



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ONDAS SUPERFICIALES DE GRAVEDAD BAJO FORZANTE ARMÓNICO EN FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO EDUARDO PARADA DÍAZ

PROFESOR GUÍA:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

PROFESOR CO-GUIA:
CLAUDIO FALCÓN BEAS

COMISIÓN:
YARKO NIÑO CAMPOS

Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT N°1161751

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: GONZALO EDUARDO PARADA DÍAZ
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: DR. ALDO TAMBURRINO
TAVANTZIS
PROF. CO GUÍA: DR. CLAUDIO FALCÓN

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ONDAS SUPERFICIALES DE GRAVEDAD BAJO FORZANTE ARMÓNICO EN FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS

Las ondas superficiales de gravedad son aquellas perturbaciones del equilibrio estático que se propagan a través de la superficie de un fluido y en donde predominan los efectos gravitacionales. Estas han sido ampliamente estudiadas para el caso del agua, donde su baja viscosidad permite realizar aproximaciones que facilitan el desarrollo analítico. El desarrollo analítico del caso viscoso ha sido propuesto y comprobado experimentalmente por diferentes autores, mientras que el caso no newtoniano no ha sido ampliamente desarrollado, de modo la respuesta de este tipo de fluidos en función de su posición, ante una perturbación armónica, no ha sido estudiada.

Para determinar la respuesta de un fluido pseudoplástico bajo un forzante armónico, se opta por el desarrollo experimental. En este, se utiliza una mezcla de goma xanthan con agua destilada al 0,58% peso/peso, la cual presenta un comportamiento pseudoplástico a bajas tasas de deformación, incluso menores a las esperadas para este estudio. Para determinar los efectos que la viscosidad pueda tener sobre la longitud de onda, la celeridad o la atenuación, se realizan 3 campañas de experimentos, las que contemplan 50 configuraciones de amplitud (1 a 3 cm) y frecuencia (3 a 5 Hz). La instalación experimental consiste en un canal de acrílico y una paleta accionada por servomotor y controlada por Arduino. Para la medición de la deformación de la superficie se utiliza la perfilometría por transformada de Fourier (FTP). Los resultados obtenidos para la longitud de onda, celeridad y atenuación son comparados con el comportamiento teórico y experimental para el agua y glicerina al 70%.

Se determina que la amplitud decae exponencialmente a lo largo del canal, de modo que el coeficiente de atenuación aumenta con la frecuencia aplicada. La longitud de onda disminuye a medida que se aumenta la frecuencia aplicada, pero aumentan a medida que la onda se propaga en función de la posición en el canal y la frecuencia aplicada. No se cuantificó la variación de la tasa de deformación angular a lo largo del canal, pero se concluye a partir de los resultados obtenidos que esta disminuye a lo largo del canal producto de la disminución de la amplitud.

Dedicatoria

You can always do more; the important thing is to do something.

Agradecimientos

Primero que nada, me gustaría agradecer a todos aquellos que hicieron posible este trabajo de título, a aquellos encargados de laboratorio, aquellas personas que me ayudaron con temas en los que no me manejaba tan bien y en particular al profe Aldo que me apoyó durante el desarrollo de esta tesis.

A los cabros y cabras de la rama de atletismo, y a todos y todas l@s que conocí producto de esta, sin duda me hicieron gozar mucho más la experiencia de ser parte de una rama en la universidad.

A todas las personas que conocí durante estos largos años en la universidad, incluso aquellas con las cuales no compartí mucho, pero de las que de igual modo aprendí. Especial énfasis en los chicos del pool, los mochileros xd, nico, tomas, seba, francisco, fabian, javier, carlos y momo por las tardes de ping-pong, taca-taca, pool, hasta el punto de alcanzar el vicio, vaciar los bolsillos o servir simplemente para liberar el estrés previo a un control forman parte de mis mejores recuerdos del plan común.

A los australes, nico, francisco y seba, por los mochileos (incluso aunque nos hayamos quedado en panne), por las maratones de marvel, por los memes, por lo que viene.

A todos los que conocí en civil e hidráulica, los civilebrios y los hidraulichicos, a todos con los que compartí tanto dentro como fuera de la U durante todos estos años.

Al doggo's team con el nico y el fabián, por todas esas horas de manqueos, rabias y emociones puestas en cada juego, que más que liberar estrés, nos sirvieron para mantenernos en contacto, aunque hayamos seguido carreras diferentes.

Al tomás por estar durante todos estos años, tanto en civil, hidráulica o fuera de la U. Al nico por todos los memes, horas de estrés, inquietudes estúpidas, o cualquier cosa que se pueda generar en nuestras conversaciones sin sentido.

A la mari, por ser una de mis mejores amigas tanto dentro como fuera de la U, por mostrarme cosas que quizá por mi cuenta jamás habría probado, por servirme de apoyo y escucharme cuando lo necesité.

A la Xiomara, porque a pesar de todos estos años, todos los altos y bajos, aún sigue ahí, por todas las risas, todas las salidas, todos esos buenos momentos, por hacerme crecer como persona, por entenderme, soportarme y quererme como soy.

Por último, pero no menos importante, a mi familia, en particular a mis viejos, que se han preocupado de que ni yo, ni a mis hermanos nos falte nada y podamos seguir el camino que queramos en nuestras vidas. Por su esfuerzo, por su devoción.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	15
1.1	Motivación	15
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos Generales	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Organización Informe	17
2	Marco teórico	18
2.1	Ondas Armónicas.....	18
2.2	Ondas superficiales de gravedad.....	19
2.3	Reología Y Reometría.....	25
2.4	Fluidos No Newtonianos	26
2.5	Dificultad del problema teórico	30
2.6	Perfilometría transformada de Fourier.....	31
3	Metodología experimental	33
3.1	Instalación experimental.....	33
3.2	Metodología elaboración de Mezclas	36
3.3	Metodología FTP.....	37
3.4	Metodología para caracterizar la Reología.....	39
3.5	Metodología de calibración de movimiento forzante	40
3.6	Metodología obtención de resultados.....	41
3.6.1	Determinación longitud de onda	41
3.6.2	Determinación coeficiente de atenuación	43
3.6.3	Determinación celeridad	43
4	Movimiento Sinusoidal	44
4.1	Calibración servo motor	44
4.2	Código arduino	47
4.3	Verificación de la frecuencia.....	49
4.4	Verificación amplitud de la carrera	50
4.5	Movimiento Vertical.....	51
4.6	Movimiento con respecto a sinusoidal ideal	51

5	Definición de Variables.....	53
5.1	Determinación amplitudes y frecuencias a utilizar.....	53
5.1.1	Capacidad del sistema	53
5.1.2	Rango de tasas de deformación angular	53
5.2	Elección de mezcla a utilizar	54
5.3	Conjunto de experimentos	58
6	Presentación de resultados.....	60
6.1	Reología.....	60
6.1.1	Reología goma xanthan.....	60
6.1.2	Reología glicerina 70%.....	63
6.2	FTP	64
6.2.1	Perfil longitudinal	64
6.2.2	Efecto de la viscosidad sobre amplitud.....	66
6.2.3	Efecto de la viscosidad y frecuencia sobre la celeridad.....	70
6.2.4	Efecto de la viscosidad sobre longitud de onda	72
7	Discusión.....	80
7.1	Movimiento del generador de ondas	80
7.2	Reología.....	80
7.3	Efecto de la viscosidad sobre la amplitud	81
7.4	Efecto de la viscosidad sobre longitud de onda	82
7.5	Efecto de la viscosidad sobre la celeridad	83
8	Conclusión	84
9	Bibliografía	86
	Anexos	88
A.1	Sistema de movimiento.....	88
A.1.1	Verificación amplitud de movimiento.....	88
A.1.2	Movimiento Sinusoidal	91
A.1.3	Confiabilidad del movimiento	103
A.2	Reologías.....	105
A.2.1	Campaña 1 en goma xanthan.....	105
A.2.2	Campaña 2 en goma xanthan.....	106
A.2.3	Campaña 3 en goma xanthan.....	108

A.3	Perfiles longitudinales	110
A.3.1	Perfiles longitudinales campaña 1 en goma xanthan	110
A.3.2	Perfiles longitudinales campaña 3 en goma xanthan	112
A.3.3	Perfiles longitudinales campaña en glicerina 70%	115
A.4	Variación de la amplitud	119
A.4.1	Promedio entre campañas	119
A.4.2	Campaña 1 en goma xanthan	120
A.4.3	Campaña 2 en goma xanthan	122
A.4.4	Campaña 3 en goma xanthan	124
A.4.5	Campaña en Glicerina 70%	126
A.4.6	Campaña en Agua destilada	129
A.5	Variación en la longitud de onda	132
A.5.1	Promedio entre campañas goma xanthan	132
A.5.2	Campaña 1 de experimentos en goma xanthan	134
A.5.3	Campaña 2 de experimentos en goma xanthan	136
A.5.4	Campaña 3 de experimentos en goma xanthan	138
A.5.5	Campaña en glicerina 70%	140
A.5.6	Campaña en agua destilada	143
A.6	Longitud de onda adimensional en función de amplitud adimensional.....	146
A.6.1	Campaña 1 de experimentos en goma xanthan	146
A.6.2	Campaña 2 de experimentos en goma xanthan	147
A.6.3	Campaña 3 de experimentos en goma xanthan	147
A.6.4	Campaña en glicerina 70%	148
A.6.5	Campaña en agua destilada	148

Índice de Tablas

Tabla 4.1: <i>Se</i> requerido para una determinada amplitud y frecuencia.	45
Tabla 4.2: Frecuencias esperadas y frecuencias a ingresar en Código Arduino calculadas a partir de ecuación (4.1).....	48
Tabla 4.3: Valor step para cada configuración de amplitud y frecuencia.	49
Tabla 4.4: Frecuencias esperadas y frecuencias observadas según calibración.	49
Tabla 4.5: Frecuencia esperada versus frecuencia real según amplitud de carrera de paleta.....	50
Tabla 5.1: Valores mínimos y máximos de la tasa de deformación angular $s - 1$ en experimentos según frecuencia y amplitud de onda.	54
Tabla 5.2: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para campaña 1, en goma xanthan.....	58
Tabla 5.3: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para campaña 2, en goma xanthan.....	59
Tabla 5.4: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para campaña 3, en goma xanthan.....	59
Tabla 5.5: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para experimentos en agua.	59
Tabla 5.6: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para experimentos en Glicerina 70%.	59
Tabla 6.1: Coeficientes K y n promedio para reologías en goma xanthan según campaña de experimentos.....	63
Tabla 6.2: Valor de A_0 promedio para 3 campañas de experimentos realizadas en goma xanthan según frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta (cm).....	67
Tabla 6.3: Coeficientes de atenuación según campaña de experimentos en goma xanthan y frecuencia aplicada en Hz.	68
Tabla 6.4: Coeficientes de atenuación según frecuencia para experimentos en agua y glicerina 70%.	68
Tabla 6.5: Celeridad y su error según campaña de experimento y frecuencia.....	70
Tabla 6.6: Valores longitud de onda promedio entre campañas para goma xanthan en función de la frecuencia. Continúa	72
Tabla 6.7: Valores longitud de onda promedio entre campañas para goma xanthan en función de la frecuencia.....	73
Tabla 6.8: Posición adimensional x/h promedio entre campañas para goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.	73
Tabla 6.9: Valores promedio en la longitud de onda para agua, glicerina y campañas en goma xanthan en función de la frecuencia.....	78
Tabla A 9.1: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 1,0 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.....	88

Tabla A 9.2: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 1,5 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.....	88
Tabla A 9.3: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 2,0 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.....	89
Tabla A 9.4: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 2,5 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.....	89
Tabla A 9.5: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 3,0 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.....	90
Tabla A 9.6: Velocidad de servo motor (cm/s) y confiabilidad del sistema de movimiento en función de la amplitud de carrera de paleta, en cm y frecuencia en Hz.	103
Tabla A 9.7: A/A_0 promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	119
Tabla A 9.8: x/h promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.	119
Tabla A 9.9: Valor A_0 por experimento para campaña 1 en goma xanthan en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).....	120
Tabla A 9.10: Valor A/A_0 para campaña 1 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	121
Tabla A 9.11: Valor x/h para campaña 1 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	121
Tabla A 9.12: Valor A_0 por experimento para campaña 2 en goma xanthan en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).....	122
Tabla A 9.13: Valor A/A_0 para campaña 2 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	123
Tabla A 9.14: Valor x/h para campaña 2 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	123
Tabla A 9.15: Valor A_0 por experimento para campaña 3 en goma xanthan en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).....	124
Tabla A 9.16: Valor A/A_0 para campaña 3 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	125
Tabla A 9.17: Valor x/h para campaña 3 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	125
Tabla A 9.18: Valor A_0 por experimento para campaña en Glicerina 70% en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).	126
Tabla A 9.19: Valor A/A_0 para campaña de experimentos glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.	127
Tabla A 9.20: Valor x/h para campaña 3 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	128
Tabla A 9.21: Valor A_0 por experimento para campaña en agua destilada en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).....	129
Tabla A 9.22: Valor A/A_0 para campaña de experimentos glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.	130

Tabla A 9.23: Valor x/h para campaña de experimentos en agua destilada en función de la frecuencia aplicada.....	131
Tabla A 9.24: Valor λ_0 (cm) promedio entre campaña de experimentos en goma xanthan.	132
Tabla A 9.25: λ/λ_0 promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	133
Tabla A 9.26: x/h promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	133
Tabla A 9.27: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña 1 en goma xanthan.	134
Tabla A 9.28: λ/λ_0 campaña 1 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	135
Tabla A 9.29: x/h campaña 1 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	135
Tabla A 9.30: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña 2 en goma xanthan.	136
Tabla A 9.31: λ/λ_0 campaña 2 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	137
Tabla A 9.32: x/h campaña 2 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	137
Tabla A 9.33: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña 3 en goma xanthan.	138
Tabla A 9.34: λ/λ_0 campaña 3 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	139
Tabla A 9.35: x/h campaña 3 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.....	139
Tabla A 9.36: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña en glicerina 70%.	140
Tabla A 9.37: λ/λ_0 campaña de experimentos realizadas en glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.....	141
Tabla A 9.38: x/h campaña de experimentos realizadas en glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.....	142
Tabla A 9.39: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña en agua destilada.	143
Tabla A 9.40: λ/λ_0 campaña de experimentos realizadas en glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.....	144
Tabla A 9.41: x/h campaña de experimentos realizadas en agua destilada en función de la frecuencia aplicada.....	145

Índice de Ilustraciones

Figura 2.1: Posición en el tiempo de una onda armónica con periodo T , amplitud A y desfase $\phi=0$ Modificado de Fritz, K, (1997).....	19
Figura 2.2: Reómetro rotativo RheolabQC. Recuperado de https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rotational-rheometer-rheolabqc	26
Figura 2.3: Comportamiento general de la sangre (fluido pseudoplástico). A bajas y altas tasas de deformación el comportamiento tiende a una viscosidad constante y en un rango intermedio presenta una relación de potencia entre τ y $\dot{\gamma}$. Modificado de Biasetti, J, et al (2010) para el modelo de Carreau-Yasuda.	29
Figura 3.1: Dimensiones canal	33
Figura 3.2: Sección transversal	33
Figura 3.3: Sistema de movimiento, sistema de engranes. Vista longitudinal.	34
Figura 3.4: Sistema de movimiento, unión servo-engrane. Vista en planta.....	34
Figura 3.5: Cámara Phantom v641 Cinemag.	35
Figura 3.6: Lente Nikon AF-S DX 35mm f/1.8G.	35
Figura 3.7: Proyector Epson Powerlite HomeCinema 8350.	36
Figura 3.8: Cámara Photron Fastcam Mini UX50.	36
Figura 3.9: Disposición recipiente y paleta mezcladora.....	37
Figura 3.10: Disposición cámara-proyector para realizar FTP.	38
Figura 3.11: Disposición cámara-canal para calibración de movimiento de la paleta. ...	40
Figura 3.12: Esquema de numeración de longitudes de onda.	41
Figura 3.13: Longitudes de onda sin filtrar para frecuencia de 3,4 Hz y amplitudes de carrera de paleta de 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, y 3,0 cm.	42
Figura 3.14: Longitudes de onda filtradas para frecuencia de 3,4 Hz y amplitudes de carrera de paleta de 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, y 3,0 cm.	42
Figura 4.1: Posición sistema de movimiento controlado por servo en canal.	44
Figura 4.2: Calibración de frecuencia a partir de datos obtenidos en calibración. Dato que se desvía de la tendencia no se considera en la calibración.....	45
Figura 4.3: Amplitud de carrera de paleta real medida en función de la frecuencia	50
Figura 4.4: Movimiento vertical para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).	51
Figura 4.5: Movimiento sinusoidal para amplitud de paleta de 3,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).....	52
Figura 5.1: Esquema de máxima y mínima amplitud de oscilación en el canal para determinar tasas de deformación angular en onda cuya amplitud se disipa producto de la viscosidad.....	53
Figura 5.2: Reología mezcla con CMC al 0,5 % peso/peso a 18°C.	55
Figura 5.3: Diagrama reológico CMC al 0,5 % peso/peso a 18°C.	55
Figura 5.4: Reología mezcla con CMC al 0,5% peso/peso a 26°C.	55
Figura 5.5: Diagrama reológico CMC al 0,5 % peso/peso a 26°C.	56
Figura 5.6: Viscosidad efectiva de soluciones de goma xanthan, Song et al (2006)	57

