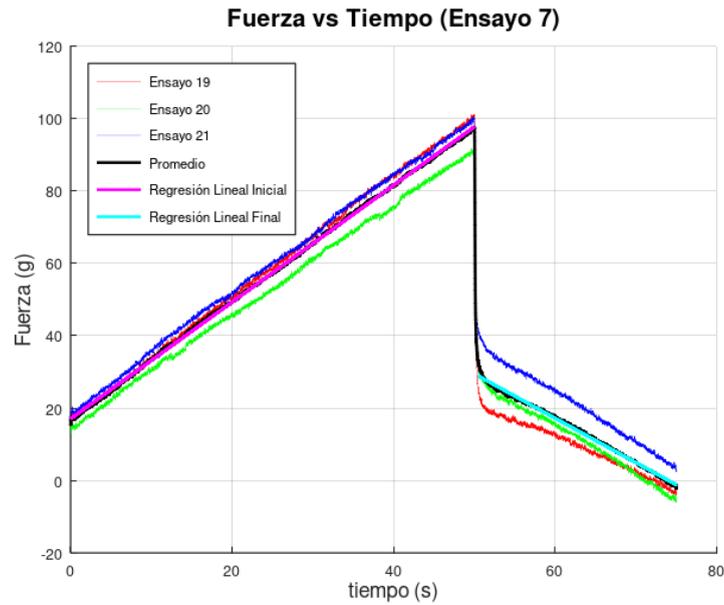


Figura 12.20. Ensayo n°8 (Fuerza vs Tiempo)

**Errores de fuerza con respecto a
los valores calculados con Regresion lineal
(Ensayo 7)**

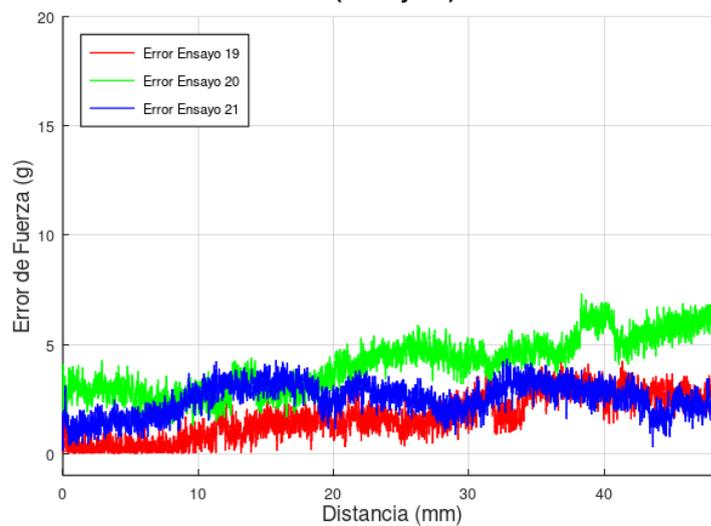


Figura 12.21. Ensayo n°7 (Error de Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

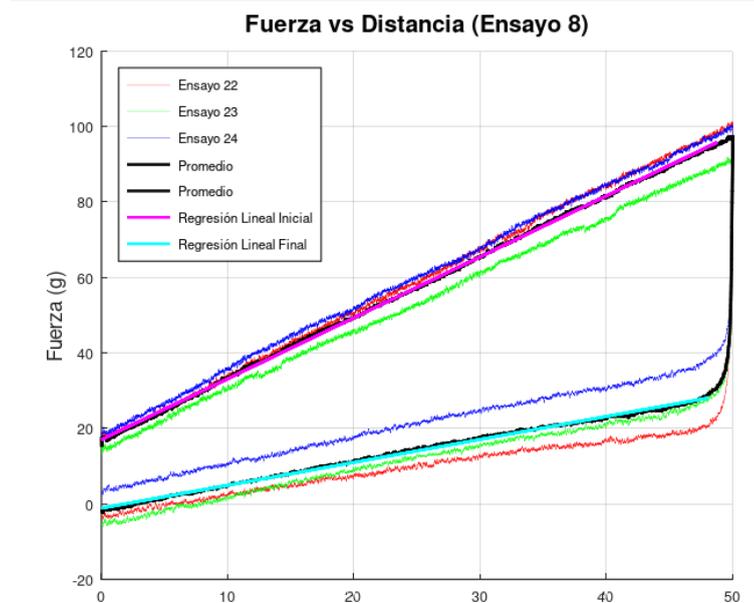


Figura 12.22. Ensayo n°8 (Fuerza vs Distancia)

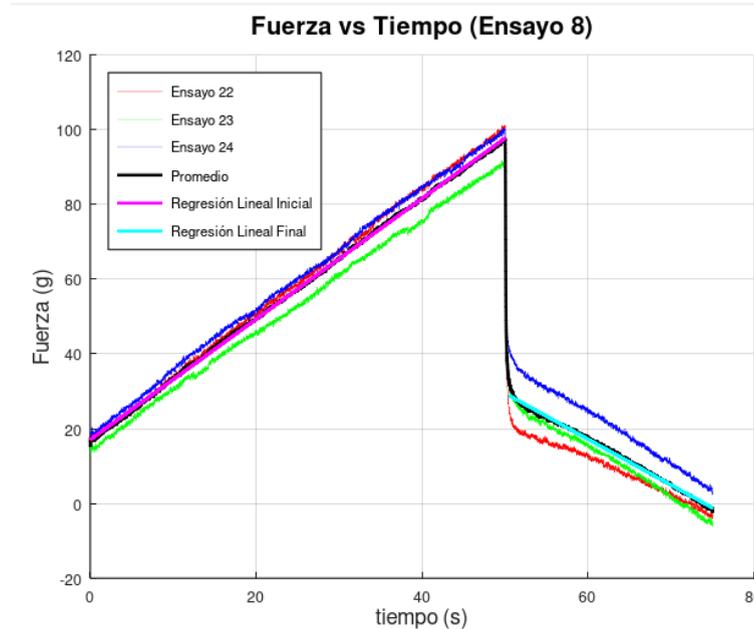


Figura 12.23. Ensayo n°8 (Fuerza vs Tiempo)

Ingeniería Mecánica - 2025

Errores de fuerza con respecto a los valores calculados con Regresion lineal (Ensayo 8)

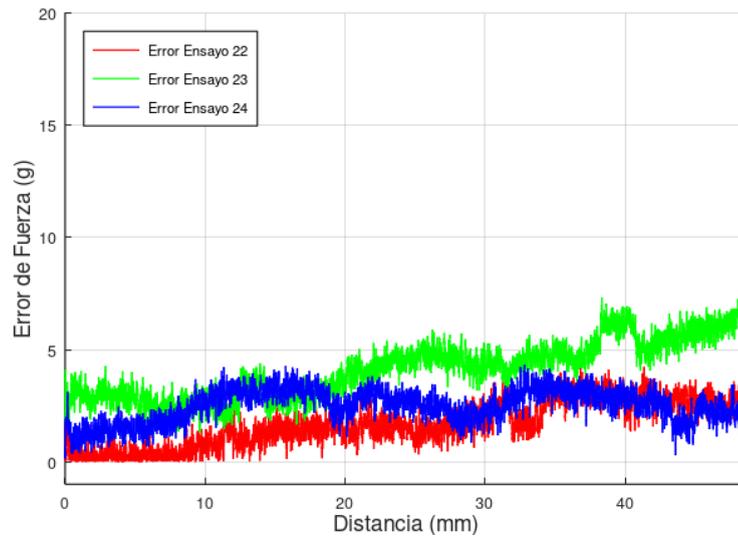


Figura 12.24. Ensayo n°8 (Error de Fuerza vs Distancia)