Figura 6.1: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 1 a 19°C.	60
Figura 6.2: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 2 a 19°C.	60
Figura 6.3: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 3 a 19°C.	61
Figura 6.4: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 1 a 19°C.	61
Figura 6.5: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 2 a 19°C.	62
Figura 6.6: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 3 a 19°C.	62
Figura 6.7: Diagrama reológico de glicerina diluida al 70% con agua destilada a 19°C.	63
Figura 6.8: Viscosidad efectiva de glicerina diluida al 70% con agua destilada a 19°C.	64
Figura 6.9: Perfiles longitudinales según frecuencia para segunda campaña de experimentos en goma xanthan. Eje horizontal corresponde a posición de la onda en el canal. En la simbología se presenta la amplitud de carrera de paleta para cada frecuencia. Continúa.....	64
Figura 6.10: Perfiles longitudinales según frecuencia para segunda campaña de experimentos en goma xanthan. Eje horizontal corresponde a posición de la onda en el canal. En la simbología se presenta la amplitud de carrera de paleta para cada frecuencia. Continúa.....	65
Figura 6.11: Perfiles longitudinales según frecuencia para segunda campaña de experimentos en goma xanthan. Eje horizontal corresponde a posición de la onda en el canal. En la simbología se presenta la amplitud de carrera de paleta para cada frecuencia	66
Figura 6.12: Variación de la amplitud en función de la posición. Promedio entre campañas para goma xanthan.	67
Figura 6.13: Coeficiente de atenuación β en función de la frecuencia para campañas 1, 2 y 3 en goma xanthan, en glicerina 70%, agua destilada. Círculos rojos, amarillos y azules, cuadrado gris y triángulo celeste corresponden a los coeficientes ajustados a partir de datos experimentales, mientras que líneas punteadas gris y negras corresponden al ajuste según la ecuación de Stokes (Ecuación (2.53)), considerando $\rho = 1.260 (kg/m^3)$, $\mu = 0,029 Pa s$ y $\gamma = 0,067 (kg/s^2)$ para glicerina y	69
Figura 6.14: Celeridad adimensional promedio en función de longitud de onda adimensional promedio para campañas de experimentos en goma xanthan (círculos), agua (triángulos) y glicerina 70% (cuadrados). Valor teórico calculada a partir de la ecuación (2.12) según el número de onda k determinado para una frecuencia f según la ecuación (2.12) para el caso invíscido.	71
Figura 6.15: Longitud de onda promedio entre campañas de experimentos en goma xanthan en función de la posición adimensional y la frecuencia aplicada.	72
Figura 6.16: Longitud de onda adimensional en función de posición adimensional para experimentos en goma xanthan.	74
Figura 6.17: Longitud de onda adimensional en función de posición adimensional para experimentos en Glicerina 70%.....	74
Figura 6.18: Longitud de onda adimensional en función de posición adimensional para experimentos en agua.....	75

Figura 6.19: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para promedio entre campañas realizadas en goma xanthan.	76
Figura 6.20: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para experimentos realizados en glicerina 70%.	76
Figura 6.21: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para experimentos realizados en agua.....	77
Figura 6.22: Variación de la longitud de onda en función de la frecuencia para agua, glicerina y el promedio entre las campañas realizadas para el caso pseudoplástico.....	78
Figura A 9.1: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).	91
Figura A 9.2: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).	91
Figura A 9.3: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).	92
Figura A 9.4: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).	92
Figura A 9.5: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).	92
Figura A 9.6: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).	93
Figura A 9.7: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).	93
Figura A 9.8: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).	93
Figura A 9.9: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).	94
Figura A 9.10: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).	94
Figura A 9.11: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).	94
Figura A 9.12: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).	95
Figura A 9.13: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).	95
Figura A 9.14: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).	95
Figura A 9.15: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).	96
Figura A 9.16: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).	96
Figura A 9.17: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).	96
Figura A 9.18: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).	97
Figura A 9.19: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).	97
Figura A 9.20: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).	98
Figura A 9.21: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).	98
Figura A 9.22: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).	99
Figura A 9.23: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).	99
Figura A 9.24: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz). ...	100
Figura A 9.25: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz). ...	100
Figura A 9.26: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz). ...	100
Figura A 9.27: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz). ...	101
Figura A 9.28: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz). ...	101
Figura A 9.29: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz). ...	101
Figura A 9.30: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz). ...	102
Figura A 9.31: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 1 a 19°C.	105

Figura A 9.32: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 1 a 19°C.	105
Figura A 9.33. Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 19°C.	106
Figura A 9.34: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 19°C.	106
Figura A 9.35: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 20°C.	107
Figura A 9.36: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 20°C.	107
Figura A 9.37: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 3 a 19°C.	108
Figura A 9.38: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 3 a 19°C.	108
Figura A 9.39: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 3 a 20°C.	109
Figura A 9.40: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 3 a 20°C.	109
Figura A 9.41: Perfiles longitudinales para campaña 1 de experimentos con goma xanthan. Continúa	110
Figura A 9.42: Perfiles longitudinales para campaña 1 de experimentos con goma xanthan. Continúa	111
Figura A 9.43: Perfiles longitudinales para campaña 1 de experimentos con goma xanthan.....	112
Figura A 9.442: Perfiles longitudinales para campaña 3 de experimentos con goma xanthan. Continúa	112
Figura A 9.452: Perfiles longitudinales para campaña 3 de experimentos con goma xanthan. Continúa	113
Figura A 9.46: Perfiles longitudinales campaña 3 de experimentos para goma xanthan.	114
Figura A 9.47: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. Continúa.....	115
Figura A 9.48: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. Continúa.....	116
Figura A 9.49: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. Continúa.....	117
Figura A 9.50: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. ...	118
Figura A 9.51: Variación de la amplitud en función de la posición para campaña 1 en goma xanthan.....	120
Figura A 9.52: Variación de la amplitud en función de la posición para campaña 1 en goma xanthan.....	122

Figura A 9.53: Variación de la amplitud en función de la posición para campaña 3 en goma xanthan.....	124
Figura A 9.54: Variación de la amplitud en función de la posición para experimentos en glicerina 70%.....	126
Figura A 9.55: Variación de la amplitud en función de la posición para experimentos en agua	129
Figura A 9.56: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña 1 de experimentos en goma xanthan.	134
Figura A 9.57: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña 2 de experimentos en goma xanthan.	136
Figura A 9.58: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña 3 de experimentos en goma xanthan.	138
Figura A 9.59: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña de experimentos en glicerina 70%.....	140
Figura A 9.60: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña de experimentos en glicerina 70%.....	143
Figura A 9.61: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña 1 en goma xanthan.....	146
Figura A 9.62: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña 2 en goma xanthan.....	147
Figura A 9.63: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña 3 en goma xanthan.....	147
Figura A 9.64: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña en glicerina 70%.....	148
Figura A 9.65: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña en agua destilada.	148

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Las ondas superficiales de gravedad corresponden a aquellas perturbaciones del equilibrio que se propagan por la superficie de un líquido, cuyas características dependen del origen de la perturbación y de las propiedades del fluido. Se habla de ondas superficiales de gravedad cuando el efecto de las fuerzas gravitacionales predomina por sobre el efecto de la tensión superficial, de modo que se cumple que $\rho g \gg \sigma/\lambda^2$, siendo ρ [kg/m^3], la densidad del fluido, g [m/s^2], la aceleración de gravedad, σ [Nm^{-1}], la tensión superficial y λ [m], la longitud de onda (Fritz, 1997).

El estudio de ondas superficiales de gravedad en agua ha sido ampliamente estudiado, tanto analítica como experimentalmente, puesto que su baja viscosidad permite hacer aproximaciones que desprecien los efectos no lineales de la viscosidad, tanto para el caso de aguas profundas ($h \gg \lambda$), como para aguas someras ($h \ll \lambda$), siendo h (m), la profundidad del líquido en reposo.

El desarrollo para el caso newtoniano - viscoso se ha centrado principalmente en el desarrollo de su relación de dispersión, la cual corresponde a la relación entre la frecuencia y la longitud de onda de la onda que se propaga en el líquido. En 1932, Lamb presentó la relación de dispersión para fluidos viscosos con pequeñas perturbaciones, en 1986, LeBlond et al presentaron una solución completa para pequeñas oscilaciones en la superficie de un fluido viscoso, incluyendo los límites de propagación para bajos y altos números de onda. En este, compararon los efectos en fluidos de distinta viscosidad, tales como el glicol, aceite y glicerina, considerando como caso base el agua. En 2018, Armaroli et al discutieron el impacto de la viscosidad en la propagación no lineal de ondas superficiales en aguas profundas.

El caso no newtoniano no ha sido plenamente desarrollado. En 1993, Saasen et al analizaron el caso de pequeña amplitud de onda mediante el desarrollo experimental en fluidos pseudoplásticos de diferente viscosidad e índice de flujo (n). Estos fueron sometidos a tasas de deformación entre 0,1 y 100 ($1/s$) y se registró la relación entre la velocidad de fase y el número de onda, comparando con el caso invíscido, notando que la velocidad de fase en fluidos pseudoplásticos se ajusta de manera consistente al caso invíscido. En 2011, Przadka et al compararon, mediante un desarrollo experimental, el coeficiente de atenuación de una onda superficial que se propaga en agua con dióxido de titanio (TiO_2) con una onda que se propaga en agua mezclada con pintura, usualmente considerado como un fluido pseudoplástico. En este caso se encontró que el coeficiente de atenuación para la mezcla de agua y pintura era significativamente mayor que en la mezcla de agua con dióxido de titanio, presentando un comportamiento relativamente lineal con respecto a la frecuencia.

Los fluidos no newtonianos son ampliamente utilizados en la industria para distintos usos, como es el caso de la industria alimentaria, en donde la mezcla con ciertas sustancias genera mezclas no newtonianas, como es la mezcla de agua con carboximetilcelulosa (Benchabane et Al, 2008), la goma xanthan (Song et al, 2006), la goma agar (Zhang et Al, 2012) entre otras. También en la naturaleza es posible encontrar numerosos ejemplos de fluidos no newtonianos, como es el caso de los pantanos, cuya combinación de agua con materia orgánica forma un fluido no newtoniano, (Deshpande et Al, 2010). Las arenas movedizas, que presentan una apariencia sólida en reposo, pero al ser sometida a esfuerzos, se produce una disminución de su viscosidad.

El desarrollo analítico en fluidos no newtonianos se dificulta al no poder desprestigiar los efectos de la viscosidad en la ecuación de Navier-Stokes, debiendo incluir las componentes no lineales asociadas a que la viscosidad es constante con respecto a la deformación, como sucede en el caso newtoniano, de modo que un enfoque experimental sirve como primera aproximación al estudio de la respuesta de este tipo de fluidos con respecto a la propagación de ondas superficiales.

En la actualidad se han desarrollado técnicas de medición no intrusivas que permiten determinar la propagación de una perturbación en la superficie de un líquido. Dentro de estas técnicas, se encuentra la perfilometría por transformada de Fourier (FTP), la cual consiste en la proyección de franjas con distinta tonalidad de grises sobre la superficie, y que, al ser perturbadas, permite registrar el avance de la onda mediante fotografías.

El principal objetivo de este trabajo corresponde a la cuantificación y caracterización del efecto de la viscosidad de fluidos no newtonianos a partir de un desarrollo experimental. En este, mediante el uso de la técnica FTP, se pretende determinar la respuesta frente a una perturbación armónica en la longitud de onda, celeridad y atenuación para distintas configuraciones de amplitud y frecuencia

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Generales

Se busca determinar la respuesta de un fluido pseudoplástico tipo Ostwald-de Waele frente a sollicitaciones armónicas y de este modo ampliar el conocimiento relativo a la propagación de ondas gravitacionales superficiales en este tipo de fluidos.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar experimentalmente las características de la propagación de ondas superficiales gravitacionales en un fluido pseudoplástico generadas por una sollicitación armónica mediante técnicas de medición no intrusivas.
2. Estudiar la variación en la longitud de onda a lo largo del canal en función de la amplitud y la frecuencia considerando la viscosidad propia del fluido.
3. Cuantificar la variación de la amplitud a lo largo del canal

1.3 ORGANIZACIÓN INFORME

Capítulo 1: En este se presenta el tema a tratar, la motivación y los objetivos generales y específicos.

Capítulo 2: Contiene el marco teórico asociado al problema. Se introducen los conceptos de onda, reología y de fluido no newtoniano, entre otros. A su vez, se presenta la técnica de medición utilizada en laboratorio.

Capítulo 3: Se muestra en qué consiste la instalación experimental y las metodologías empleadas, tanto para la ejecución de los experimentos, como en el procesamiento de la información.

Capítulo 4: Describe el trabajo realizado para obtener el movimiento sinusoidal de la superficie libre deseado y los resultados post calibración del movimiento.

Capítulo 5: Se presentan los criterios y configuraciones que determinan las condiciones a evaluar en las campañas de experimentos.

Capítulo 6: Presenta los resultados obtenidos en las campañas de experimentos, mostrando variaciones en la amplitud, celeridad y longitud de onda a lo largo del canal.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ONDAS ARMÓNICAS

Un oscilador es aquel que es capaz de generar perturbaciones periódicas de un medio. Este puede ser definido matemáticamente por una o varias ecuaciones características asociadas al sistema, de modo que el oscilador y sus oscilaciones pueden ser lineales o no lineales dependiendo del grado de linealidad que presenten sus ecuaciones constituyentes. Un caso particular de oscilador lineal corresponde al caso del oscilador armónico.

Un oscilador armónico no amortiguado puede ser descrito por la ecuación (2.1)

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (2.1)$$

En donde $\omega (s^{-1}) > 0$ corresponde a la frecuencia angular característica del oscilador armónico, mientras que x corresponde a la posición del oscilador en el tiempo. Las soluciones de la ecuación 2.1 vienen dadas por la estructura de la ecuación (2.2):

$$x(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

Con A y B constantes asociadas a las condiciones iniciales del problema.

Las ondas armónicas pueden ser descritas tanto por funciones armónicas reales o complejas, en donde una representación real de una onda armónica $w(z, t)$ que se propaga en la dirección z de un sistema de referencia cartesiano xyz puede ser escrita como de acuerdo a la ecuación (2.3):

$$w = w(z, t) = A \cos(kz - \omega t + \varphi) \quad (2.3)$$

Donde

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

En estas, A representa la amplitud, ω , la frecuencia angular (rad/s), f , la frecuencia (Hz), T , el período (s^{-1}), λ , la longitud de onda (m), k , el número de onda ($1/m$), φ , la

fase (*rad*). En la Figura 2.1 se presenta la oscilación armónica de una onda con origen en 0.

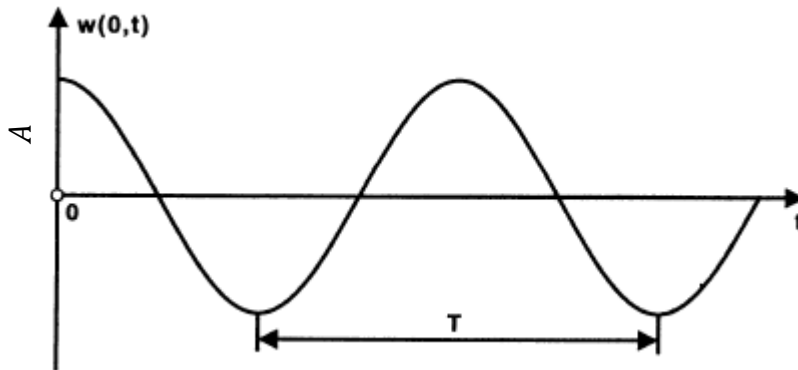


Figura 2.1: Posición en el tiempo de una onda armónica con periodo T , amplitud A y desfase $\varphi=0$ Modificado de Fritz, K, (1997).

Mientras que la representación compleja de la onda se representa según la ecuación (2.6), con k, ω y φ reales. (Fritz, K, 1997).

$$u = u(z, t) = \Re(Ae^{i(kz - \omega t + \varphi)}) \quad (2.6)$$

En algunos casos particulares, cuando la perturbación de un líquido describe un movimiento armónico, la respuesta del fluido puede ser descrita a partir de una solución armónica, pero si el medio en el cual se realiza la perturbación presenta un comportamiento no lineal, como es el caso de fluidos pseudoplásticos, la respuesta no es necesariamente armónica.

2.2 ONDAS SUPERFICIALES DE GRAVEDAD

Las ondas son la propagación de una perturbación en el espacio, y existen diferentes propiedades que permiten caracterizarlas, como lo son el período, tiempo que tarda la onda en realizar una oscilación completa, amplitud, la distancia vertical entre el punto medio y máximo de oscilación de la onda y la velocidad de onda, entre otras.

Estas se clasifican de acuerdo al medio en el que se propagan, su dirección y en función al movimiento de sus partículas, entre otras. Cuando se habla de ondas caracterizadas de acuerdo al medio en el que se propagan, es posible subcategorizarlas en: ondas mecánicas, aquellas que requieren de un medio elástico, ondas electromagnéticas, aquellas que se propagan por el espacio sin necesidad de un medio físico, y finalmente, ondas gravitacionales, las cuales representan una alteración del espacio tiempo. Dentro de las ondas mecánicas se pueden encontrar las ondas longitudinales, transversales y superficiales.

En un recipiente, la superficie de un líquido sometido a gravedad es plana y horizontal. Si se genera alguna perturbación de este equilibrio, se produce un movimiento cuyo

objetivo es el de restituir el equilibrio. Este movimiento se propaga sobre la superficie del líquido en forma de ondas, llamadas ondas superficiales. Cuando se tiene que la fuerza gravitatoria predomina por sobre la fuerza capilar con respecto al control de la dinámica del movimiento del fluido, estas ondas superficiales son categorizadas como ondas superficiales gravitacionales.

Uno de los conceptos estudiados en la teoría de ondas corresponde a la relación de dispersión, la cual relaciona la frecuencia (f) y su longitud de onda (λ) o su frecuencia angular (ω) con su número de onda (k). Un caso particular de la relación de dispersión corresponde al caso lineal, la cual puede ser deducida a partir de las ecuaciones de continuidad y momentum, que se presentan en las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla(\hat{p}) \quad (2.8)$$

En donde, \vec{u} corresponde al vector velocidad, el cual, considerando un flujo irrotacional puede ser escrito en función de un potencial como $\vec{u}(x, t) = \nabla\phi(\vec{x}, t)$, \hat{p} corresponde a la presión motriz, ρ , a la densidad del fluido.

La relación general de dispersión para el caso invíscido, incluyendo los efectos de tensión superficial se presenta en la ecuación (2.9) (Fritz, K, 1997):

$$\omega^2 = kg \left(1 + \frac{\sigma}{\rho g} k^2 \right) \tanh(kh) \quad (2.9)$$

Donde k ($1/m$) corresponde al número de onda, h (m), a la altura en reposo del fluido y σ (Nm^{-1}), a la tensión superficial. De igual modo, se obtiene la velocidad de fase general, dada por:

$$c = \sqrt{\tanh(kh) \left(\frac{g}{k} + \frac{\sigma k}{\rho} \right)} \quad (2.10)$$

Estas expresiones pueden ser reducidas según los parámetros del problema. Si el efecto gravitacional predomina por sobre el efecto de la tensión superficial, se tiene que las ecuaciones (2.9) y (2.10) pueden ser reescritas como sigue:

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (2.11)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (2.13)$$

Las que corresponden a la relación de dispersión y la velocidad de fase para una onda superficial de gravedad que se propaga por un fluido invíscido.

Ahora bien, si se considera que la viscosidad no es despreciable, de modo que la relación $\frac{\lambda^2 \omega}{\nu} \gg 1$ no se cumple, no es posible despreciar la expresión $\nu \nabla^2 \vec{v}$ de la ecuación de momentum. Según lo presentado por Tamburrino (2017) el sistema de ecuaciones a resolver y su resolución es el siguiente:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

Considerando que la longitud de onda es mucho mayor que la profundidad en reposo ($\lambda \gg h$), buscamos soluciones que tengan la siguiente forma:

$$u_x = U_x^0 + U_x \quad (2.17)$$

$$u_z = U_z^0 + U_z \quad (2.18)$$

En donde U_x^0 y U_z^0 corresponden a las soluciones de primer orden del caso invíscido, las cuales se definen en las ecuaciones (2.19) y (2.20):

$$U_x^0 = i\kappa A e^{kz} e^{ikx} e^{at} \quad (2.19)$$

$$U_z^0 = \kappa A e^{kz} e^{ikx} e^{at} \quad (2.20)$$

Ahora bien, la presión motriz viene dada por:

$$\hat{p} = -\rho \frac{\partial}{\partial t} (Ae^{kz} e^{ikx} e^{\alpha t}) \quad (2.21)$$

$$p = -\rho A \alpha e^{kz} e^{ikx} e^{\alpha t} - \rho g z \quad (2.22)$$

Definiendo la función corriente $\varphi(x, y)$ para un flujo bidimensional en el plano x-y como:

$$d\varphi = \nabla\varphi \cdot d\vec{r} = \frac{\partial\varphi}{\partial x} dx + \frac{\partial\varphi}{\partial y} dy$$

La cual se cumple ser 0 a lo largo de una línea de corriente.

Definiendo U_x y U_z en términos de la función de corriente

$$U_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (2.23)$$

$$U_z = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \quad (2.24)$$

Para la función de corriente se cumple que, considerando flujo irrotacional, $\nabla^2\varphi = 0$, de modo que escribiendo las ecuaciones de momentum para U_x y U_z , se tiene que:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = \nu \nabla^2\varphi \quad (2.25)$$

Las soluciones de la ecuación (2.25) deben ser tales que sean periódicas en x y en t, y debe decaer exponencialmente con z, de modo que se define que estas tienen la

$$C\alpha e^{lz} e^{ikx} e^{\alpha t} = \nu(-ck^2 e^{lz} e^{ikx} e^{\alpha t} + cl^2 e^{lz} e^{ikx} e^{\alpha t}) \quad (2.27)$$

siguiente forma:

$$\varphi = C e^{lz} e^{ikx} e^{\alpha t} \quad (2.26)$$

Desarrollando la ecuación (2.25), se tiene:

$$\alpha = -\nu k^2 + \nu l^2 \quad (2.28)$$

Siendo α complejo.

A su vez, es posible escribir las velocidades en x y z:

$$u_x = ikAe^{lz} e^{ikx} e^{\alpha t} - cl e^{lz} e^{ikx} e^{\alpha t} \quad (2.29)$$

$$u_z = (ikAe^{kz} - cl e^{lz}) e^{ikx + \alpha t} \quad (2.30)$$

$$u_z = kae^{lz}e^{ikx}e^{\alpha t} + cike^{lz}e^{ikx}e^{\alpha t} \quad (2.31)$$

$$u_z = (kAe^{kz} + ikCe^{lz})e^{ikx+\alpha t} \quad (2.32)$$

Definiendo la condición cinemática para la deformación de la superficie libre como $\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$, para $z = 0$, se tiene:

$$u_z = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.33)$$

$$(kAe^{kz} + ikCe^{lz})e^{ikx+\alpha t} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2.34)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{kA + ikC}{\alpha} \right) e^{ikx+\alpha t} \quad (2.35)$$

Del mismo modo, definiendo ξ como el desplazamiento horizontal, se tiene que la condición cinemática en $z = 0$ viene dada por:

$$u_x = \frac{d\xi}{dt} \quad (2.36)$$

$$(iAke^{kz} - Cle^{lz})e^{ikx+\alpha t} = \frac{d\xi}{dt} \quad (2.37)$$

$$\xi = \frac{ikA - Cl}{\alpha} e^{ikx+\alpha t} \quad (2.38)$$

Luego, τ_{zz} :

$$\tau_{zz} = p_0 + \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (2.39)$$

$$\tau_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (2.40)$$

Podemos desarrollar la ecuación (2.39) en términos del desplazamiento horizontal, considerando $p_0 = 0$ al trabajar con presiones relativas.

$$\sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \sigma \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik^2A - k^2C}{\alpha} e^{ikx+\alpha t} \right) \quad (2.41)$$

$$\sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = -\frac{\sigma k^3}{\alpha} (A + iC) e^{ikx+at} \quad (2.42)$$

Ahora, desarrollando la ecuación (2.40), se tiene:

$$\tau_{zz} = \rho A \alpha e^{kz} e^{ikx} e^{at} + \rho g z + 2\mu(k^2 A e^{kz} + iklC e^{kz}) e^{ikx+at} \quad (2.43)$$

$$\tau_{zz} = \left(\rho A \alpha + \rho g \frac{kA + ikC}{\alpha} + 2\mu(k^2 A + iklC) \right) e^{ikx+at} \quad (2.44)$$

Igualando (2.39) con (2.40), reemplazando lo obtenido en (2.42) y (2.44), se tiene:

$$\left(\rho A \alpha + \rho g \frac{kA + ikC}{\alpha} + 2\mu(k^2 A + iklC) \right) e^{ikx+at} = -\frac{\sigma k^3}{\alpha} (A + iC) e^{ikx+at} \quad (2.45)$$

$$\left(-\frac{\sigma k^3}{\alpha} - \frac{\rho h k}{\alpha} \right) (A + iC) = \rho A \alpha + 2\mu(k^2 A + iklC) \quad (2.46)$$

A su vez se tiene que, consideramos $e^{kz} = 1$, pues $z = 0$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.47)$$

$$\mu \left((ik^2 A e^{kz} - cl^2 e^{kz}) e^{ikx+at} + (kA e^{kz} + ikC e^{lz}) i k e^{ikx+at} \right) = 0 \quad (2.48)$$

$$ik^2 A - cl^2 + (kA + ikC) ik = 0 \quad (2.49)$$

$$\frac{A}{C} = -\frac{i(l^2 + k^2)}{2k^2} \quad (2.50)$$

Retomando la ecuación (2.46), y considerando que $\frac{\sigma k^3}{\rho} + gk = \omega^2$ para el caso invíscido, se tiene:

$$-\omega^2 \left(\frac{A}{C} + i \right) = \frac{A}{C} \alpha^2 - i\nu\alpha(l - k)^2 \quad (2.51)$$

Desarrollando esta expresión en término de los parámetros ya definidos anteriormente, se obtiene:

$$\omega^2 + (\alpha + 2\nu k^2)^2 = 4k^4 \nu^2 \sqrt{1 + \frac{\alpha}{\nu k^2}} \quad (2.52)$$

Que corresponde a la relación de dispersión para el caso viscoso.

En una onda viscosa, existe una atenuación exponencial de la amplitud, producto de los efectos viscosos. El coeficiente de atenuación $\beta(1/m)$ viene dado por la ecuación (2.53) (Przadka et al, 2011):

$$\beta = \frac{4k^2\mu\omega}{\rho g + 3\sigma k^2} \quad (2.53)$$

Donde k corresponde a la parte real del número de onda. De este modo, la amplitud de la onda en una posición de $x(m)$ en el canal puede escribirse como:

$$A = A_0 e^{-\beta x} \quad (2.54)$$

Siendo $A(m)$, la amplitud de onda en un punto ubicado en la posición x en un instante dado, $A_0(m)$, la amplitud inicial de la perturbación, para un instante dado, $\beta(1/m)$, el coeficiente de atenuación, y $x(m)$, la posición de un punto en el canal para un instante dado.

La ecuación (2.52) permite relacionar la frecuencia aplicada sobre un líquido con la longitud de onda característica para esa frecuencia, mientras que la ecuación (2.53) permite determinar la amplitud que tendrá esta onda en algún punto a lo largo del canal en función de la amplitud inicial.

2.3 REOLOGÍA Y REOMETRÍA

Barnes et al (1989) definen la reología como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia, mientras que Eliades et al (2017) propone una definición similar indicando que la reología corresponde al campo científico que abarca los fenómenos de flujo de la materia, incluyendo sólidos, líquidos y gases.

Todos los cuerpos están compuestos por moléculas, de modo que, al ejercer una fuerza sobre estas, las moléculas y partículas presentes en el cuerpo se ven obligadas a deslizarse unas con otras, generando una resistencia al flujo producto de fricción interna. Esta oposición al flujo se reconoce usualmente como viscosidad, y varía dependiendo de la sustancia en cuestión. (Barnes et al, 1989).

La reología de un fluido corresponde a la cuantificación de las propiedades de este, lo cual permite simular el comportamiento del flujo, mediante la relación entre el esfuerzo y la deformación.

La reometría se refiere al conjunto de técnicas experimentales que permiten determinar las características reológicas de algún material (generalmente sólidos y líquidos), esto luego de someter a un cuerpo a esfuerzos y medir su deformación.

En general la reología de un fluido se puede medir a partir de instrumentos llamados reómetros (Figura 2.2), los cuales trabajan con distintos rangos de temperatura, velocidad, torque y resolución, entre otros. A su vez, los reómetros pueden ser usados para realizar pruebas de esfuerzo o pruebas de torsión, mediante rotación continua u oscilación rotacional.



Figura 2.2: Reómetro rotativo RheolabQC. Recuperado de <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rotational-rheometer-rheolabqc>.

2.4 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos son todos aquellos fluidos cuya tasa de deformación angular no varía linealmente con respecto al esfuerzo de corte. Estos se pueden clasificar de la siguiente manera: puramente viscosos, viscoelásticos o dependientes del tiempo (Deshpande et al, 2010).

Los fluidos puramente viscosos, pueden ser clasificados en dos tipos, *shear-thinning fluids*, o fluidos adelgazantes o pseudoplásticos, en español, y en *shear-thickening fluids*, o fluidos dilatantes.

El diagrama reológico de estos se muestra en la Figura. 2.1, de la cual es posible notar que los fluidos pseudoplásticos y dilatantes presentan una relación no lineal entre la tasa de deformación angular $\dot{\gamma}$ y el esfuerzo de corte τ .

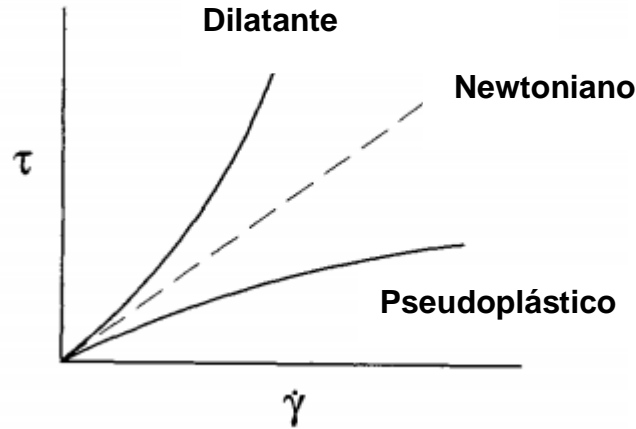


Figura. 2.1: Representación del comportamiento del flujo en un gráfico de tasa de deformación angular $\dot{\gamma}(1/s)$ versus esfuerzo de corte $\tau (Pa)$. Modificado de D.A. Siginer et al (1999).

Un caso particular de fluido no-newtoniano corresponde al fluido tipo Ostwald-de Waele, el cual se caracteriza porque su viscosidad aparente varía como una potencia del segundo invariante del tensor de la tasa de deformación angular (Calvo, C, 2018). De este modo, el esfuerzo de corte se expresa como sigue:

$$\tau_{ij} = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.55)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ij}} \quad (2.56)$$

Siendo $\dot{\gamma}_{ij}$ representado en la ecuación (2.57)

$$\dot{\gamma}_{ij} = \begin{bmatrix} 2\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & 2\frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & 2\frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

En donde $K (Pa s^n)$ corresponde al índice de consistencia y n (adimensional) al índice de flujo. Los valores que tomen el índice de consistencia K , y el índice de comportamiento será el que defina el tipo de fluido. De este modo, se tiene que un fluido será dilatante cuando $n > 1$ y pseudoplástico cuando $0 < n < 1$. Cuando $n = 1$, el modelo corresponde a un fluido newtoniano con $K = \mu$.

En particular, se tiene que los fluidos dilatantes, son aquellos en los cuales la viscosidad aparente aumenta con la tensión de corte (Barnes, 1989) y son de gran interés en la industria, como para usos biomédicos y militares, dada su habilidad para disipar vibraciones (Zhang et al, 2008). Se ha mostrado que el efecto dilatante de un fluido se debe principalmente a la reorganización de su estructura interna, provocando así un aumento de la fricción interna e interfiriendo parcialmente el flujo (Antosik et al, 2017).

Para los fluidos no newtonianos, existen distintos modelos que permiten predecir su comportamiento en función de la tasa de deformación. Uno de estos modelos corresponde a la ley de Carreau, la cual se describe según la ecuación (2.58):

$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left[1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^2 \right]^{(n-1)/2} \quad (2.58)$$

En donde μ_{∞} y μ_0 corresponden a la viscosidad aparente a tasa de deformación infinita y 0 respectivamente. Para las tasas de deformación ($\dot{\gamma}$) menores que una tasa de deformación crítica $\dot{\gamma}_c$, estos fluidos se comportan como un fluido newtoniano de viscosidad constante μ_0 . En este caso, se habla de fluidos pseudoplásticos cuando el índice de flujo $n < 1$. (Allouche et al, 2015)

Gráficamente, en el modelo de Carreau es posible observar una zona inicial en la cual, para bajas tasas de deformación, la viscosidad del fluido permanece constante y a partir de un valor crítico de la tasa de deformación ($\dot{\gamma}_c$) inicia una zona de transición en donde la viscosidad del fluido varía, hasta entrar a la zona donde la viscosidad puede modelarse mediante la ley de potencia o ecuación de Ostwald- de Waele, lo cual se presenta en la Figura 2.3.

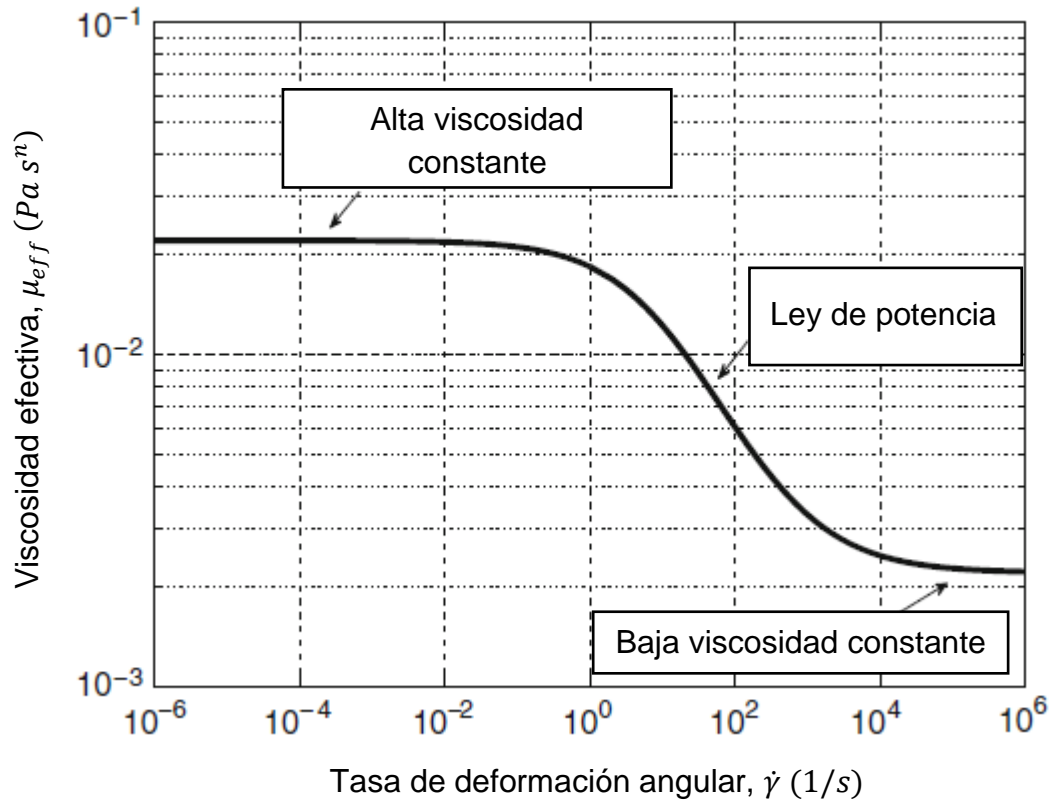


Figura 2.3: Comportamiento general de la sangre (fluido pseudoplástico). A bajas y altas tasas de deformación el comportamiento tiende a una viscosidad constante y en un rango intermedio presenta una relación de potencia entre τ y $\dot{\gamma}$. Modificado de Biasetti, J, et al (2010) para el modelo de Carreau-Yasuda.

Existen diferentes sustancias que al ser mezcladas con agua resultan en un fluido con comportamiento pseudoplástico. Ejemplos de estas pueden ser el CMC (carboximetilcelulosa), el cual es un espesante utilizado en la industria alimenticia, y que presenta comportamiento pseudoplástico a partir de concentraciones en agua de 0,05% peso/peso, y la goma xanthan, un polisacárido excretado por la bacteria *Xanthomonas campestris*, y usado principalmente en la industria alimenticia como espesante, incluso a bajas concentraciones. Song et al (2006) registraron un comportamiento pseudoplástico para mezclas realizadas con goma xanthan bajo concentraciones entre 1 a 4% peso/peso, mientras que Escudier et al (2001) mostraron un comportamiento pseudoplástico a partir de concentraciones de 0,25% peso/peso.

2.5 DIFICULTAD DEL PROBLEMA TEÓRICO

Como se comentó anteriormente, el esfuerzo de corte de un fluido no newtoniano, al contrario del de un fluido newtoniano, no es lineal respecto a la tasa de deformación, de modo que existe un rango intermedio que puede modelarse como una ley de potencia entre la viscosidad efectiva y la tasa de deformación.

$$\tau_{ij} = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.59)$$

La ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes para un flujo bidimensional, de un fluido viscoso e incompresible bajo el efecto gravitatorio puede expresarse como sigue:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (2.62)$$

En donde (u, v) corresponden a las componentes de la velocidad en el eje horizontal y vertical, ρ la densidad del fluido, τ_{ij} el esfuerzo de corte en la dirección i sobre una superficie con normal j y \hat{p} la presión motriz generada de manera conjunta por la fuerza de gravedad y el gradiente de presiones producto del movimiento.