Fuerza vs Distancia (Ensayo 9)

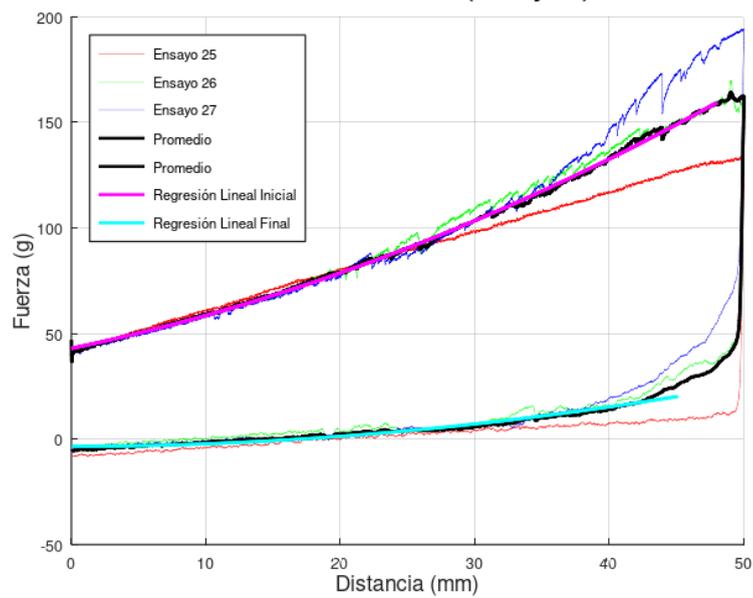


Figura 12.25. Ensayo n°9 (Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

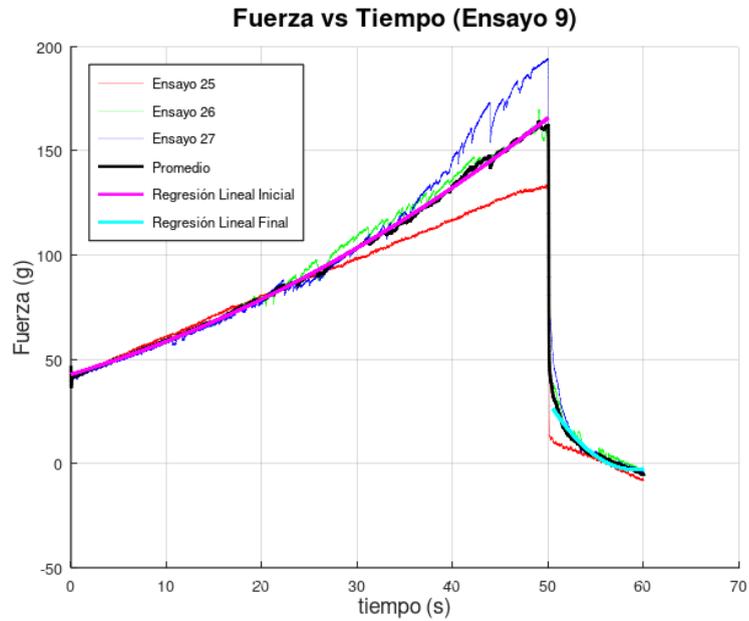


Figura 12.26. Ensayo n°9 (Fuerza vs Tiempo)

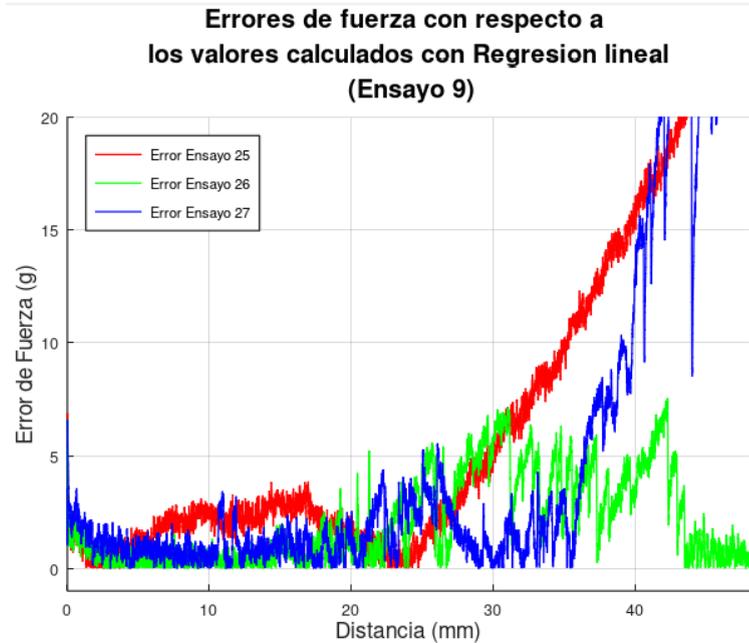


Figura 12.27. Ensayo n°9 (Error de Fuerza vs Distancia)

Ingeniería Mecánica - 2025

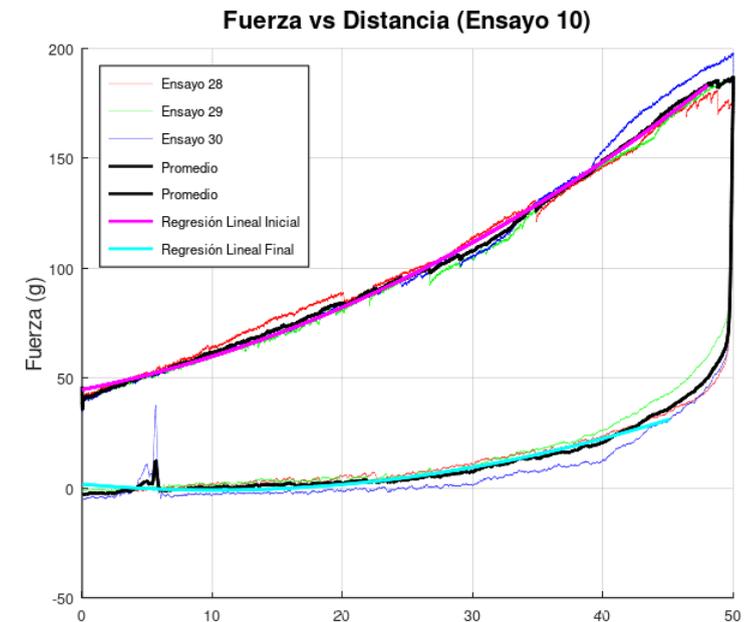


Figura 12.28. Ensayo n°10 (Fuerza vs Distancia)