Es posible reordenar lo anterior expresando τ_{ij} como funciones de (u, v) , de modo que, el sistema (2.61) y (2.62) se traduce a:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.63)$$

Recuperando la definición de μ para fluidos no newtonianos de la ecuación X y reemplazándola en la ecuación (2.59), se obtiene:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + K \frac{\partial}{\partial y} \left(\left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.64)$$

Es de la ecuación (2.64) donde surge el problema teórico, de modo que al introducir la no linealidad de un fluido pseudoplástico a la ecuación de movimiento, se incorporan componentes no lineales que no estaban consideradas en el análisis para el caso viscoso

y que complejizan la resolución analítica del problema, de modo que, incluso considerando perturbaciones muy pequeñas, la no linealidad del último término precluye la existencia de soluciones armónicas frente a solicitaciones armónicas. Es por esta dificultad analítica del problema que se opta por un desarrollo empírico.

2.6 PERFILOMETRÍA TRANSFORMADA DE FOURIER

La perfilometría por transformada de Fourier (FTP) propuesta por Takeda y Mutoh en 1982, es una técnica de medición no intrusiva que permite determinar la forma de un objeto 3D al medir la diferencia de altura entre depresiones y elevaciones existentes en el objeto. La técnica utiliza un proyector y una cámara digital cuya disposición geométrica se muestra en la Figura 2.2. En esta, el eje óptico del proyector y la cámara son paralelos entre sí y perpendiculares al plano que se desea medir, separados por una distancia d y a una altura L sobre la superficie a medir.

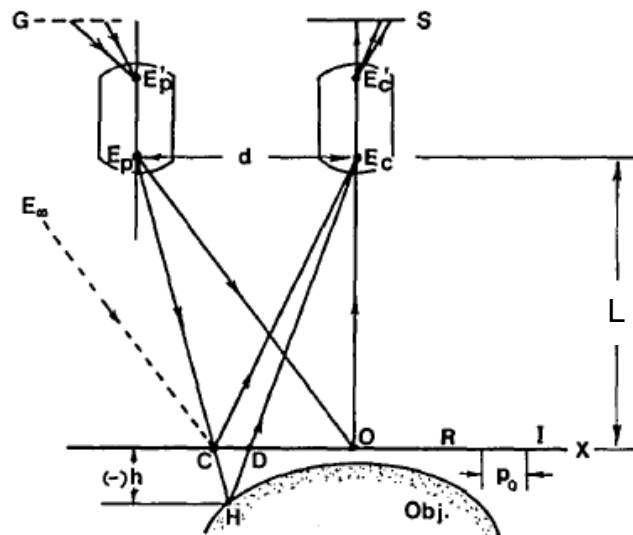


Figura. 2.2: Geometría con ejes ópticos paralelos, Takeda y Mutoh (1983).

Un patrón de franjas en escala de grises es proyectado sobre un plano de referencia, de modo que, al perturbarlo con la presencia del objeto a caracterizar, la cámara registra esta perturbación desde otro punto focal. Puesto que el patrón varía sinusoidalmente entre blanco al negro, la perturbación se traduce en una diferencia de fase por medio del tono del pixel, diferencia la cual se puede relacionar con la diferencia de altura generada por el objeto. (Garcés, 2017).

Este desfase entre pixeles registrados desde la cámara es tal que:

$$\Delta\phi = \phi(P) - \phi_0(P) \quad (2.65)$$

Donde $\Delta\phi$ corresponde al desfase entre pixel de referencia y pixel perturbado medido desde la cámara, $\phi(P)$ corresponde a la fase del pixel perturbado y $\phi_0(P)$ corresponde a la fase del pixel perturbado por el objeto a caracterizar. Mediante la relación fase-altura de Cobelli et al. (2009), la altura viene dada por:

$$h = \frac{\Delta\phi Lp}{\Delta\phi p - 2\pi D} \quad (2.66)$$

Donde p es el período del patrón sinusoidal, $L(m)$, la distancia entre la superficie y el foco de cámara y $D (m)$, la distancia entre foco de cámara y de proyección.

Para medir perturbaciones sobre líquidos, este método requiere de un reflejo difusor de la luz, es decir, que tenga el mismo brillo independiente del ángulo en el que se vea, lo cual generalmente se logra agregando pigmentos blancos (Przadka et al. 2011). Para asegurar buen contraste, se agrega dióxido de titanio (TiO_2) a la mezcla (Cochard y Ancay, 2007), y de esta manera se evita cualquier efecto que el agregado pueda tener sobre la superficie del fluido (Przadka et al. 2011).

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Los experimentos se desarrollan en un canal de acrílico de largo 180,0 cm, ancho 10,2 cm, alto de 6,0 cm y paredes de un espesor de 1,0 cm, el cual se esquematiza en la Figura 3.1. A su vez, su sección transversal interior tiene 8,2 cm de ancho y 5,0 cm de alto, como se muestra en la Figura 3.2.

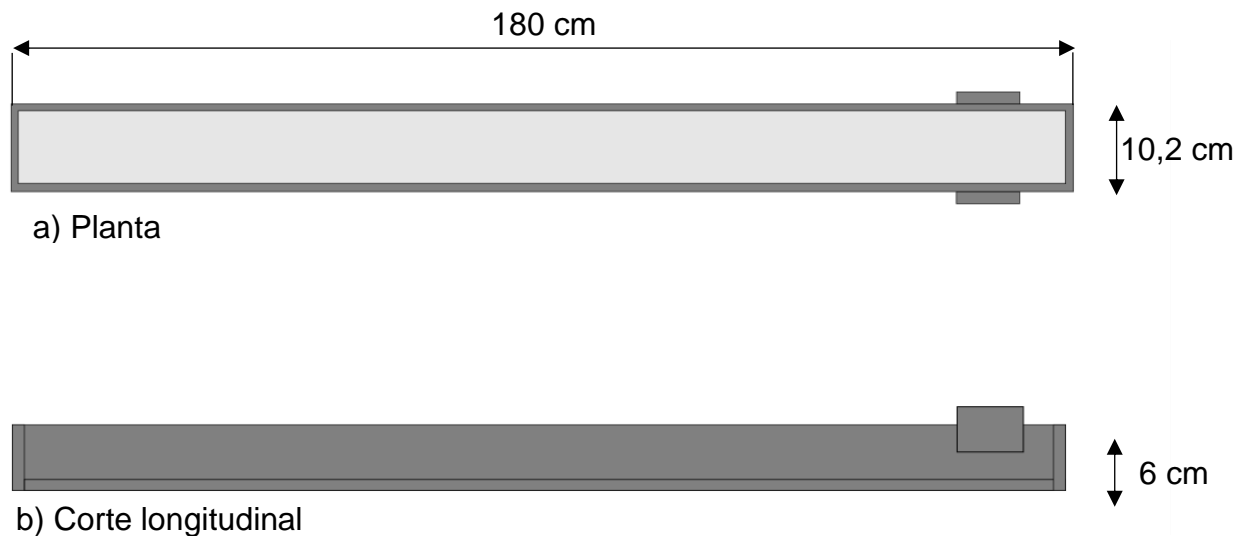


Figura 3.1: Dimensiones canal

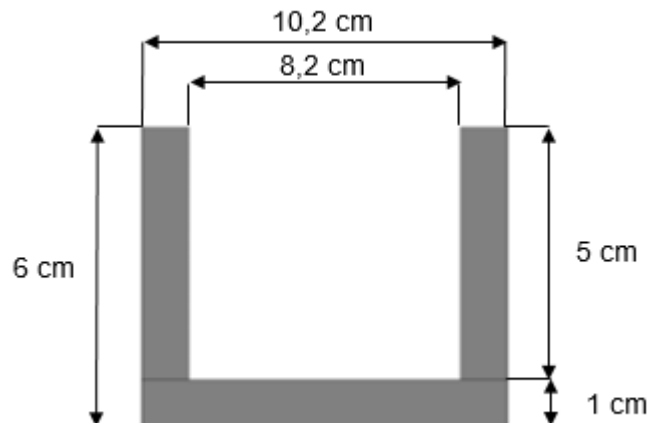


Figura 3.2: Sección transversal

En el extremo derecho del canal, se ubica el sistema de movimiento forzante, el cual se constituye a partir de un servo motor HobbyKing 4008DX, cuyo movimiento está restringido entre los 0 y 140 grados para pulsos entre 1000 y 2000 microsegundos. Su velocidad máxima de movimiento es de 0,06s en 60 grados alimentado a 7,2 V, con un torque correspondiente de 8 kg cm al mismo voltaje.

El sistema de control está programado en C++, mediante un Arduino Uno. El servo está conectado a un sistema de engranajes que considera una rueda de radio externo 6,5 cm conectada a un eje longitudinal que genera el movimiento horizontal de una paleta, como se detalla en la Figura 3.3 y Figura 3.4.

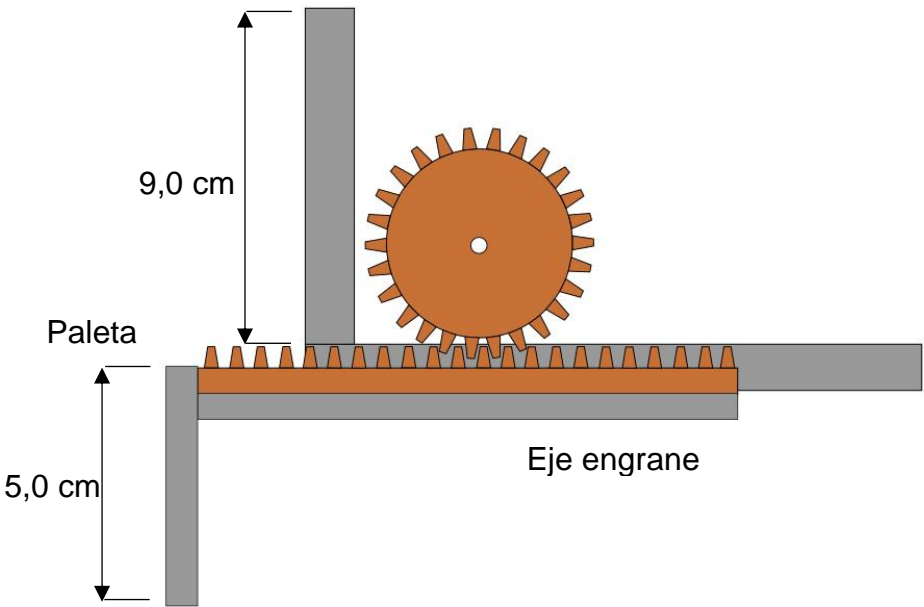


Figura 3.3: Sistema de movimiento, sistema de engranes. Vista longitudinal.

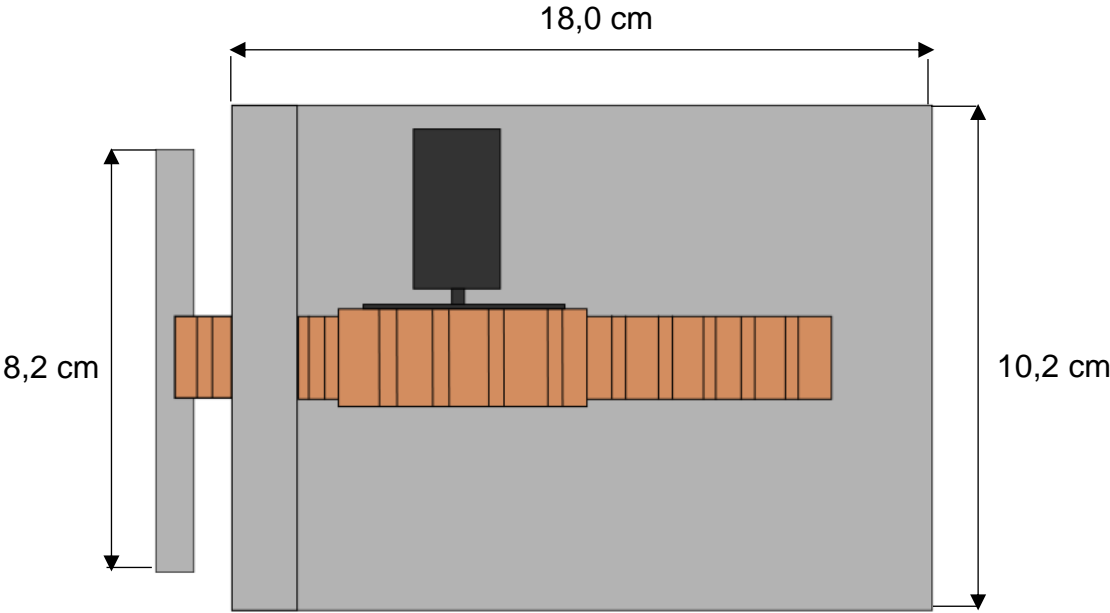


Figura 3.4: Sistema de movimiento, unión servo-engrane. Vista en planta.

El control sobre el servo con Arduino permite controlar la amplitud y frecuencia, entre 1,0 a 3,0 cm, del movimiento horizontal para la amplitud y de 1 a 6 Hz de frecuencia de oscilación.

La paleta es tal que cubre toda la superficie transversal del canal, de forma que no existe paso de fluido de un lado hacia el otro. Debe cumplirse también que el canal debe estar horizontal en todos sus ejes, lo cual se verifica por medio de un nivel.

Para la realización de los experimentos, se utilizan distintos implementos, los cuales se detallan a continuación:

Cámara Phantom v641 Cinemag (Figura 3.5): Cámara de alta velocidad con profundidad de color de 12-bits, sensor de 4 megapíxeles con capacidad de hasta 1.450 FPS a máxima resolución (2560 x 1600 píxeles). Utilizada en la medición por FTP.



Figura 3.5: Cámara Phantom v641 Cinemag.

Lente Nikon AF-S DX Nikkor 35 mm f/1.8G (Figura 3.6): Lente de distancia focal fija, con gran apertura para lograr fotos definidas con poca luz.



Figura 3.6: Lente Nikon AF-S DX 35mm f/1.8G.

Proyector Epson Powerlite HomeCinema 8350 (Figura 3.7): Proyector con proyección RGB, relación de aspecto 16:9 y resolución 1080p (Full HD).



Figura 3.7: Proyector Epson Powerlite HomeCinema 8350.

Cámara Photron Fastcam Mini UX50 (Figura 3.8): Cámara de alta velocidad de 1,3 megapíxeles de resolución con una tasa de adquisición de hasta 2.000 frames por segundo. Utilizada en la calibración del movimiento del forzante.



Figura 3.8: Cámara Photron Fastcam Mini UX50.

3.2 METODOLOGÍA ELABORACIÓN DE MEZCLAS

Para realizar la mezcla del fluido pseudoplástico, en un recipiente se vierten 7 litros de agua destilada. Se separan en un recipiente plástico, 40,60 gramos de goma xanthan, correspondientes a una concentración 0,58 % peso/peso. En un segundo recipiente plástico, se agregan 2,50 gr por litro de agua de dióxido de titanio (TiO_2). Considerando un volumen de agua destilada de 7 litros, se agregan 17,50 gr de dióxido de titanio.

Para asegurar una buena disolución, sin presencia de grumos, se utiliza un mezclador, el cual se fija en 300 revoluciones por minuto, ubicando la paleta de mezcla en el punto medio entre la superficie libre y el fondo del estanque recipiente, como se muestra en la Figura 3.9.

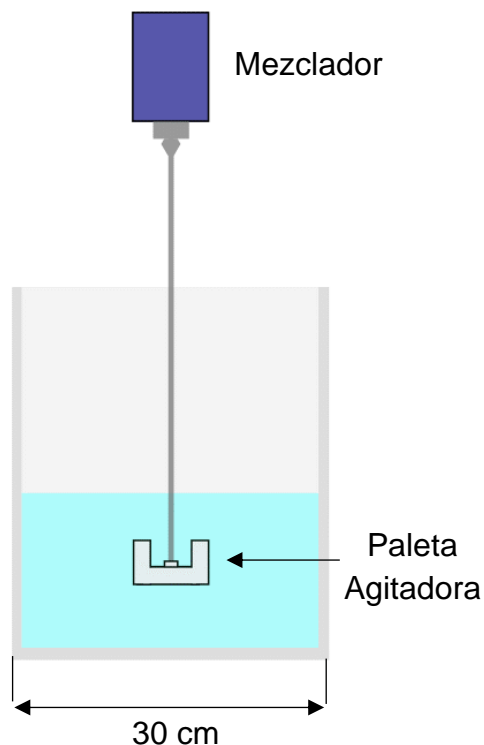


Figura 3.9: Disposición recipiente y paleta mezcladora.

Una vez iniciado el movimiento de la mezcladora, se agrega en pequeñas cantidades el dióxido de titanio al estanque, pasando el polvo por una malla 100, dejando mezclar por 15 minutos. Una vez la mezcla sea homogénea, se agrega un tercio del peso total de goma xanthan, pasándolo por la misma malla 100, agregando en pequeñas cantidades para evitar la formación de grumos. Se deja mezclar por alrededor de 40 minutos para luego agregar el segundo tercio y mezclar por otros 40 minutos. Finalmente, se agrega el último tercio hasta que la mezcla no presente grumos y sea homogénea. Una vez finalizada la mezcla, se almacena en un recipiente de transporte, para luego limpiar con agua destilada la paleta mezcladora y el estanque recipiente.

No se realizan mediciones de pH o temperatura una vez terminada la mezcla.

3.3 METODOLOGÍA FTP

Para realizar la Perfilometría por Transformada de Fourier, es necesario que la superficie a caracterizar sea difusora de luz. Para esto, a la mezcla de agua destilada y goma xanthan realizada según la metodología anterior, se le agrega el dióxido de titanio (TiO_2) disuelto con una proporción de 2,5 gramos por litro de mezcla.

El canal debe ubicarse de tal modo que se encuentre completamente horizontal (condición de pendiente 0), para que la altura de fluido sea uniforme a lo largo de todo el canal.

Se ubica la cámara Phantom v641 de modo que esta se encuentre lo más cerca posible del foco del proyector, para mayor resolución, con especial énfasis en que los focos de ambos (proyector y cámara) se encuentren a la misma altura, formando una línea paralela a la horizontal.

El foco de la cámara y el proyector deben encontrarse alineados con respecto a la horizontal. Bajo la configuración utilizada, el foco de ambos se encuentra 181,0 cm por sobre el fondo del canal, con una distancia de 53,2 cm entre centros de foco, como se muestra en la Figura 3.10:

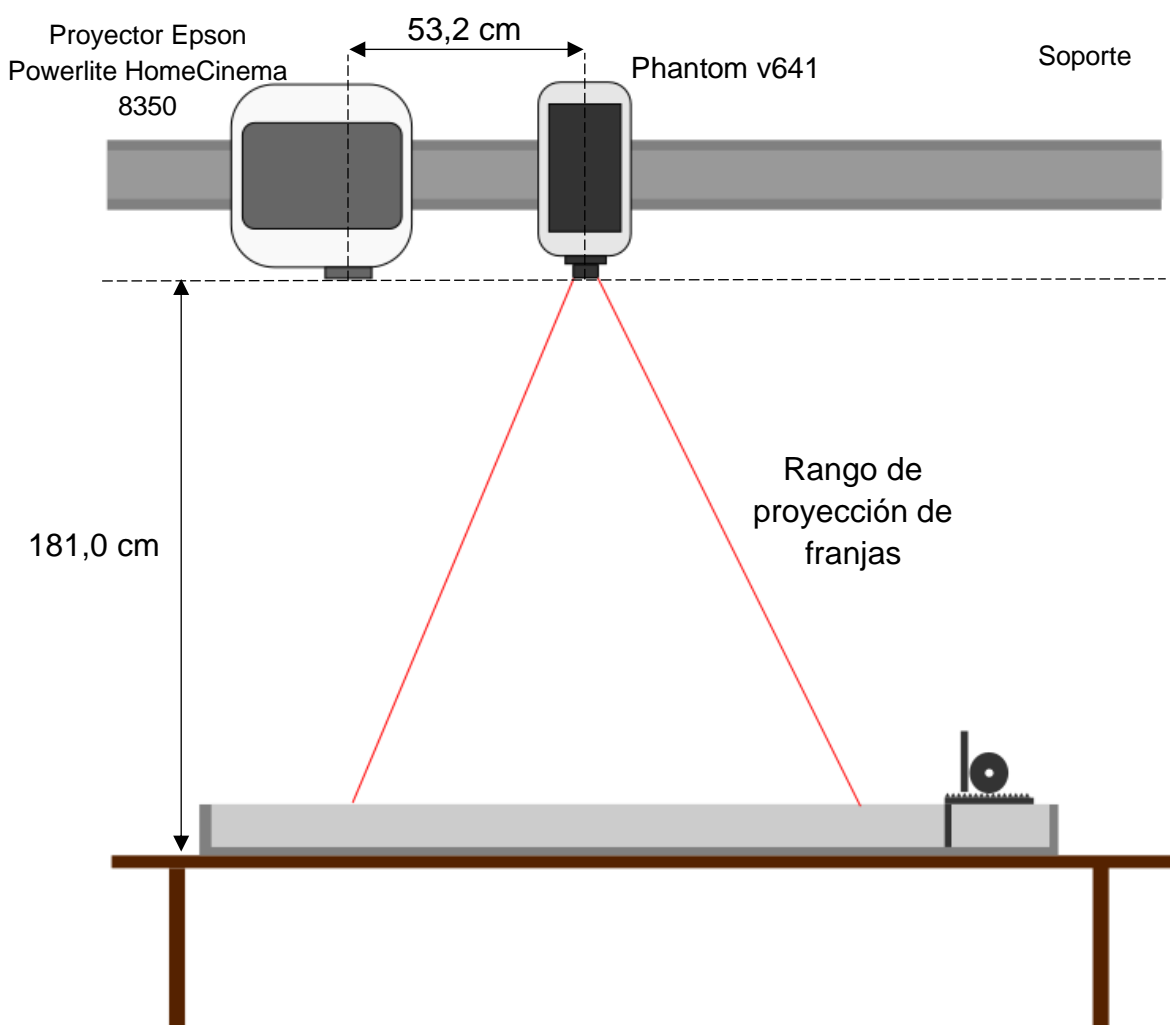


Figura 3.10: Disposición cámara-proyector para realizar FTP.

Una vez realizado el montaje, se agrega la mezcla al canal y se espera hasta que este alcance la altura de equilibrio. Agregada la mezcla, se proyecta una imagen de grises y se fotografía por 10 segundos a una tasa de 100 FPS. Luego, se proyectan las franjas

sobre la superficie, y con el sistema en reposo, se procede a registrar las imágenes bajo la misma configuración anterior.

Para cada configuración de amplitud y frecuencia, se espera a que se alcance el régimen permanente de movimiento y luego se registran imágenes por 10 segundos a una tasa de 100 FPS.

3.4 METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR LA REOLOGÍA

Para cada mezcla realizada es necesario registrar las propiedades reológicas a las temperaturas que presenta durante los experimentos.

Previo al inicio de la campaña de experimentos, con un termómetro de mercurio, se mide la temperatura del fluido y se registra en la bitácora de laboratorio. Registrada esta, se procede a tomar una muestra de 30 ml en un recipiente de plástico.

Dado que los experimentos son de corta duración, se establece que no existen variaciones apreciables en la reología del fluido entre el inicio y el fin de los experimentos, de modo que la muestra realizada al inicio de este es representativa de la reología del fluido durante todo el experimento.

Una vez finalizados los experimentos, se traslada la muestra al laboratorio de reología, en donde se procede con la reometría de la mezcla.

En el reómetro, la mezcla se someterá a 3 temperaturas, la temperatura registrada al inicio del experimento, y la temperatura registrada $\pm 1^\circ\text{C}$. Para cada temperatura, el reómetro se configura en un rango de tasas de deformación entre 0 a 2 s^{-1} con 400 puntos de medición cada 0,5 segundos y en un rango entre 0 a 100 s^{-1} , con 400 puntos de medición cada 0,5 segundos.

En el eje de las abscisas y ordenadas, se grafican las tasas de deformación s^{-1} y la viscosidad efectiva (Pa s^n) respectivamente, en escala logarítmica, y mediante una regresión se estiman los valores de K y n.

De igual modo, se presenta el diagrama reológico de la mezcla, graficando en el eje de las abscisas la tasa de deformación $\dot{\gamma}$ ($1/\text{s}$) y en el eje de las ordenadas el esfuerzo de corte τ (Pa).

3.5 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE MOVIMIENTO FORZANTE

Para verificar el correcto funcionamiento del movimiento sinusoidal del sistema fue necesario corroborar que la posición en el tiempo de la paleta describiese la senoide teórica para distintas configuraciones de amplitud y frecuencia, minimizando variaciones del movimiento para estas últimas.

Producto de que los valores ingresados al código en Arduino no representan directamente los valores de amplitud y frecuencia deseados, es decir, al ingresar una frecuencia de 5,0 Hz, la frecuencia resultante es distinta de 5,0 Hz, fue necesario realizar una calibración del movimiento, ingresando diferentes valores de amplitud y frecuencia y verificando los valores reales del movimiento, de modo de poder corregir los valores.

En la paleta, con un marcador, se define un punto, el cual sirve de referencia para determinar el movimiento de la paleta en el tiempo.

Para esto, se ingresaron frecuencias de 1,0 a 6,0 Hz con incrementos de 1,0 Hz y amplitudes de carrera de la paleta entre 1,0 y 3,0 cm, con incrementos de 0,5 cm, resultando en un total de 30 combinaciones. Para cada una de estas configuraciones, se tomaron fotografías del perfil longitudinal con la Cámara Photron Fastcam Mini UX50 con tasas de adquisición entre 125 y 250 FPS. Para frecuencias entre 1,0 y 3,0 Hz se utilizaron 125 FPS, mientras que entre 4,0 y 6,0, se utilizaron 250 FPS.

La cámara se ubicó a una distancia de 15 cm del canal, en donde el cuadro debe contener en todo momento al punto marcado en la paleta, como se muestra en la Figura 3.11. Se registraron 5 segundos para cada configuración.

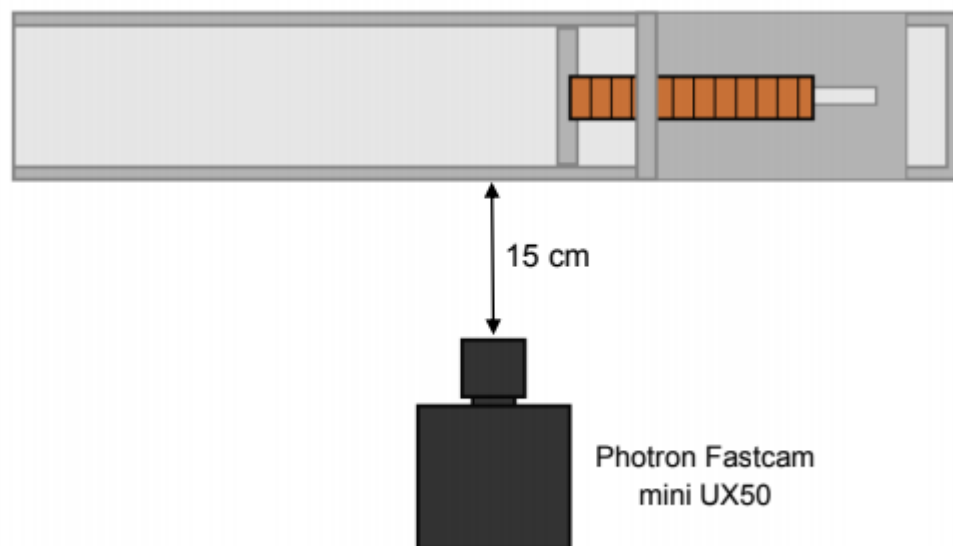


Figura 3.11: Disposición cámara-canal para calibración de movimiento de la paleta.

Mediante Matlab, para cada conjunto de imágenes se examina un total de 5 ciclos, registrando para cada uno: amplitud mínima, amplitud máxima, cantidad de fotos entre inicio y fin de un ciclo. Restando la amplitud máxima promedio con la amplitud mínima promedio se obtiene la amplitud real promedio del movimiento, mientras que con la cantidad de fotos entre ciclos y la tasa de adquisición (125 o 250 fps), se calcula la frecuencia real del movimiento de la paleta.

Con esta relación entre frecuencia real y frecuencia esperada (la cual es la que se ingresa al código de Arduino), y amplitud real y esperada, es posible realizar una regresión que permita relacionar tanto la frecuencia y amplitud esperadas con la real.

3.6 METODOLOGÍA OBTENCIÓN DE RESULTADOS

3.6.1 Determinación longitud de onda

Para cada uno de los experimentos, y para cada una de las configuraciones de amplitud de paleta y frecuencia, se determinan mediante *Matlab* las crestas de la onda y su posición a lo largo del canal para un instante dado. Se utilizan para el cálculo todos aquellos instantes cuyo máximo se encuentre a 5,0 cm del final de la carrera de la paleta, de modo que, para una frecuencia y amplitud en particular, se obtendrán diferentes momentos en el tiempo que representen una misma condición de propagación. Aquella información es promediada para dar lugar a la longitud de onda como se muestra en la Figura 3.12.

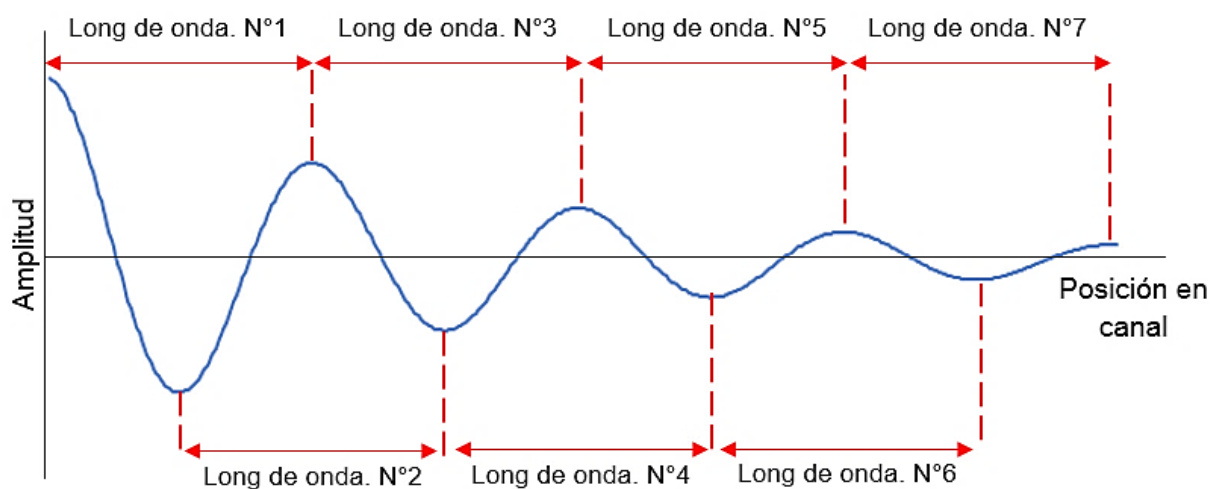


Figura 3.12: Esquema de numeración de longitudes de onda.

Para cada una de las configuraciones de frecuencia, se obtiene el gráfico del valor de longitud de onda en función de la posición en el canal, como el de la Figura 3.13.

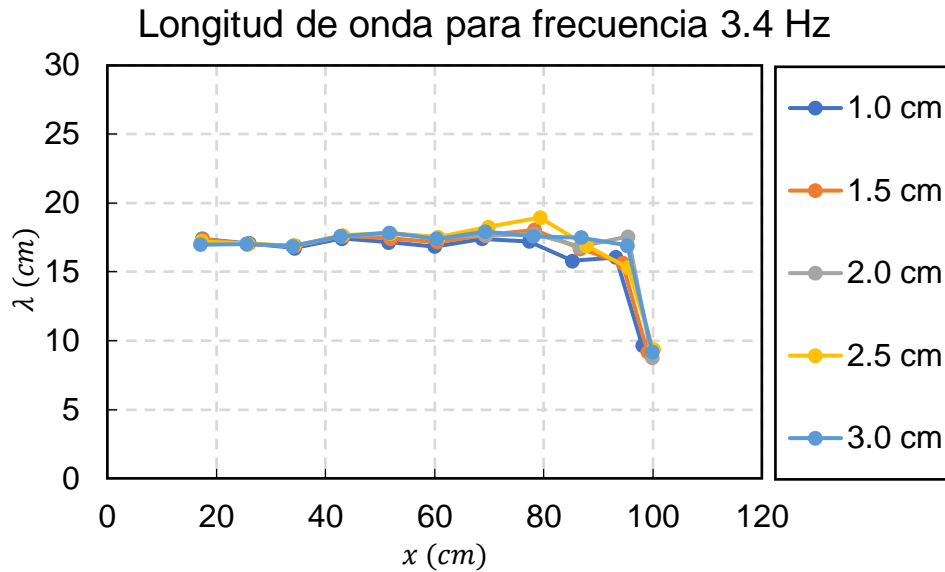


Figura 3.13: Longitudes de onda sin filtrar para frecuencia de 3,4 Hz y amplitudes de carrera de paleta de 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, y 3,0 cm.

De este modo, aquellas longitudes de onda que presenten una diferencia de alrededor de 30% respecto del valor anterior son descartados, puesto que se considera que la longitud de onda no debiese variar de forma sustancial en tramos cortos de canal. Este es el caso del último punto para cada amplitud registrada (Figura 3.13), en donde se muestra que la longitud de onda disminuye de aproximadamente 17 cm a 10 cm entre los 95 y 100 cm de canal. A partir de este criterio, se obtiene la longitud de onda filtrada de la Figura 3.14.

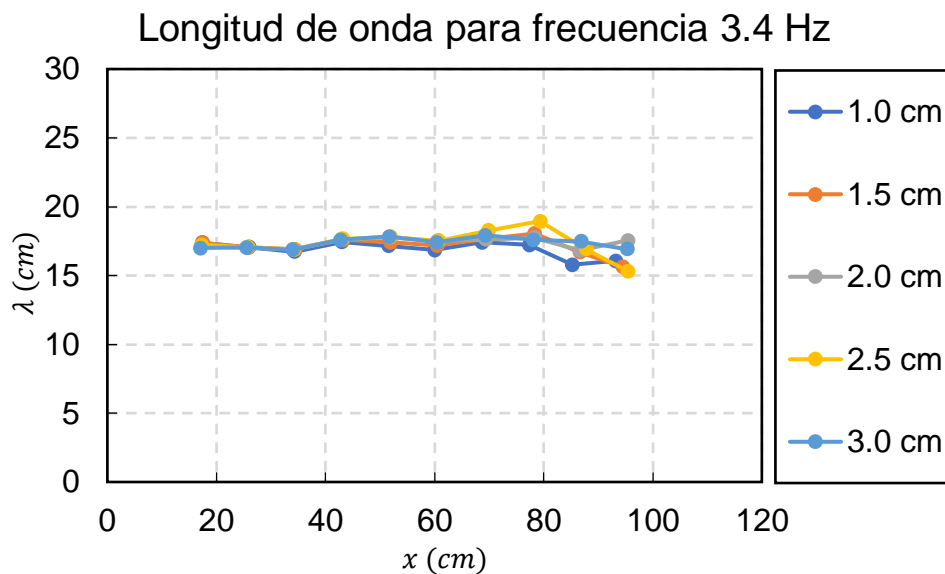


Figura 3.14: Longitudes de onda filtradas para frecuencia de 3,4 Hz y amplitudes de carrera de paleta de 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, y 3,0 cm.

3.6.2 Determinación coeficiente de atenuación

Para determinar el coeficiente de atenuación para cada configuración de amplitud y frecuencia, se grafica en el eje de las abscisas la posición adimensional, dada por x/h , donde x corresponde a la posición del canal en (cm) y h a la altura en reposo de la mezcla en el canal. En el eje de las ordenadas, en escala logarítmica, se grafica A/A_0 , siendo A , el valor de la amplitud en una posición x en el canal, y A_0 , la amplitud registrada para el primer máximo registrado, ubicado a 5 cm del final de la carrera de la paleta.

Luego, se supone un decaimiento exponencial, de modo que se ajustan los valores de x/h vs A/A_0 a una exponencial de la forma:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\frac{\beta(x-5)}{h}} \quad (3.1)$$

Siendo β , el coeficiente de atenuación y determinado a partir de la exponencial que presente el mejor ajuste con respecto a los datos obtenidos.

3.6.3 Determinación celeridad

Para determinar la celeridad de la onda en función de la frecuencia y su posición en el canal, se determina la longitud de onda (λ) para un punto a lo largo del canal. Para este punto se determina la frecuencia local como el número de crestas que pasan por segundo en este punto, de modo que la celeridad local se calcula según la ecuación (3.2)

$$c = \lambda f \quad (3.2)$$

Este cálculo se realiza para cada punto a lo largo del canal, de modo que es posible determinar la variación de la celeridad en función de su posición y frecuencia.