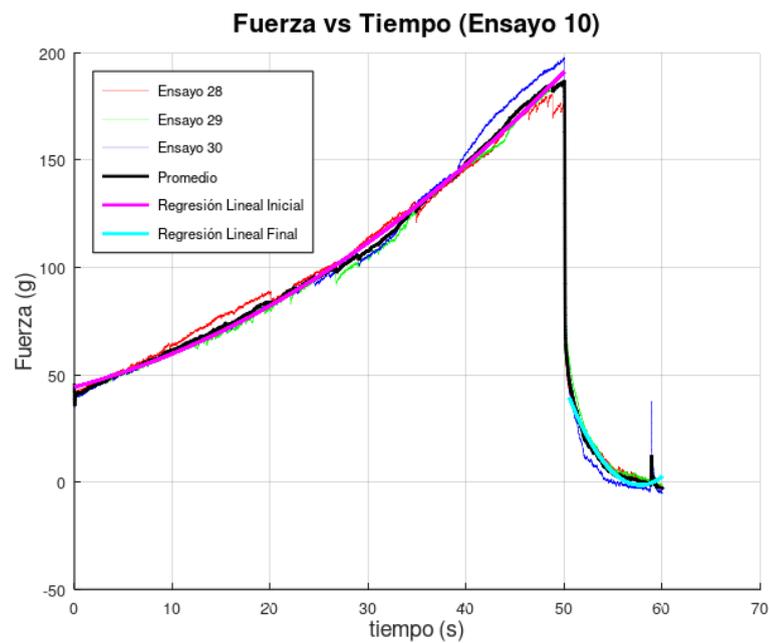


Figura 12.29. Ensayo n°10 (Fuerza vs Tiempo)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

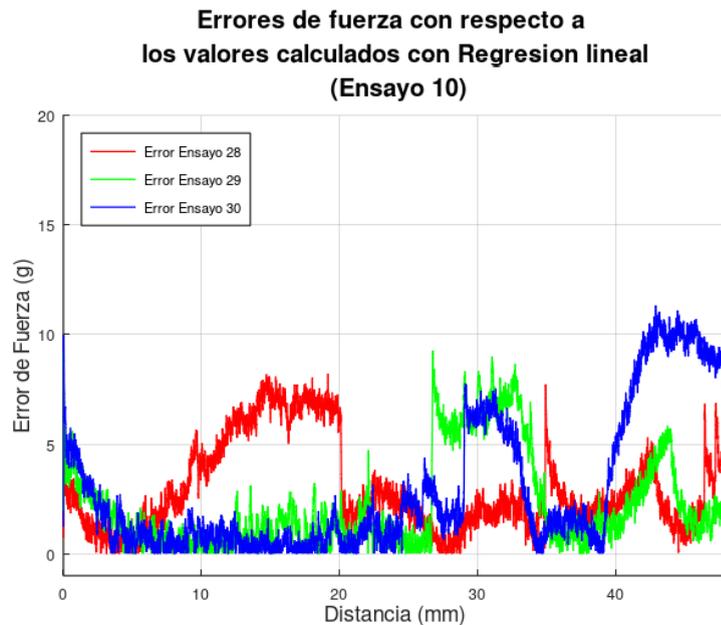


Figura 12.30. Ensayo n°10 (Error de Fuerza vs Distancia)

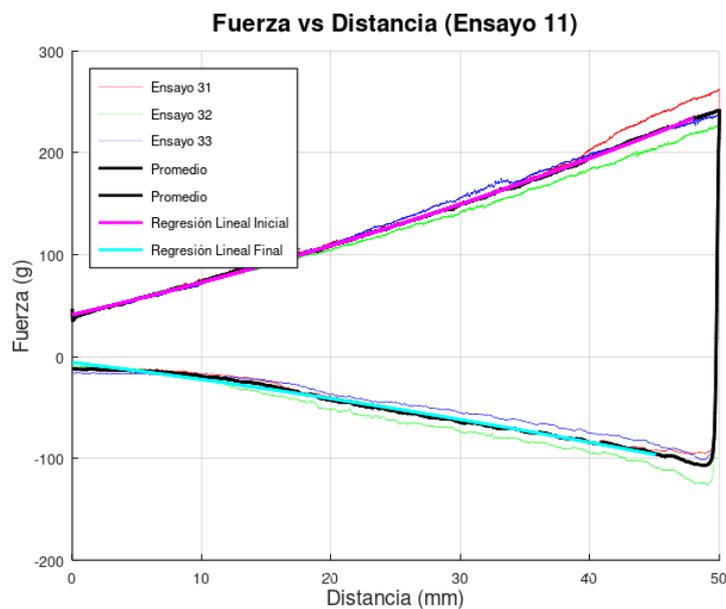


Figura 12.31. Ensayo n°11 (Fuerza vs Distancia)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

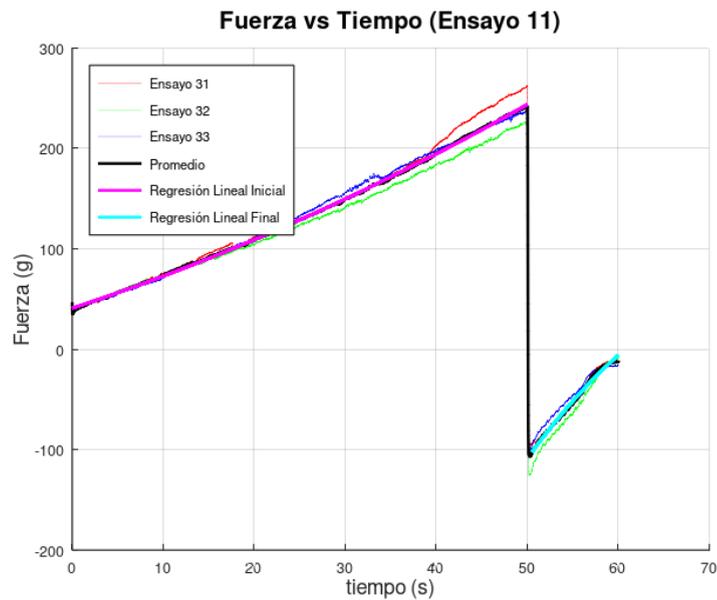


Figura 12.32. Ensayo n°11 (Fuerza vs Tiempo)

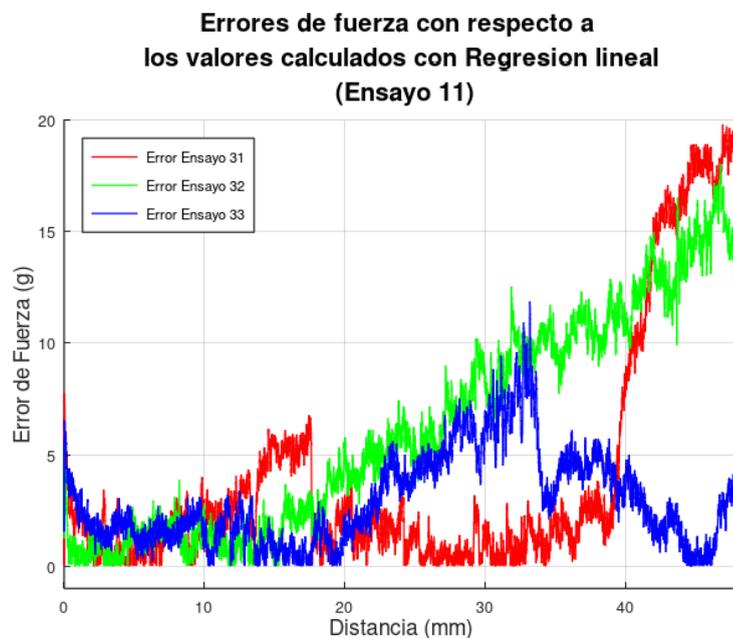


Figura 12.33. Ensayo n°11 (Error de Fuerza vs Distancia)