4 MOVIMIENTO SINUSOIDAL

Para generar el movimiento sinusoidal, se utiliza un servo motor HobbyKing 4008 DX acoplado a un engranaje tipo rueda dentada de 5,80 cm de diámetro interno y 6,50 cm de diámetro conectado a un eje dentado, como se mostró en las figuras 3.3 y 3.4.

Para generar el movimiento, el servo motor gira en sentido horario y antihorario con distinta velocidad y amplitud, según los requerimientos de amplitud y frecuencia. El movimiento del servo genera el movimiento de una paleta, la cual será la que genere perturbación del fluido, como se muestra en la Figura 4.1.

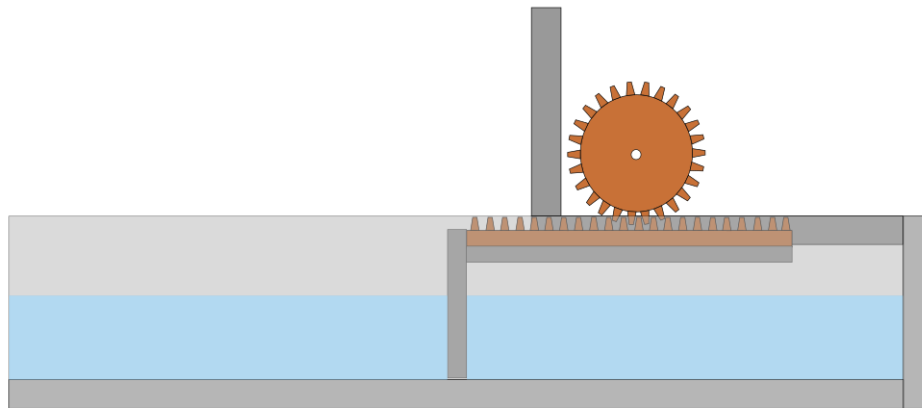


Figura 4.1: Posición sistema de movimiento controlado por servo en canal.

Para lograr que el sistema servo-paleta describiese un movimiento sinusoidal, fue necesaria una calibración para distintas configuraciones de amplitud y frecuencia.

4.1 CALIBRACIÓN SERVO MOTOR

La calibración del servo motor es un proceso iterativo, puesto que variaciones en la amplitud resultan en variaciones de la frecuencia de movimiento, de modo que, al calibrar la frecuencia, las amplitudes reales obtenidas no se condicen con las amplitudes esperadas, siendo necesaria una nueva calibración de esta. La calibración del servo se realiza sin fluido, debido al tiempo que toma la mezcla de este, sin embargo, se verifica, mediante el análisis de 3 frecuencias y una amplitud, que la calibración realizada es válida para la situación con fluido debido al gran torque nominal que posee el servo utilizado.

De este modo, se ingresa al Arduino una frecuencia y una amplitud, y se determina la frecuencia real del movimiento, obteniendo el gráfico de la Figura 4.2, donde el eje de las abscisas corresponde a la frecuencia real obtenida y el eje de las ordenadas, la frecuencia ingresada al Arduino.

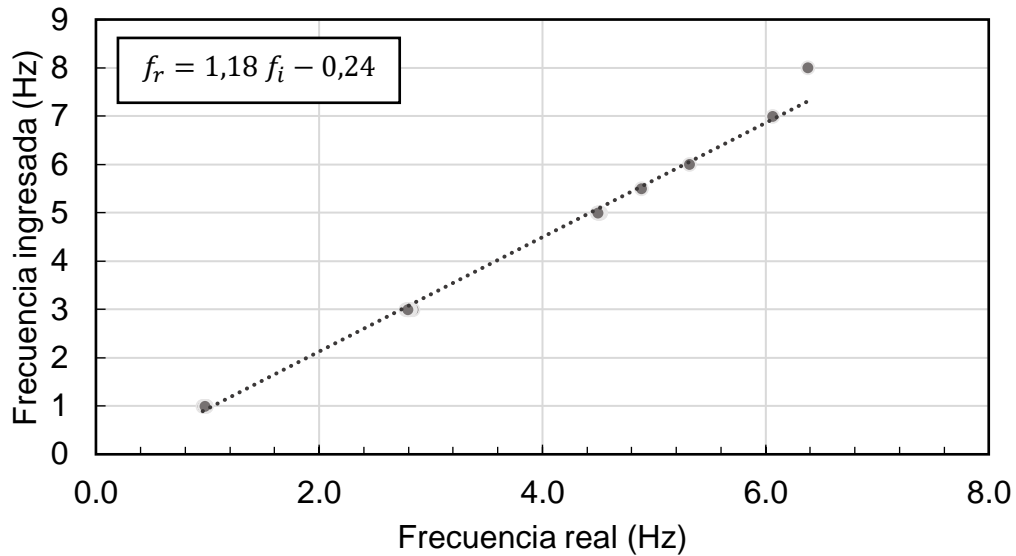


Figura 4.2: Calibración de frecuencia a partir de datos obtenidos en calibración. Dato que se desvía de la tendencia no se considera en la calibración.

A partir de lo anterior, se tiene que la frecuencia a ingresar en el código se rige bajo la expresión de la ecuación (4.1):

$$f_i = 1,18f_r - 0,24 \quad (4.1)$$

En donde f_r corresponde a la frecuencia que se requiere para el experimento, en Hertz y f_i a la frecuencia a ingresar en el programa, en Hertz.

Ahora bien, una vez calibrada la frecuencia, se procede a calibrar la amplitud, para ello, se tiene que, para diferentes configuraciones de amplitud y frecuencia, se varía el valor de la amplitud del código Arduino, asociado al valor S_e en el código. Este valor representa una conversión entre el ángulo que se mueve el servo motor (en microsegundos) y el desplazamiento real para una configuración de amplitud y frecuencia. Por ejemplo, en la siguiente tabla, se muestra que, para una amplitud de 1,0 cm y una frecuencia de 2,8 Hz, es necesario fijar S_e en 230 para lograr la amplitud real de 1,0 cm. Con esto, se genera una regresión que permite determinar cuál debe ser el valor de S_e para cada configuración de amplitud y frecuencia.

Tabla 4.1: S_e requerido para una determinada amplitud y frecuencia.

Frec / Amp	1 cm	2 cm	3 cm
0,98 Hz	225	220	215
2,8 Hz	230	225	220
4,5 Hz	240	235	230

Finalmente, la ecuación que determina el valor de S_e , para cada configuración de amplitud y frecuencia, se presenta en la ecuación (4.2):

$$S_e = 215 + 5(3 - A_p) + (0,89f_r^2 - 0,62f_r - 0,25) \quad (4.2)$$

En donde, A_p corresponde a la amplitud de carrera de la paleta en centímetros que se desea, f_r la frecuencia real de la configuración y S_e corresponde al valor a ingresar en el código para lograr las amplitudes de carrera y frecuencia deseadas.

4.2 CÓDIGO ARDUINO

Para controlar el servo motor, se utiliza un Arduino UNO alimentado directamente a un computador. El código utilizado se presenta a continuación:

```
#include <Servo.h>
Servo servoInstance;

#define pi 3.14159
#define amp 3.0 // Amplitud paleta en centímetros
#define frec 5.0 // Valor dado por tabla 4.2 para frecuencia
#define step 207.1 // Valor dado por tabla 4.3 para frec y amplitud
#define min_ang 1100.0
#define resolution 100.0

float period = 1/frec;
float delay_time = period/resolution;
int delay_time_microseconds = static_cast<int>(delay_time*(pow(10,6)));
int delay_time_miliseconds = static_cast<int>(delay_time*(pow(10,3)));
float max_ang = ((amp * steps_per_cm) + min_ang)
float ang;
float t = -period/4;
float y = 0;

void setup() {
  servoInstance.attach(4); //Se comunica el servo motor con el pin 4
  Serial.begin(9600);
  servoInstance.writeMicroseconds(min_ang);
}

void loop() {
  y=1000*sin(2*pi*frec*t);
  ang = map(y, -1000,1000,min_ang,max_ang);
  servoInstance.writeMicroseconds(ang);
  delay(delay_time_miliseconds);
  t = t + delay_time;
}
```


Para definir la amplitud del movimiento, es necesario cambiar la variable A_p entre 1,0 y 3,0 cm. Dependiendo de la frecuencia requerida, se deben utilizar los valores presentados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Frecuencias esperadas y frecuencias a ingresar en Código Arduino calculadas a partir de ecuación (4.1).

Frecuencia Requerida (Hz)	Frecuencia a ingresar
1,0	0,94
1,2	1,18
1,4	1,41
1,6	1,65
1,8	1,88
2,0	2,12
2,2	2,36
2,4	2,59
2,6	2,83
2,8	3,06
3,0	3,30
3,2	3,54
3,4	3,77
3,6	4,01
3,8	4,24
4,0	4,48
4,2	4,72
4,4	4,95
4,6	5,19
4,8	5,42
5,0	5,66

Valores mayores a 6 Hz no fueron calibrados.

Ahora bien, una vez definida la amplitud y frecuencia requeridas para el experimento, se ingresa el valor del "Step" correspondiente en el código, el cual se presenta en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Valor step para cada configuración de amplitud y frecuencia.

Frec/amp	1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	3
1	225,02	224,02	223,02	222,52	222,02	221,02	220,02	219,02	218,02	217,52	217,02	216,02	215,02
1,2	225,29	224,29	223,29	222,79	222,29	221,29	220,29	219,29	218,29	217,79	217,29	216,29	215,29
1,4	225,63	224,63	223,63	223,13	222,63	221,63	220,63	219,63	218,63	218,13	217,63	216,63	215,63
1,6	226,04	225,04	224,04	223,54	223,04	222,04	221,04	220,04	219,04	218,54	218,04	217,04	216,04
1,8	226,52	225,52	224,52	224,02	223,52	222,52	221,52	220,52	219,52	219,02	218,52	217,52	216,52
2	227,08	226,08	225,08	224,58	224,08	223,08	222,08	221,08	220,08	219,58	219,08	218,08	217,08
2,2	227,70	226,70	225,70	225,20	224,70	223,70	222,70	221,70	220,70	220,20	219,70	218,70	217,70
2,4	228,40	227,40	226,40	225,90	225,40	224,40	223,40	222,40	221,40	220,90	220,40	219,40	218,40
2,6	229,16	228,16	227,16	226,66	226,16	225,16	224,16	223,16	222,16	221,66	221,16	220,16	219,16
2,8	230,00	229,00	228,00	227,50	227,00	226,00	225,00	224,00	223,00	222,50	222,00	221,00	220,00
3	230,91	229,91	228,91	228,41	227,91	226,91	225,91	224,91	223,91	223,41	222,91	221,91	220,91
3,2	231,89	230,89	229,89	229,39	228,89	227,89	226,89	225,89	224,89	224,39	223,89	222,89	221,89
3,4	232,94	231,94	230,94	230,44	229,94	228,94	227,94	226,94	225,94	225,44	224,94	223,94	222,94
3,6	234,07	233,07	232,07	231,57	231,07	230,07	229,07	228,07	227,07	226,57	226,07	225,07	224,07
3,8	235,26	234,26	233,26	232,76	232,26	231,26	230,26	229,26	228,26	227,76	227,26	226,26	225,26
4	236,53	235,53	234,53	234,03	233,53	232,53	231,53	230,53	229,53	229,03	228,53	227,53	226,53
4,2	237,86	236,86	235,86	235,36	234,86	233,86	232,86	231,86	230,86	230,36	229,86	228,86	227,86
4,4	239,27	238,27	237,27	236,77	236,27	235,27	234,27	233,27	232,27	231,77	231,27	230,27	229,27
4,6	240,75	239,75	238,75	238,25	237,75	236,75	235,75	234,75	233,75	233,25	232,75	231,75	230,75
4,8	242,30	241,30	240,30	239,80	239,30	238,30	237,30	236,30	235,30	234,80	234,30	233,30	232,30
5	243,92	242,92	241,92	241,42	240,92	239,92	238,92	237,92	236,92	236,42	235,92	234,92	233,92
5,2	245,62	244,62	243,62	243,12	242,62	241,62	240,62	239,62	238,62	238,12	237,62	236,62	235,62
5,4	247,38	246,38	245,38	244,88	244,38	243,38	242,38	241,38	240,38	239,88	239,38	238,38	237,38
5,6	249,22	248,22	247,22	246,72	246,22	245,22	244,22	243,22	242,22	241,72	241,22	240,22	239,22
5,8	251,12	250,12	249,12	248,62	248,12	247,12	246,12	245,12	244,12	243,62	243,12	242,12	241,12
6	253,10	252,10	251,10	250,60	250,10	249,10	248,10	247,10	246,10	245,60	245,10	244,10	243,10

4.3 VERIFICACIÓN DE LA FRECUENCIA

Para determinar la frecuencia real del movimiento, se registran fotos con una cámara de alta velocidad para cada una de las configuraciones de amplitud y frecuencia para la situación sin fluido. Con esto, se contabiliza el número de ciclos comprendidos en una cantidad de imágenes y a partir de esta cantidad, se estima el tiempo en función de la tasa de adquisición utilizada (125 o 250 FPS). Los resultados de la verificación se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Frecuencias esperadas y frecuencias observadas según calibración.

Frec esperada (Hz)	Frecuencia Real					Frecuencia promedio		
	1.0 (cm)	1.5 (cm)	2.0 (cm)	2.5 (cm)	3.0 (cm)			
1,0	0,996	0,984	1,000	1,011	1,029	1,004	±	0,008
2,0	1,984	2,000	1,989	1,990	1,989	1,991	±	0,003
3,0	2,959	2,950	2,962	2,976	2,976	2,965	±	0,005
4,0	3,994	3,974	3,997	3,986	3,974	3,985	±	0,005
5,0	5,08	4,98	4,99	5,05	5,02	5,02	±	0,02
6,0	6,057	6,084	6,076	6,061	6,039	6,063	±	0,008

4.4 VERIFICACIÓN AMPLITUD DE LA CARRERA

Para verificar que la amplitud del movimiento fuese consistente con la amplitud ingresada al servo, se registran 5 amplitudes mínimas y máximas de cada ciclo de movimiento, evaluando de paso la consistencia del movimiento. El resumen de amplitudes se presenta en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: Frecuencia esperada versus frecuencia real según amplitud de carrera de paleta.

Amplitud / Frecuencia	1,0 Hz	2,0 Hz	3,0 Hz	4,0 Hz	5,0 Hz	6,0 Hz
1,0 cm	1,01 ± 0,06	1,00 ± 0,05	1,0 ± 0,1	0,96 ± 0,06	0,96 ± 0,06	0,98 ± 0,07
1,5 cm	1,55 ± 0,05	1,55 ± 0,05	1,49 ± 0,06	1,48 ± 0,06	1,52 ± 0,07	1,58 ± 0,07
2,0 cm	2,05 ± 0,05	2,04 ± 0,06	1,98 ± 0,06	1,99 ± 0,06	2,02 ± 0,06	2,1 ± 0,1
2,5 cm	2,60 ± 0,05	2,55 ± 0,05	2,5 ± 0,1	2,55 ± 0,07	2,61 ± 0,07	2,3 ± 0,1
3,0 cm	3,08 ± 0,06	3,05 ± 0,06	3,00 ± 0,06	3,04 ± 0,08	3,3 ± 0,1	2,6 ± 0,2

En la Figura 4.3 se muestra la amplitud de carrera de paleta medida en función de la frecuencia con el objetivo de verificar gráficamente la consistencia del movimiento.

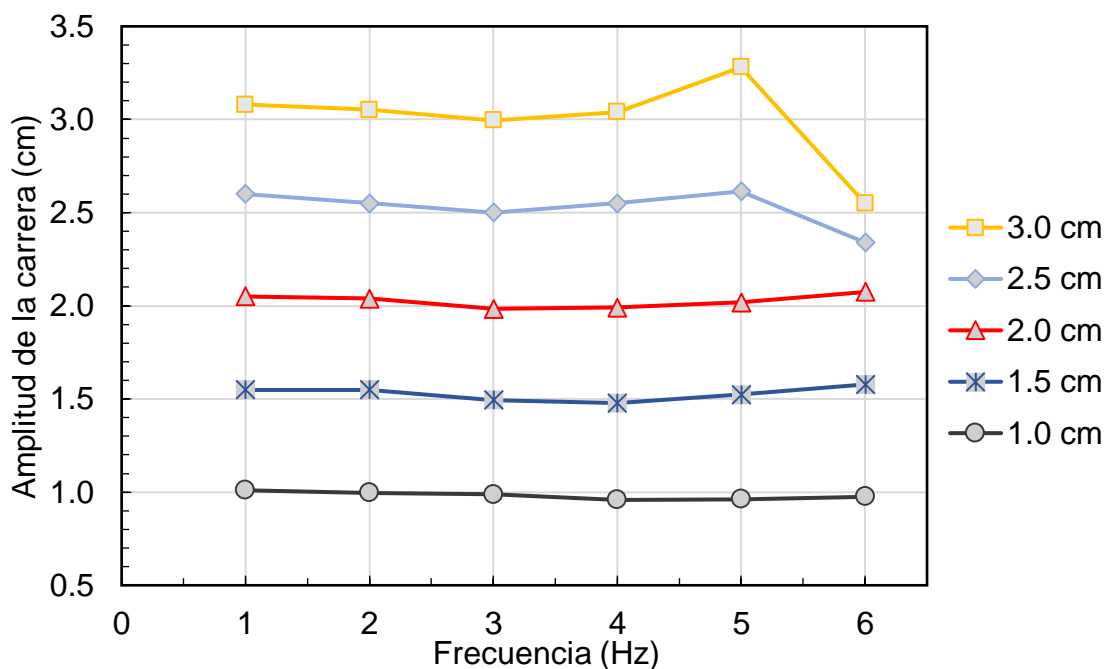


Figura 4.3: Amplitud de carrera de paleta real medida en función de la frecuencia

El detalle de amplitudes medidas se encuentra en el anexo A.1.

4.5 MOVIMIENTO VERTICAL

El sistema de movimiento utilizado en los experimentos posee deficiencias constructivas que generan una leve oscilación vertical en la paleta. La amplitud de movimiento vertical varía en función de la amplitud y frecuencia a las que se somete el servo. A continuación, en la Figura 4.4 se muestra la diferencia del movimiento vertical para una frecuencia de 4 (Hz) y amplitudes de la carrera de paleta 1 (cm) a medida que esta se mueve.