Ingeniería Mecánica - 2025

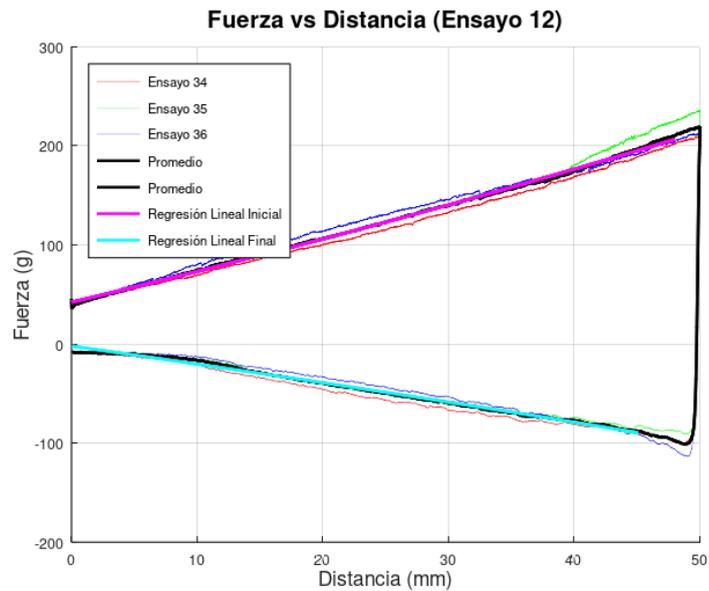


Figura 12.34. Ensayo n°12 (Fuerza vs Distancia)

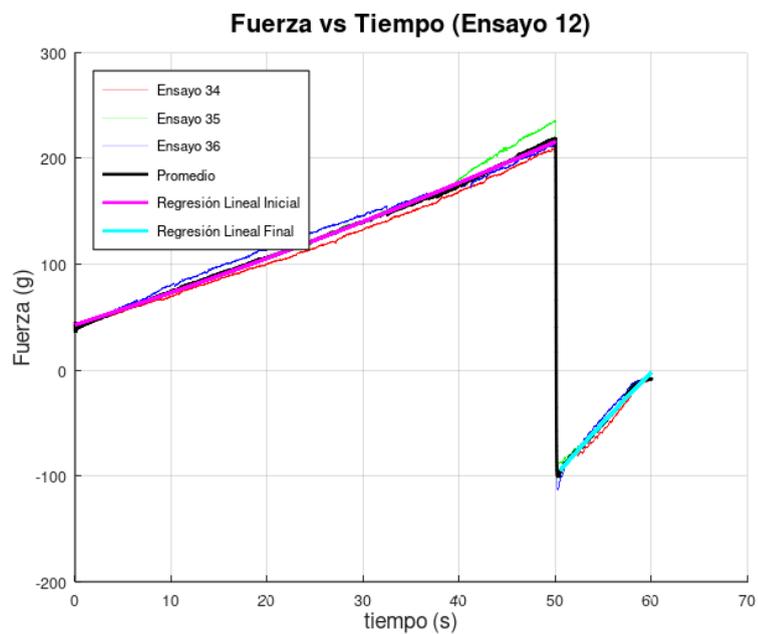


Figura 12.35. Ensayo n°12 (Fuerza vs Tiempo)

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

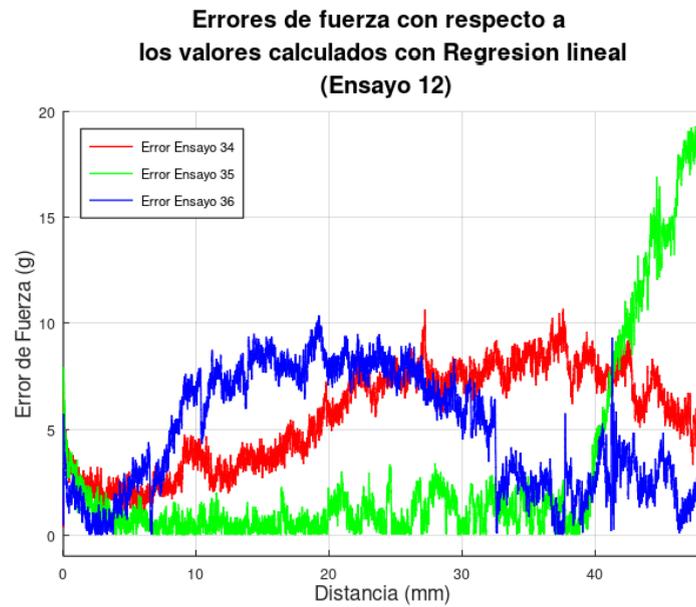


Figura 12.36. Ensayo n°12 (Error de Fuerza vs Distancia)

Ingeniería Mecánica - 2025

12.5 Código de Octave

clear all;

close all;

clc;

%-----

% Parámetros generales

%-----

largo = 15000; % Longitud máxima de los datos

n_ensayos = 24; % Número total de ensayos

A_ext = pi * (16^2) / 4; % Área del extrusómetro (cm²)

% Definición de grupos

grupo_1 = 1:8; % Ensayos 1 a 7

grupo_2 = 9:10; % Ensayos 8 y 9

grupo_3 = 11:12; % Ensayos 10 y 11

grupo_4 = 13:14; % Ensayos 12 y 13

grupo_5 = 15:16; % Ensayos 14 y 15

grupo_6 = 17:18; % Ensayos 16 y 17

grupo_7 = 19:20; % Ensayos 18 y 19

grupo_8 = 21:22; % Ensayos 20 y 21

grupo_9 = 23:24; % Ensayos 22 y 23

% Configuración de cada grupo (grado, color, etiqueta)

config_grupos = {

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

```

grupo_1, 1, 'r',      'Grupo 1 (Ensayos 1-7)';
grupo_2, 1, 'b',      'Grupo 2 (Ensayos 8-9)';
grupo_3, 1, 'g',      'Grupo 3 (Ensayos 10-11)';
grupo_4, 1, 'm',      'Grupo 4 (Ensayos 12-13)';
grupo_5, 1, 'c',      'Grupo 5 (Ensayos 14-15)';
grupo_6, 1, 'y',      'Grupo 6 (Ensayos 16-17)';
grupo_7, 1, 'k',      'Grupo 7 (Ensayos 18-19)';
grupo_8, 1, [0.5, 0.5, 0.5], 'Grupo 8 (Ensayos 20-21)';
grupo_9, 1, [1, 0.5, 0], 'Grupo 9 (Ensayos 22-23)';
};

% Matrices para almacenar resultados
matriz_fuerza = zeros(largo, n_ensayos);
matriz_distancia = zeros(largo, n_ensayos);
matriz_tau1 = NaN(largo, n_ensayos); % Para almacenar todos los esfuerzos de corte

colores_grupos = struct( ...
    'Grupo1', 'r', ...
    'Grupo2', 'b', ...
    'Grupo3', 'g', ...
    'Grupo4', 'm', ...
    'Grupo5', 'c', ...
    'Grupo6', 'y', ...
    'Grupo7', 'k', ...
    'Grupo8', [0.5, 0.5, 0.5], ...

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
'Grupo9', [1, 0.5, 0] ...
);

%-----
% Función para obtener configuración del grupo
%-----
function [grado, color, label] = obtener_configuracion(config_grupos, ensayo_num)
    for i = 1:size(config_grupos, 1)
        if ismember(ensayo_num, config_grupos{i, 1})
            grado = config_grupos{i, 2};
            color = config_grupos{i, 3};
            label = config_grupos{i, 4};
            return;
        end
    end
    error('Ensayo %d no pertenece a ningún grupo definido.', ensayo_num);
end

function graficar_resultados(distancia, fuerza, fit_fuerza, tau, ensayo_num, color, label)
    min_length = min([length(distancia), length(fuerza), length(fit_fuerza), length(tau)]);
    distancia = distancia(1:min_length);
    fuerza = fuerza(1:min_length);
    fit_fuerza = fit_fuerza(1:min_length);
    tau = tau(1:min_length);
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(distancia, fuerza, 'o-', 'Color', color, 'DisplayName', 'Fuerza Original');
hold on;
plot(distancia, fit_fuerza, '-', 'LineWidth', 0.5, 'Color', 'k', 'DisplayName', 'Regresión');
xlabel('Distancia (mm)', 'FontSize', 20);
ylabel('Fuerza (g)', 'FontSize', 20);
title(sprintf('Fuerza vs Distancia (Ensayo %d)', ensayo_num), 'FontSize', 30);
legend show;
grid on;
subplot(2, 1, 2);
plot(distancia, tau, '-', 'Color', color, 'LineWidth', 0.1, 'DisplayName', label);
xlabel('Distancia (mm)', 'FontSize', 20);
ylabel('Esfuerzo de Corte (\tau)', 'FontSize', 20);
title('Esfuerzo de Corte', 'FontSize', 20);
legend show;
grid on;
end

```

```

function color_grupo = obtener_color_grupo(colores_grupos, nombre_grupo)
% Obtener el color del grupo desde el objeto 'colores_grupos'
if isfield(colores_grupos, nombre_grupo)
    color_grupo = colores_grupos.(nombre_grupo);
else
    error('El grupo %s no tiene un color definido.', nombre_grupo);
end

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

end
end

%-----
% Función para cargar datos del ensayo
%-----

function [fuerza, distancia, tiempo] = cargar_datos(archivo)
    data = csvread(archivo);
    fuerza = data(:, 1);
    distancia = data(:, 2);
    tiempo = data(:, 3);
end

function graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1,    matriz_distancia,    config_grupos,
    colores_grupos, grupos, titulo)
    figure;
    hold on;
    legend_entries = {}; % Almacenar las etiquetas para la leyenda

    for i = 1:length(grupos)
        nombre_grupo = sprintf('Grupo%d', grupos(i)); % Crear el nombre del grupo (ejemplo:
        'Grupo1')
        color_grupo = obtener_color_grupo(colores_grupos, nombre_grupo);

        % Obtener datos del grupo actual
        ensayos_grupo = config_grupos{grupos(i), 1};
    end
end

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

for ensayo_num = ensayos_grupo
    distancia = matriz_distancia(:, ensayo_num);
    tau = matriz_tau1(:, ensayo_num);

    % Eliminar valores NaN
    valid_idx = ~isnan(distancia(1:length(tau))) & ~isnan(tau);
    distancia = distancia(valid_idx);
    tau = tau(valid_idx);

    % Graficar esfuerzo de corte con el color del grupo
    plot(distancia, tau, '-', 'Color', color_grupo, 'LineWidth', 1.5);
end
legend_entries{end + 1} = config_grupos{grupos(i), 4};
end

xlabel('Distancia (mm)', 'FontSize', 20);
ylabel('Esfuerzo de Corte (\tau)', 'FontSize', 20);
title(titulo, 'FontSize', 30);
grid on;
hold off;
end

%-----
% Función para graficar K para subconjuntos de grupos
%-----

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
function graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, grupos, titulo)
    colores = lines(length(grupos)); % Colores únicos para cada grupo
    figure;
    hold on;
    legend_entries = {}; % Almacenar las etiquetas para la leyenda

    for i = 1:length(grupos)
        ensayos_grupo = config_grupos{grupos(i), 1};
        color_grupo = colores(i, :);

        % Extraer valores de K para el grupo actual
        K_grupo = matriz_K(ensayos_grupo);

        % Calcular el promedio de K para el grupo
        promedio_K = mean(K_grupo);

        % Graficar los puntos para el grupo
        plot(ensayos_grupo, K_grupo, 'o', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', color_grupo, ...
            'MarkerEdgeColor', 'k', 'DisplayName', config_grupos{grupos(i), 4});

        % Graficar la línea horizontal del promedio extendida desde 0 hasta 25
        plot([0, 25], promedio_K * [1, 1], '--', 'LineWidth', 1.5, 'Color', color_grupo);

        legend_entries{end + 1} = config_grupos{grupos(i), 4}; % Agregar el nombre del grupo
        a la leyenda
    end
end
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

end
xlabel('Número de Ensayo','FontSize', 20);
ylabel('Índice de Consistencia (K)','FontSize', 20);
title(titulo,'FontSize', 30);
grid on;
hold off;
end
%-----
% Función para calcular regresión
%-----
function [fit, idx] = calcular_regresion(x, y, grado)
    N = length(x);
    idx = 1:round(0.4 * N); % Usar el 65% inicial para la regresión
    p = polyfit(x(idx), y(idx), grado);
    fit = polyval(p, x);
end
%-----
% Función para interpolar tabla
%-----
function y_interp = interpolar_tabla(x, tabla_x, tabla_y)
    % Verificar que x esté dentro del rango de tabla_x
    if x < min(tabla_x) || x > max(tabla_x)
        warning('El valor de x está fuera del rango de la tabla. Se usará el límite más cercano.');
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
end

% Interpolación lineal
y_interp = interp1(tabla_x, tabla_y, x, 'linear');
end

%-----
% Procesar cada ensayo
%-----

for ensayo_num = 1:n_ensayos
    % Cargar datos de los 3 ensayos
    archivos = arrayfun(@(x) sprintf('D%03d.csv', (ensayo_num - 1) * 3 + x), 1:3,
'UniformOutput', false);
    [fuerza1, distancia1, tiempo1] = cargar_datos(archivos{1});
    [fuerza2, distancia2, tiempo2] = cargar_datos(archivos{2});
    [fuerza3, distancia3, tiempo3] = cargar_datos(archivos{3});

    % Ajustar todas las mediciones al tamaño mínimo
    filas_disponibles = min([length(fuerza1), length(fuerza2), length(fuerza3)]);
    fuerza_prom = mean([fuerza1(1:filas_disponibles), fuerza2(1:filas_disponibles),
fuerza3(1:filas_disponibles)], 2);
    distancia_prom = mean([distancia1(1:filas_disponibles), distancia2(1:filas_disponibles),
distancia3(1:filas_disponibles)], 2);

    % Guardar datos promedio en matrices
    matriz_fuerza(1:filas_disponibles, ensayo_num) = fuerza_prom;
    matriz_distancia(1:filas_disponibles, ensayo_num) = distancia_prom;
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
% Obtener configuración del grupo
[grado, color_grupo, label_grupo] = obtener_configuracion(config_grupos, ensayo_num);

% Aplicar restricción de datos
limite = min(5000, length(distancia_prom));
distancia_reg = distancia_prom(1:limite);
fuerza_reg = fuerza_prom(1:limite);

% Calcular regresión y esfuerzo de corte
[fit1_distancia, ~] = calcular_regresion(distancia_reg, fuerza_reg, grado);
tau1 = fit1_distancia / A_ext;

% Calcular regresión y esfuerzo de corte
[fit1_distancia, ~] = calcular_regresion(distancia_reg, fuerza_reg, grado);
tau1 = fit1_distancia / A_ext;

% Ajuste para el grupo 1
if ismember(ensayo_num, grupo_1)
    tau1 = tau1 + 0.1; % Suma un valor para elevar el esfuerzo de corte
end

% Guardar el esfuerzo de corte en la matriz
matriz_tau1(1:length(tau1), ensayo_num) = tau1;
matriz_fit1 = matriz_tau1 .* A_ext;
```