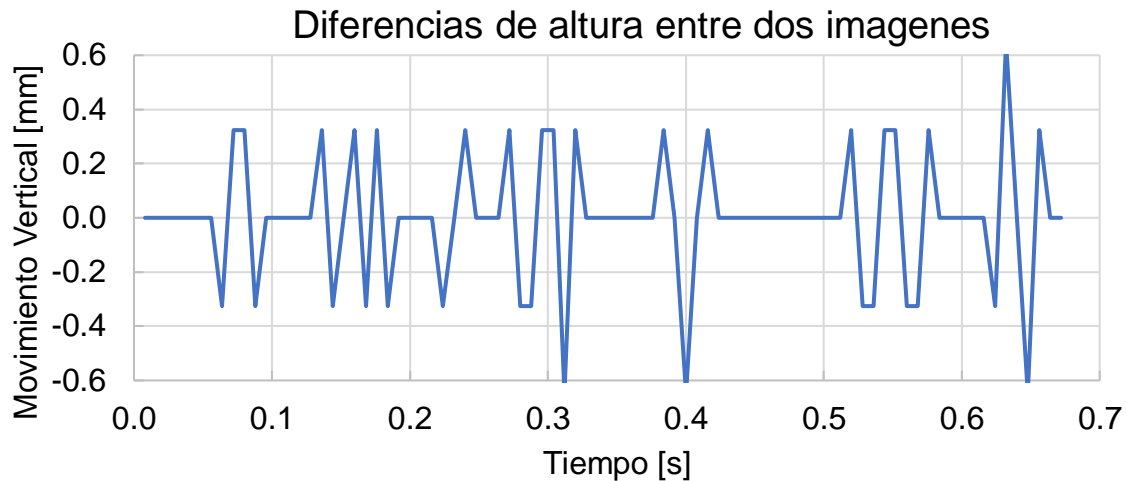


Figura 4.4: Movimiento vertical para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

Se considera que el movimiento vertical no influye en el comportamiento que tendrá la onda a lo largo del canal, puesto que la altura en reposo del fluido es de 2.5 cm, mientras que el rango de amplitudes iniciales oscila entre 0.5 y 1.5 cm.

4.6 MOVIMIENTO CON RESPECTO A SINUSOIDAL IDEAL

Para comparar el movimiento real con el movimiento teórico, se toman fotos con una cámara de alta velocidad para cada una de las configuraciones de frecuencia y amplitud deseadas. Una vez tomadas las fotos, se determina la posición horizontal y vertical de un punto marcado en la paleta, en cada una de las fotos mediante el comando *Ginput* de *Matlab*. La posición horizontal del punto en cada foto se grafica en función del tiempo correspondiente a la fotografía en la que se encuentra.

Para definir el comportamiento teórico, se define la posición y según la siguiente expresión:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.3)$$

En donde A es la amplitud en centímetros, ω , la frecuencia angular en rad/s , t , el tiempo en segundos y φ el desfase en radianes.

A continuación, en la Figura 4.5, se presenta la posición en el tiempo para la sinusoidal ideal y real para una frecuencia de 4 Hz y una amplitud de carrera de paleta 3 cm. El resto de las configuraciones se encuentra en el anexo Movimiento Sinusoidal.

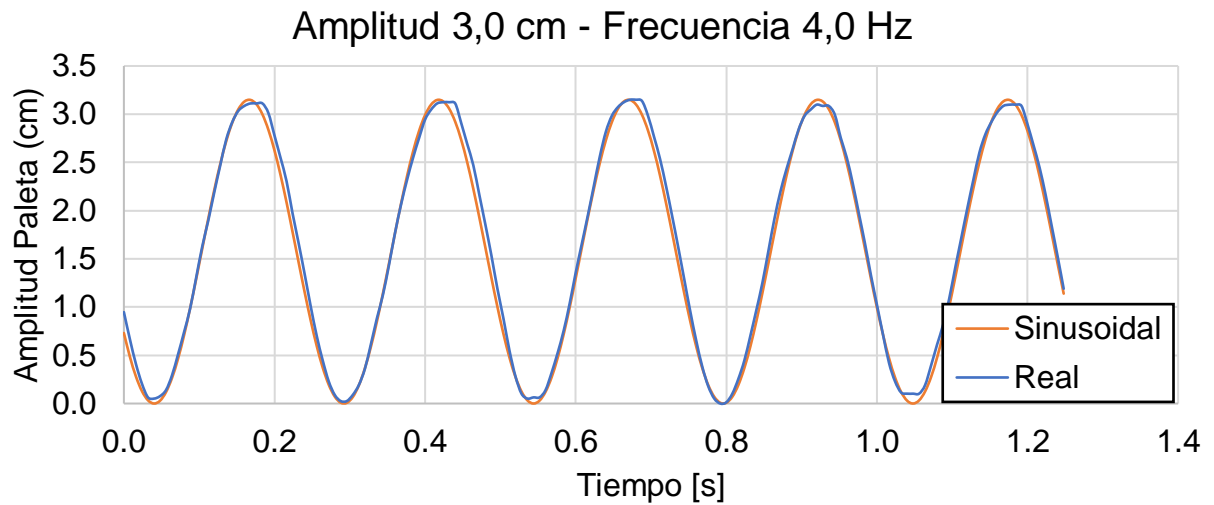


Figura 4.5: Movimiento sinusoidal para amplitud de paleta de 3,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

5 DEFINICIÓN DE VARIABLES

5.1 DETERMINACIÓN AMPLITUDES Y FRECUENCIAS A UTILIZAR

5.1.1 Capacidad del sistema

Para determinar las amplitudes y frecuencias a utilizar, en una primera instancia se determinan las configuraciones posibles por el sistema Servo-Arduino, que se detallan en el anexo A.1, en donde por restricciones de velocidad del movimiento no es posible lograr altas frecuencias y amplitudes de paleta de manera simultánea, de modo que es necesario siempre cumplir la condición de la ecuación (5.1) para que el sistema opere de manera consistente:

$$2,0 \left[\frac{cm}{s} \right] \leq 2 Af \leq 28,5 \left[\frac{cm}{s} \right] \quad (5.1)$$

El límite inferior de 2,0 [cm/s] viene dado por la precisión del servo, puesto que a bajas velocidades el movimiento no es tan fino como se espera, se define este valor como límite para considerar que el movimiento es confiable.

De este modo el sistema se restringe entre una amplitud de 1,0 a 3,0 cm y una frecuencia entre 1,0 a 5,0 Hz, y de 1,0 a 2,0 cm para 6,0 Hz.

5.1.2 Rango de tasas de deformación angular

Para cada configuración de amplitud y frecuencia, se estiman las tasas de deformación angular mínimas y máximas de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\dot{\gamma}_{max} = \frac{A_{max} \omega}{h} \quad , \quad \dot{\gamma}_{min} = \frac{A_{min} \omega}{h} \quad (5.2)$$

En donde A: Amplitud (cm), ω : frecuencia (Hz) y h: Altura de agua en reposo (cm).

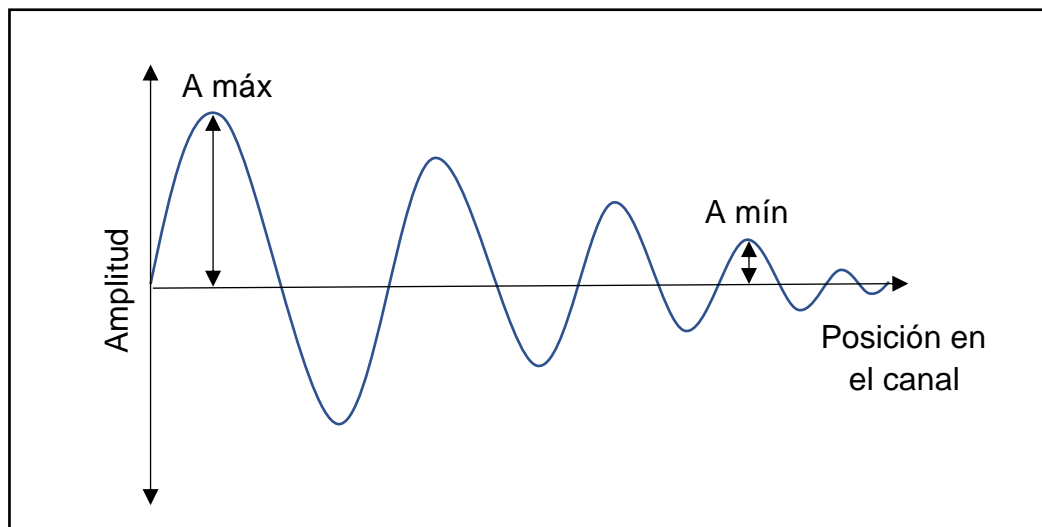


Figura 5.1: Esquema de máxima y mínima amplitud de oscilación en el canal para determinar tasas de deformación angular en onda cuya amplitud se disipa producto de la viscosidad.

Estas tasas de corte representan un aproximado de las mínimas y máximas tasas de deformación angular a las cuales se somete el fluido durante el experimento. Como se menciona anteriormente, es necesario que estos valores se mantengan en el rango no-newtoniano del fluido para que pueda ser descrito por una ley de potencia.

Mediante un experimento previo de FTP, se determinan las amplitudes mínimas y máximas del fluido bajo cada configuración, siendo estas del orden de 0,1 cm y 1,0 cm respectivamente, de modo que es posible determinar los $\dot{\gamma}_{min}$ y $\dot{\gamma}_{max}$ para cada una, cuyo valor aproximado se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Valores mínimos y máximos de la tasa de deformación angular s^{-1} en experimentos según frecuencia y amplitud de onda.

Amplitud de Carrera de paleta (cm)	Frecuencia (Hz)					
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
0,1	0,25 (1/s)	0,5 (1/s)	0,75 (1/s)	1,01 (1/s)	1,26 (1/s)	1,51 (1/s)
1	2,51 (1/s)	5,03 (1/s)	7,54 (1/s)	10,05 (1/s)	12,57 (1/s)	15,08 (1/s)

A partir de la Tabla 5.1 se tiene que el rango de tasas de deformación estimada oscila entre los 0,25 y 15 s^{-1} .

5.2 ELECCIÓN DE MEZCLA A UTILIZAR

En un principio se pretendía utilizar una mezcla de agua destilada con carboximetilcelulosa (CMC) al 0.3 % peso/peso, con frecuencias de oscilación del movimiento entre 0,5 y 2,5 Hz y amplitudes de carrera la de paleta entre 1,0 y 3,0 cm producto de las limitaciones del sistema.

Dado que, para las frecuencias en el rango descrito, se observaron pocas longitudes de onda, se optó por un cambio del servo motor que generaba el movimiento. Esto significó la duplicación de la velocidad del sistema, ampliando el rango de frecuencias entre 1,0 a 6,0 Hz. Este nuevo rango de frecuencias permitió establecer los mínimos y máximos de las tasas de deformación angular a los que la mezcla estaría sometida durante los experimentos, los cuales se detallan en el punto anterior. Calibrado el sistema de movimiento, se estudió la concentración y la temperatura ideal para la mezcla de CMC con agua destilada. Esto con el propósito de observar de manera clara las características del movimiento ante la sollicitación armónica, razón por la cual se realizaron mezclas al 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5 % peso/peso, con temperaturas entre 18 a 26 ° C. A continuación, en las figuras 5.2 a 5.5, se muestran los diagramas reológicos obtenidos para una concentración de 0,5% peso/peso a 18 y 26°C.

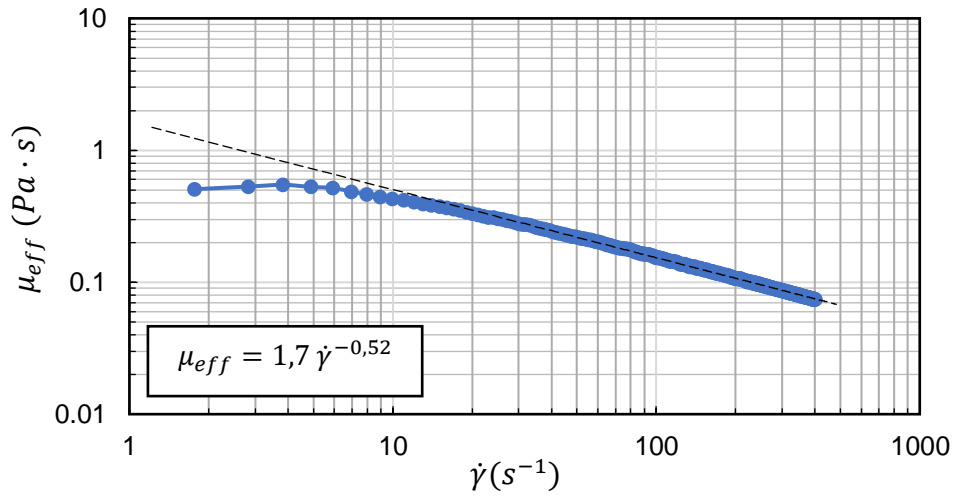


Figura 5.2: Reología mezcla con CMC al 0,5 % peso/peso a 18°C.

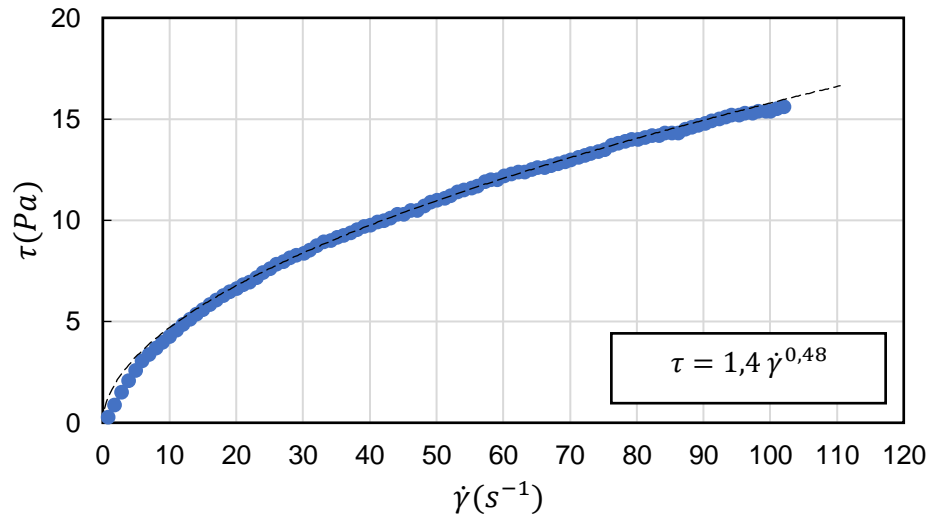


Figura 5.3: Diagrama reológico CMC al 0,5 % peso/peso a 18°C.

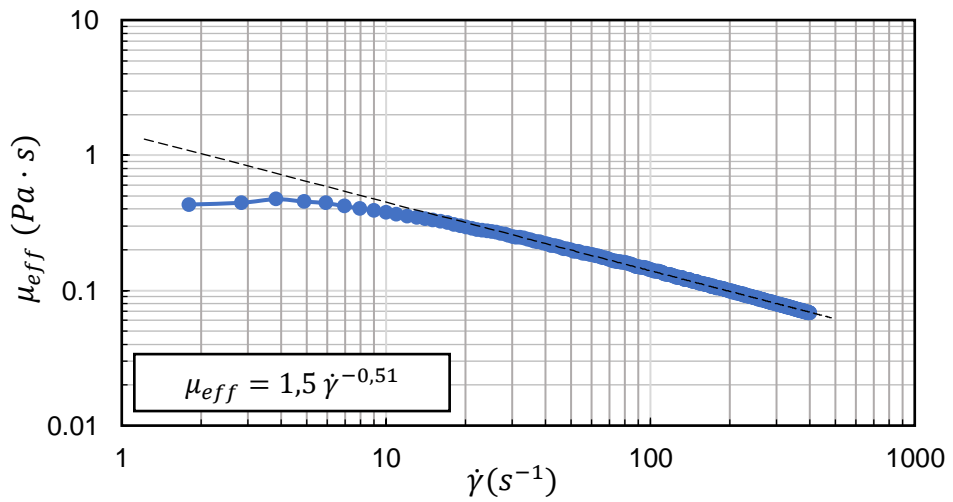


Figura 5.4: Reología mezcla con CMC al 0,5% peso/peso a 26°C.

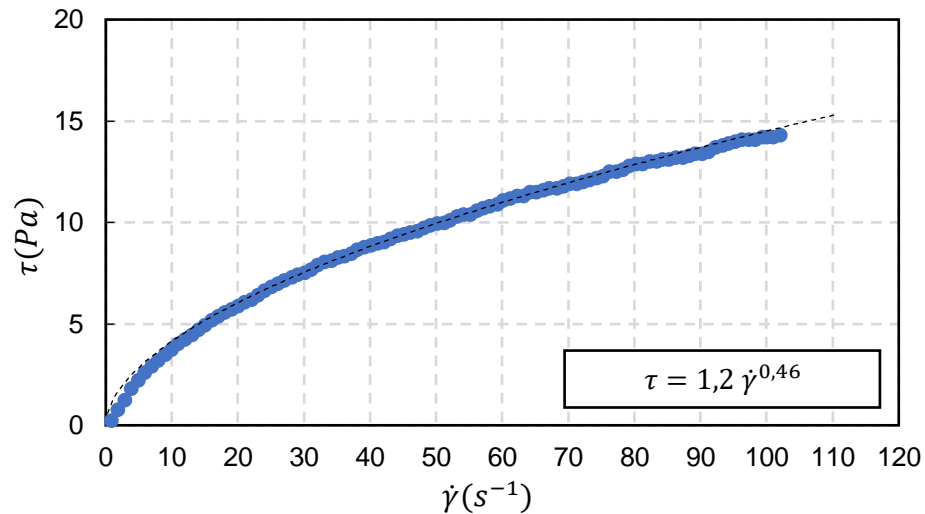


Figura 5.5: Diagrama reológico CMC al 0,5 % peso/peso a 26°C.

En donde, μ_{eff} (Pa s), corresponde a la viscosidad efectiva, $\dot{\gamma}$ (s^{-1}), a la tasa de deformación angular y τ (Pa), al esfuerzo de corte.

A partir del conjunto de reologías exploradas para la mezcla con CMC, se concluyó que esta no es útil para el rango de tasas de deformación en los cuales se trabajará, puesto que este presenta un comportamiento que se ajusta a una ley de potencia a partir de tasas de deformación superiores a $10 s^{-1}$, cuando se requiere que este sea del orden de $0,1 s^{-1}$, razón por la cual se opta por cambiar la sustancia.

Un estudio realizado por Song et al en 2006 caracteriza la reología de mezclas de agua destilada con goma xanthan, un espesante utilizado en la industria alimenticia, y que muestra un comportamiento no newtoniano según ley de potencia para bajas tasas de deformación, como se indica en la Figura 5.6.