Ingeniería Mecánica - 2025

% Graficar resultados individuales

graficar_resultados(distancia_prom, fuerza_prom, fit1_distancia, tau1, ensayo_num, color_grupo, label_grupo);

%-----

% Paso 1: Cálculo de distancia L

%-----

L = max(distancia_prom) - min(distancia_prom);

matriz_L(ensayo_num) = L;

%-----

% Paso 2: Cálculo de fuerza de empuje y corregida

%-----

F_e = mean(fuerza_prom); % Fuerza promedio

F_ce = F_e * 0.9; % Corrección

%-----

% Paso 3: Índice de comportamiento al flujo n

%-----

s = log(L);

n = 1 / (1 + s);

matriz_n(ensayo_num) = n;

%-----

Ingeniería Mecánica - 2025

```
% Paso 4: Interpolación de  $\lambda$ 
%-----
tabla_x_lambda = [0.1, 0.5, 1.0];
tabla_y_lambda = [1.2, 1.0, 0.8];
lambda = interpolar_tabla(n, tabla_x_lambda, tabla_y_lambda);
matriz_lambda(ensayo_num) = lambda; % Guardar lambda en la matriz
```

```
%-----
% Paso 5: Tensión de corte adimensional  $T_w$ 
%-----
Tw = lambda * F_ce / L;
matriz_Tw(ensayo_num) = Tw;
```

```
%-----
% Paso 6: Disminución de presión P
%-----
P = F_ce / A_ext;
matriz_P(ensayo_num) = P;
```

```
%-----
% Paso 7: Interpolación de  $\phi$ 
%-----
tabla_x_phi = [0.1, 0.5, 1.0];
tabla_y_phi = [1.5, 1.2, 1.0];
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

```

phi = interpolar_tabla(P, tabla_x_phi, tabla_y_phi);

%-----
% Paso 8: Índice de consistencia K
%-----

K = phi * Tw / n;
matriz_K(ensayo_num) = K; % Guardar K en la matriz
end

%-----
% Graficar todos los esfuerzos de corte juntos
%-----

figure;
hold on;
for ensayo_num = 1:n_ensayos
    % Obtener configuración del grupo
    [~, color_grupo, ~] = obtener_configuracion(config_grupos, ensayo_num);

    % Obtener datos del ensayo actual
    distancia = matriz_distancia(:, ensayo_num);
    tau = matriz_tau1(:, ensayo_num);

    % Eliminar valores NaN para evitar problemas al graficar
    valid_idx = ~isnan(distancia(1:length(tau))) & ~isnan(tau);
    distancia = distancia(valid_idx);

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
tau = tau(valid_idx);

% Graficar el esfuerzo de corte para este ensayo
plot(distancia(1:length(tau)), tau, '-', 'Color', color_grupo, 'LineWidth', 0.5, 'DisplayName',
sprintf('Ensayo %d', ensayo_num));
end
xlabel('Distancia (mm)', 'FontSize', 20);
ylabel('Esfuerzo de Corte ( $\tau$ )', 'FontSize', 20);
title('Esfuerzo de Corte para Todos los Ensayos', 'FontSize', 30);
axis([0 20 0 1])
grid on;

%-----
% Crear una figura separada para la leyenda personalizada
%-----

figure;
axis off; % Ocultar ejes

% Posición inicial para el primer elemento
x_start = 0.1;
y_start = 0.9;
box_width = 0.05;
box_height = 0.05;
spacing = 0.1; % Espacio entre las etiquetas
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

% Calcular las dimensiones del rectángulo ajustado a la leyenda
total_height = size(config_grupos, 1) * spacing + 0.05;
rectangle('Position', [x_start-0.05, y_start - total_height, 0.4, total_height], ...
    'FaceColor', [1 1 1], 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);

% Dibujar los elementos de la leyenda
for i = 1:size(config_grupos, 1)
    % Dibujar un pequeño rectángulo de color
    rectangle('Position', [x_start, y_start - i * spacing, box_width, box_height], ...
        'FaceColor', config_grupos{i, 3}, 'EdgeColor', 'k');

    % Agregar el texto del grupo
    text(x_start + 0.08, y_start - i * spacing + 0.015, ...
        sprintf('%s', config_grupos{i, 4}), 'FontSize', 12, 'Color', 'k');
end

% Ajustar la figura
title('Leyenda de Grupos', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');

%-----
% Graficar el Índice de Flujo (n) para cada ensayo
%-----

figure;
plot(1:n_ensayos, matriz_n, 'o-', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 8);

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
xlabel('Número de Ensayo','FontSize', 20);
ylabel('Índice de Flujo (n)','FontSize', 20);
title('Índice de Flujo para Cada Ensayo','FontSize', 30);
grid on;

%-----
% Graficar el Índice de Consistencia (K) para cada ensayo por grupo
%-----

figure;
hold on;
promedios_K = zeros(size(config_grupos, 1), 1); % Almacena el promedio de K para cada
grupo

for i = 1:size(config_grupos, 1)
    ensayos_grupo = config_grupos{i, 1};
    color_grupo = config_grupos{i, 3};

    % Extraer valores de K para el grupo actual
    K_grupo = matriz_K(ensayos_grupo);

    % Calcular el promedio de K para el grupo
    promedio_K = mean(K_grupo);
    promedios_K(i) = promedio_K;

    % Graficar los puntos para el grupo
```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

```

plot(ensayos_grupo, K_grupo, 'o', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', color_grupo, ...
     'MarkerEdgeColor', 'k', 'DisplayName', config_grupos{i, 4});

% Graficar la línea de puntos para el promedio del grupo desde 0 hasta 25
plot([0, 25], promedio_K * [1, 1], '--', 'LineWidth', 1.5, 'Color', color_grupo);
end

xlabel('Número de Ensayo','FontSize', 20);
ylabel('Índice de Consistencia (K)','FontSize', 20);
title('Índice de Consistencia para Cada Ensayo por Grupo','FontSize', 30);
grid on;
hold off;

%-----
% Gráficas para  $\tau$  vs Distancia por subconjuntos de grupos
%-----

graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1, matriz_distancia, config_grupos, colores_grupos, [1, 6,
9], 'Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ) para Grupos 1, 6 y 9');

graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1, matriz_distancia, config_grupos, colores_grupos, [2, 5,
7], 'Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ) para Grupos 2, 5 y 7');

graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1, matriz_distancia, config_grupos, colores_grupos, [3, 4,
8], 'Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ) para Grupos 3, 4 y 8');

graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1, matriz_distancia, config_grupos, colores_grupos, [1, 2,
3], 'Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ) para Grupos 1, 2 y 3');

graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1, matriz_distancia, config_grupos, colores_grupos, [4, 5,
9], 'Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ) para Grupos 4, 5 y 9');

```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

graficar_tau_por_grupos(matriz_tau1, matriz_distancia, config_grupos, colores_grupos, [6, 7, 8], 'Esfuerzo de Corte (τ) para Grupos 6, 7 y 8');

%-----

% Gráficas de Índice de Consistencia (K) para subconjuntos de grupos

%-----

function graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, grupos, titulo)

figure;

hold on;

for i = 1:length(grupos)

ensayos_grupo = config_grupos{grupos(i), 1};

color_grupo = config_grupos{grupos(i), 3};

% Extraer valores de K para el grupo actual

K_grupo = matriz_K(ensayos_grupo);

% Calcular el promedio de K para el grupo

promedio_K = mean(K_grupo);

% Graficar los puntos para el grupo

plot(ensayos_grupo, K_grupo, 'o', 'MarkerSize', 8, 'MarkerFaceColor', color_grupo, ...
'MarkerEdgeColor', 'k', 'DisplayName', config_grupos{grupos(i), 4});

% Graficar la línea horizontal del promedio extendida desde 0 hasta 35

plot([0, 35], promedio_K * [1, 1], '--', 'LineWidth', 1.5, 'Color', color_grupo);

Ingeniería Mecánica - 2025

```

% Agregar texto desde el 26 en adelante, ligeramente por encima de la línea
x_pos = 26; % Posición en x para el texto
y_pos = promedio_K + 0.1; % Posición en y, ligeramente por encima del promedio
    text(x_pos, y_pos, config_grupos{grupos(i), 4}, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold',
'Color', color_grupo);
end

xlim([0, 35]); % Ajustar el rango del eje x
xlabel('Número de Ensayo', 'FontSize', 20);
ylabel('Índice de Consistencia (K)', 'FontSize', 20);
title(titulo, 'FontSize', 30);
grid on;
hold off;
end

%-----
% Gráficas para el Índice de Consistencia (K) por subconjuntos de grupos
%-----

graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, [1, 6, 9], 'Índice de Consistencia (K) para
Grupos 1, 6 y 9');
graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, [2, 5, 7], 'Índice de Consistencia (K) para
Grupos 2, 5 y 7');

```

Ingeniería Mecánica - 2025

graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, [3, 4, 8], 'Índice de Consistencia (K) para Grupos 3, 4 y 8');

graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, [1, 2, 3], 'Índice de Consistencia (K) para Grupos 1, 2 y 3');

graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, [4, 5, 9], 'Índice de Consistencia (K) para Grupos 4, 5 y 9');

graficar_K_por_grupos(matriz_K, config_grupos, [6, 7, 8], 'Índice de Consistencia (K) para Grupos 6, 7 y 8');

%-----

% Calcular y graficar el error relativo entre el promedio y la regresión ajustada

%-----

figure;

hold on;

colores = lines(n_ensayos); % Colores únicos para cada ensayo

x_box = [0, 1999, 1999, 25];

y_box = [-5, -5, 5, 5];

fill(x_box, y_box, [0.5, 1, 0.5], 'FaceAlpha', 0.3, 'EdgeColor', 'none', 'DisplayName', 'Área de Aceptación');

for ensayo_num = 9:n_ensayos

 % Calcular el error relativo entre la regresión y el promedio de las mediciones

 fuerza_prom = matriz_fuerza(:, ensayo_num);

 fit_regresion = matriz_fit1(:, ensayo_num); % Usando matriz_tau1 como regresión ajustada

Ingeniería Mecánica - 2025

```
% Asegurar que ambas matrices tengan el mismo tamaño y no contengan NaN
min_length = 1900;
fuerza_prom = fuerza_prom(1:min_length);
fit_regresion = fit_regresion(1:min_length);

valid_idx = ~isnan(fuerza_prom) & ~isnan(fit_regresion);
fuerza_prom = fuerza_prom(valid_idx);
fit_regresion = fit_regresion(valid_idx);

% Calcular el error relativo en porcentaje
error_relativo = (fuerza_prom - fit_regresion);

% Graficar el error relativo para el ensayo actual
plot(25:length(error_relativo), error_relativo(25:length(error_relativo)), '-', 'Color',
colores(ensayo_num, :), ...
'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('Ensayo %d', ensayo_num));
end

xlabel('Puntos de Datos', 'FontSize', 20);
ylabel('Error Relativo (%)', 'FontSize', 20);
title('Error Relativo entre Regresión y Promedio para Cada Ensayo', 'FontSize', 25);
grid on;
hold off;
```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

%-----
% Crear una figura separada para la leyenda personalizada (Grupos 1, 6 y 9)
%-----
figure;
axis off; % Ocultar ejes

% Posición inicial para el primer elemento
x_start = 0.1;
y_start = 0.9;
box_width = 0.05;
box_height = 0.05;
spacing = 0.1; % Espacio entre las etiquetas

% Datos de configuración para los grupos específicos
config_grupos_leyenda = {
    'Grupo 1 (Ensayos 1-7)', 'r', 'Velocidad: 1 mm/s';
    'Grupo 6 (Ensayos 16-17)', 'y', 'Velocidad: 3 mm/s';
    'Grupo 9 (Ensayos 22-23)', [1, 0.5, 0], 'Velocidad: 5 mm/s';
};

% Calcular las dimensiones del rectángulo ajustado a la leyenda
total_height = size(config_grupos_leyenda, 1) * spacing + 0.05;
rectangle('Position', [x_start-0.05, y_start - total_height, 0.5, total_height], ...
    'FaceColor', [1 1 1], 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```

% Dibujar los elementos de la leyenda
for i = 1:size(config_grupos_leyenda, 1)
    % Dibujar un pequeño rectángulo de color
    rectangle('Position', [x_start, y_start - i * spacing, box_width, box_height], ...
        'FaceColor', config_grupos_leyenda{i, 2}, 'EdgeColor', 'k');

    % Agregar el texto del grupo y la velocidad de extrusión
    text(x_start + 0.08, y_start - i * spacing + 0.015, ...
        sprintf('%s - %s', config_grupos_leyenda{i, 1}, config_grupos_leyenda{i, 3}), ...
        'FontSize', 12, 'Color', 'k');
end

% Ajustar la figura
title('Leyenda de Grupos y Velocidad de Extrusión', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');

%-----
% Crear una figura separada para la leyenda personalizada (Grupos 2, 5 y 7)
%-----

figure;
axis off; % Ocultar ejes

% Posición inicial para el primer elemento
x_start = 0.1;
y_start = 0.9;
box_width = 0.05;

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
box_height = 0.05;
spacing = 0.1; % Espacio entre las etiquetas

% Datos de configuración para los grupos específicos
config_grupos_leyenda = {
    'Grupo 2 (Ensayos 8-9)', 'b', 'Velocidad: 1 mm/s';
    'Grupo 5 (Ensayos 14-15)', 'c', 'Velocidad: 3 mm/s';
    'Grupo 7 (Ensayos 18-19)', 'k', 'Velocidad: 5 mm/s';
};

% Calcular las dimensiones del rectángulo ajustado a la leyenda
total_height = size(config_grupos_leyenda, 1) * spacing + 0.05;
rectangle('Position', [x_start-0.05, y_start - total_height, 0.5, total_height], ...
    'FaceColor', [1 1 1], 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);

% Dibujar los elementos de la leyenda
for i = 1:size(config_grupos_leyenda, 1)
    % Dibujar un pequeño rectángulo de color
    rectangle('Position', [x_start, y_start - i * spacing, box_width, box_height], ...
        'FaceColor', config_grupos_leyenda{i, 2}, 'EdgeColor', 'k');

% Agregar el texto del grupo y la velocidad de extrusión
text(x_start + 0.08, y_start - i * spacing + 0.015, ...
    sprintf('%s - %s', config_grupos_leyenda{i, 1}, config_grupos_leyenda{i, 3}), ...
    'FontSize', 12, 'Color', 'k');
```

Ingeniería Mecánica - 2025

end

% Ajustar la figura

title('Leyenda de Grupos y Velocidad de Extrusión', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');

%-----

% Crear una figura separada para la leyenda personalizada (Grupos 3, 4 y 8)

%-----

figure;

axis off; % Ocultar ejes

% Posición inicial para el primer elemento

x_start = 0.1;

y_start = 0.9;

box_width = 0.05;

box_height = 0.05;

spacing = 0.1; % Espacio entre las etiquetas

% Datos de configuración para los grupos específicos

config_grupos_leyenda = {

 'Grupo 3 (Ensayos 10-11)', 'g', 'Velocidad: 1 mm/s';

 'Grupo 4 (Ensayos 12-13)', 'm', 'Velocidad: 3 mm/s';

 'Grupo 8 (Ensayos 20-21)', [0.5, 0.5, 0.5], 'Velocidad: 5 mm/s';

};

Ingeniería Mecánica - 2025

```

% Calcular las dimensiones del rectángulo ajustado a la leyenda
total_height = size(config_grupos_leyenda, 1) * spacing + 0.05;
rectangle('Position', [x_start-0.05, y_start - total_height, 0.5, total_height], ...
    'FaceColor', [1 1 1], 'EdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);

% Dibujar los elementos de la leyenda
for i = 1:size(config_grupos_leyenda, 1)
    % Dibujar un pequeño rectángulo de color
    rectangle('Position', [x_start, y_start - i * spacing, box_width, box_height], ...
        'FaceColor', config_grupos_leyenda{i, 2}, 'EdgeColor', 'k');

    % Agregar el texto del grupo y la velocidad de extrusión
    text(x_start + 0.08, y_start - i * spacing + 0.015, ...
        sprintf('%s - %s', config_grupos_leyenda{i, 1}, config_grupos_leyenda{i, 3}), ...
        'FontSize', 12, 'Color', 'k');
end

% Ajustar la figura
title('Leyenda de Grupos y Velocidad de Extrusión', 'FontSize', 16, 'FontWeight', 'bold');

%-----
% Crear tabla con resultados para 24 ensayos
%-----

% Encabezados de la tabla
encabezados = {'Ensayo'; 'Temperatura (°C)'; 'Distancia L (mm)'; 'Indice Flujo n'; ...

```

Diseño y construcción de un dispositivo para la determinación de parámetros reológicos en pulpas

Ingeniería Mecánica - 2025

'Lambda'; 'Tension Adimensional Tw'; 'Presion P (Pa)'; ...

'Indice Consistencia K'; 'Tipo Material'};

% Crear matriz para almacenar los resultados

tabla_resultados = cell(n_ensayos + 1, length(encabezados));

tabla_resultados(1, :) = encabezados; % Primera fila con encabezados

% Temperaturas definidas para cada ensayo

temperaturas = [30, 35, 40, 45, 50,5 55, 60, 60, 40, 45, 40, 45, 30, 35, ...

30, 35, 30, 35, 30, 35, 30, 35, 30, 30];

% Clasificación del tipo de material

tipos_material = cell(n_ensayos, 1);

for i = 1:n_ensayos

if matriz_n(i) < 1

tipos_material{i} = 'Pseudoplastico';

elseif matriz_n(i) > 1

tipos_material{i} = 'Dilatante';

else

tipos_material{i} = 'Newtoniano';

end

end

% Rellenar la tabla con los datos de los ensayos

for i = 1:n_ensayos

Ingeniería Mecánica - 2025

```

tabla_resultados{i + 1, 1} = i;           % Ensayo
tabla_resultados{i + 1, 2} = temperaturas(i);   % Temperatura (°C)
tabla_resultados{i + 1, 3} = matriz_L(i);      % Distancia L (mm)
tabla_resultados{i + 1, 4} = matriz_n(i);     % Índice de Flujo n
tabla_resultados{i + 1, 5} = matriz_lambda(i); % Lambda
tabla_resultados{i + 1, 6} = matriz_Tw(i);    % Tensión Adimensional Tw
tabla_resultados{i + 1, 7} = matriz_P(i);     % Presión P (Pa)
tabla_resultados{i + 1, 8} = matriz_K(i);     % Índice de Consistencia K
tabla_resultados{i + 1, 9} = tipos_material{i}; % Tipo de Material
end

%-----
% Exportar la tabla a un archivo CSV
%-----

nombre_archivo = 'resultados_ensayos_24.csv';
fid = fopen(nombre_archivo, 'w');
if fid == -1
    error('No se pudo abrir el archivo para escritura: %s', nombre_archivo);
end

% Escribir encabezados
fprintf(fid, '%s;', encabezados{1:end-1});
fprintf(fid, '%s\n', encabezados{end});

% Escribir los datos

```

Ingeniería Mecánica - 2025

```
for i = 2:size(tabla_resultados, 1)
    fprintf(fid, '%d;%d;%0.6f;%0.6f;%0.6f;%0.6f;%0.6f;%0.6f;%s\n', ...
        tabla_resultados{i, 1}, tabla_resultados{i, 2}, tabla_resultados{i, 3}, ...
        tabla_resultados{i, 4}, tabla_resultados{i, 5}, tabla_resultados{i, 6}, ...
        tabla_resultados{i, 7}, tabla_resultados{i, 8}, tabla_resultados{i, 9});
end

fclose(fid);
disp(['Archivo exportado como: ', nombre_archivo]);
```