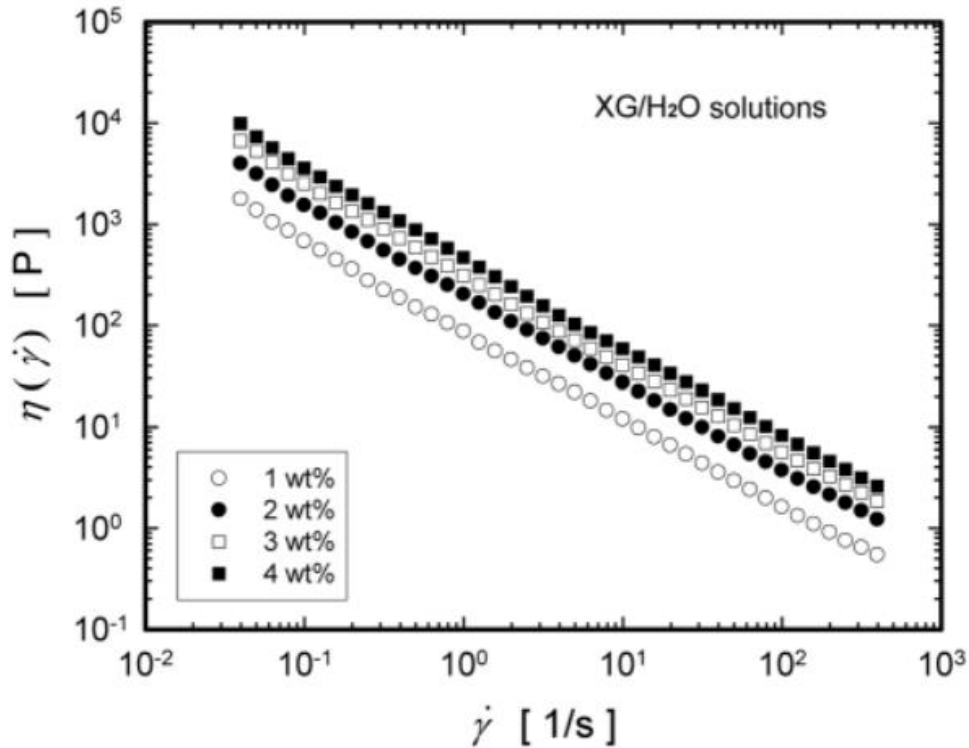


Figura 5.6: Viscosidad efectiva de soluciones de goma xanthan, Song et al (2006)

Song et al establecen que el índice de comportamiento de flujo n , oscila entre 0,1275 y 0,1401, valores mucho menores a los obtenidos de las mezclas con CMC, los cuales oscilan entre 0,4 y 0,6.

Por esta razón, se decidió utilizar mezclas de agua destilada con goma xanthan para los experimentos. Para determinar la concentración apropiada, se realizaron mezclas para concentraciones del 0,5, 0,55, 0,58, 0,6, 0,62, 0,65, 0,7, 0,75 % peso/peso, con temperaturas entre 18 a 20 grados con incrementos de un grado (3 reologías para cada concentración). Para todas las concentraciones se determinó que el índice de comportamiento de flujo, n , es relativamente constante y variable entre 0,13 y 0,16, de modo que la concentración se refleja principalmente en un cambio en la viscosidad en reposo de la mezcla.

A partir del conjunto de mezclas, se determinó que concentraciones por sobre 0,65 % son muy viscosas para observar la propagación de las ondas, puesto que su alta viscosidad las disipa rápidamente. A su vez, concentraciones bajo 0,55 % ocasionaban problemas al someterla ante altas frecuencias, provocando que producto de su baja viscosidad la mezcla salpicara y deformara la forma sinusoidal de la onda generada.

Se realizaron experimentos para concentraciones de 0,58, 0,60 y 0,62 % peso/peso, con el propósito de encontrar la concentración que permitía observar mejores resultados por

medio de FTP. A partir de esto, se concluyó que la concentración de 0,58 % peso/peso, correspondiente a 5,80 gramos de goma xanthan por litro de agua destilada, sería la utilizada para los experimentos finales.

5.3 CONJUNTO DE EXPERIMENTOS

Para determinar las configuraciones de amplitud de paleta y frecuencia a utilizar en los experimentos, fue necesario un proceso de prueba y error variando la concentración de la mezcla, según se mencionó en el punto anterior. De este modo, se determinó que, para observar la mayor cantidad de longitudes de onda dada la instalación experimental, el rango de frecuencias debe estar restringido entre los 3,0 y 5,0 Hz.

Se realizaron 3 campañas de experimentos, las cuales consisten en la repetición de un set de 50 experimentos variando la amplitud de paleta y frecuencia, siendo la amplitud de paleta entre 1,0 y 3,0 cm y la frecuencia entre 3,0 y 5,0 Hz, para una concentración de 0,58 % peso/peso de goma xanthan en agua destilada y para una altura de mezcla en reposo de $2,5 \pm 0,1$ cm.

La frecuencia de 3,6 Hz se incorporó en las campañas 2 y 3 con el propósito de obtener más información sobre la transición entre las frecuencias de 3,0 y 4,0 Hz. Para la campaña 3, no se realizó la configuración 3,0 cm y 5,0 Hz pues hubo un problema con el servo motor, dado esto, se realizaron 135 experimentos en total.

A continuación, en las tablas 5.2 a 5.6, se muestran las configuraciones realizadas en cada campaña de experimentos.

NR: No realizado.

Tabla 5.2: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para campaña 1, en goma xanthan.

Amp	Frecuencia (Hz)									
	3.0	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
1,0 cm	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1,5 cm	X	X	NR	X	X	X	X	X	X	X
2,0 cm	X	X	NR	X	X	X	X	X	X	X
2,5 cm	X	X	NR	X	X	X	X	X	X	X
3,0 cm	X	X	NR	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 5.3: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para campaña 2, en goma xanthan.

Amp	Frecuencia (Hz)									
	3.0	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
1,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 5.4: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para campaña 3, en goma xanthan.

Amp	Frecuencia (Hz)									
	3.0	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
1,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NR

Además de los experimentos en fluidos pseudoplásticos, se desarrollan experimentos en agua y en glicerina diluida en agua destilada al 70% de concentración peso/peso. El conjunto de experimentos realizados en agua y glicerina se presentan en la Tabla 5.5 y Tabla 5.6 respectivamente:

Tabla 5.5: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para experimentos en agua.

Amp	Frecuencia (Hz)														
	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
0,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NR	NR	X	NR	X
1,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NR	NR	X	NR	X
1,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NR	NR	X	NR	X
2,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NR	NR	X	NR	X

Tabla 5.6: Configuraciones de amplitud de paleta (Amp) y frecuencia para experimentos en Glicerina 70%.

Amp	Frecuencia (Hz)														
	2.0	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0
1,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
1,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2,0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2,5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	NR	NR	NR

6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6.1 REOLOGÍA

6.1.1 Reología goma xanthan

La temperatura de la mezcla durante los experimentos es de $19,1 \pm 0,3$ °C, mientras que la densidad de la mezcla es de 1008 ± 4 kg/m³.

En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presenta el diagrama reológico de la mezcla en diferentes campañas de experimentos a una temperatura de 19°C.

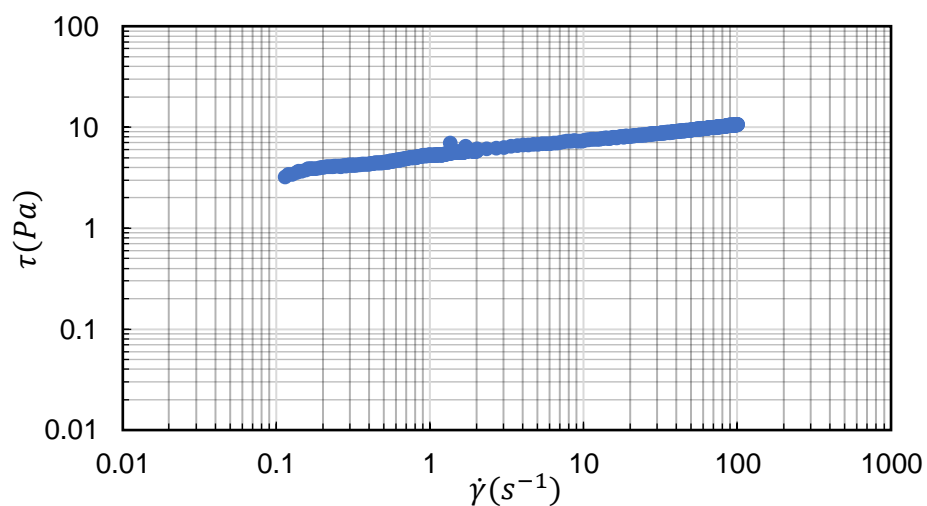


Figura 6.1: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 1 a 19°C.

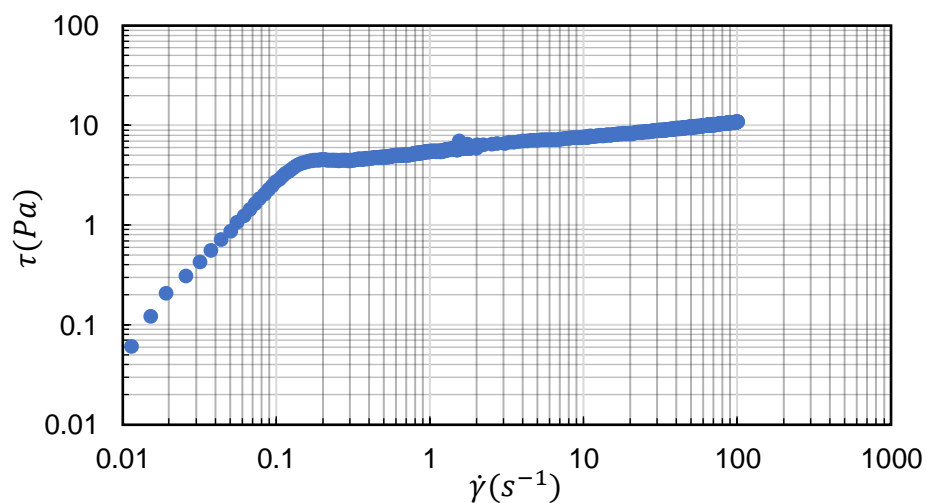


Figura 6.2: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 2 a 19°C.

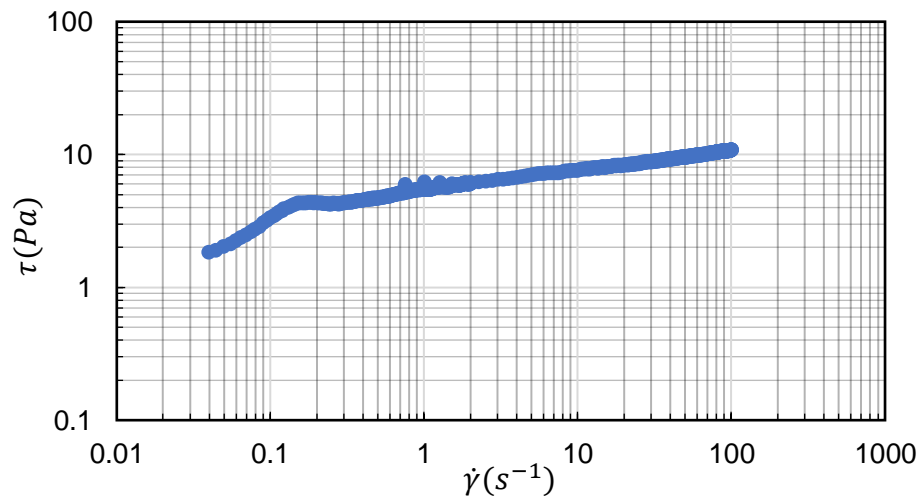


Figura 6.3: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 3 a 19°C.

En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se presenta el gráfico tasa de deformación versus viscosidad efectiva que exhibe la mezcla de agua con goma xanthan a una concentración de 0,58 % peso/peso para una temperatura de 19 ° C.

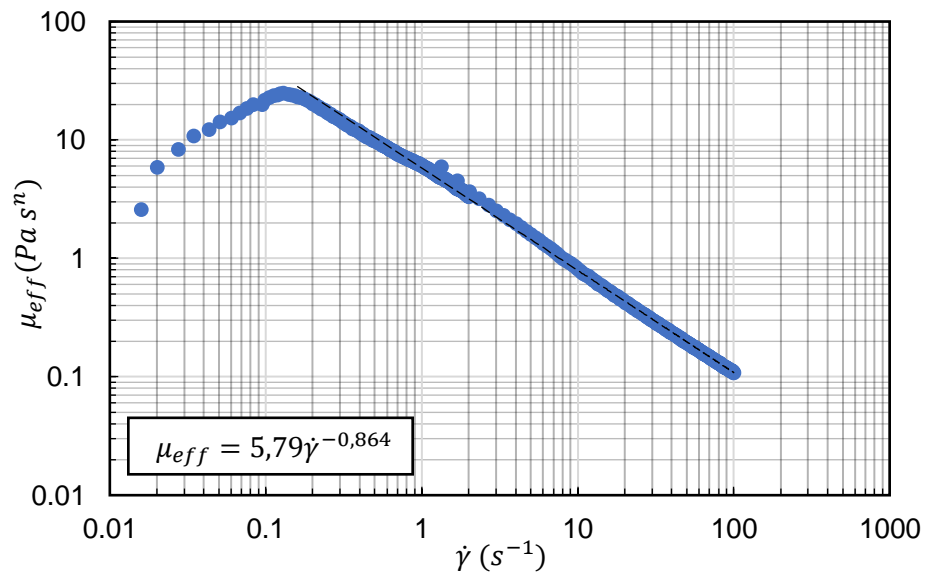


Figura 6.4: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 1 a 19°C.

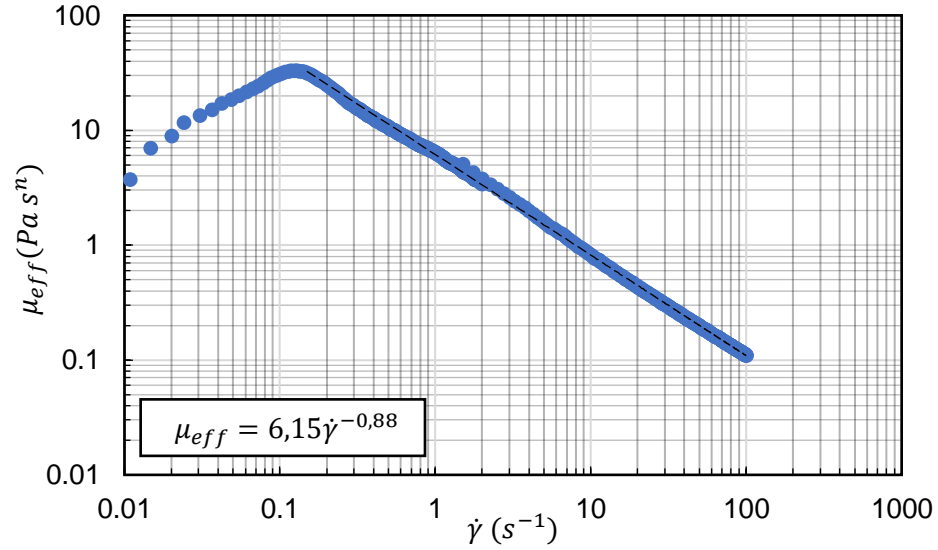


Figura 6.5: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 2 a 19°C .

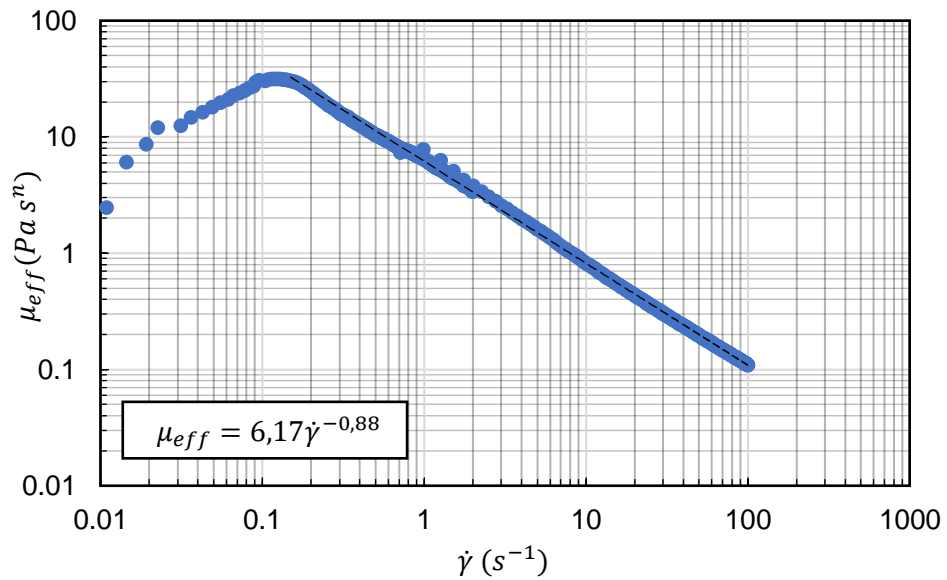


Figura 6.6: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso/peso, campaña 3 a 19°C.

El resto de los diagramas se encuentran en el anexo A.2.

En la Tabla 6.1 se presentan los valores promedio para las mínimas tasas de deformación angular, a partir de la cual se puede modelar la reología de la mezcla con una ley de potencia, y con esto, obtener los índices de consistencia K e índice de consistencia de flujo n promedio entre campañas:

Es posible observar en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 que existe un rango, entre 0 y $0,15 \text{ s}^{-1}$, un cambio de pendiente en la curva. Este se relaciona a que el reómetro utilizado falla a tasas de deformación angular tan bajas, de modo que su resultado es no se condice con la viscosidad efectiva esperada.

Tabla 6.1: Coeficientes K y n promedio para reologías en goma xanthan según campaña de experimentos.

Campaña de experimentos	$\dot{\gamma}_{min\ estimado}$ (s^{-1})	n (-)	μ_{eff} ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)
Campaña 1	0,21	0,16 ± 0,02	5,5 ± 0,5
Campaña 2	0,15	0,14 ± 0,01	5,7 ± 0,6
Campaña 3	0,15	0,14 ± 0,01	5,7 ± 0,7
Promedio campañas	0,17 ± 0,03	0,14 ± 0,02	5,7 ± 0,3

6.1.2 Reología glicerina 70%

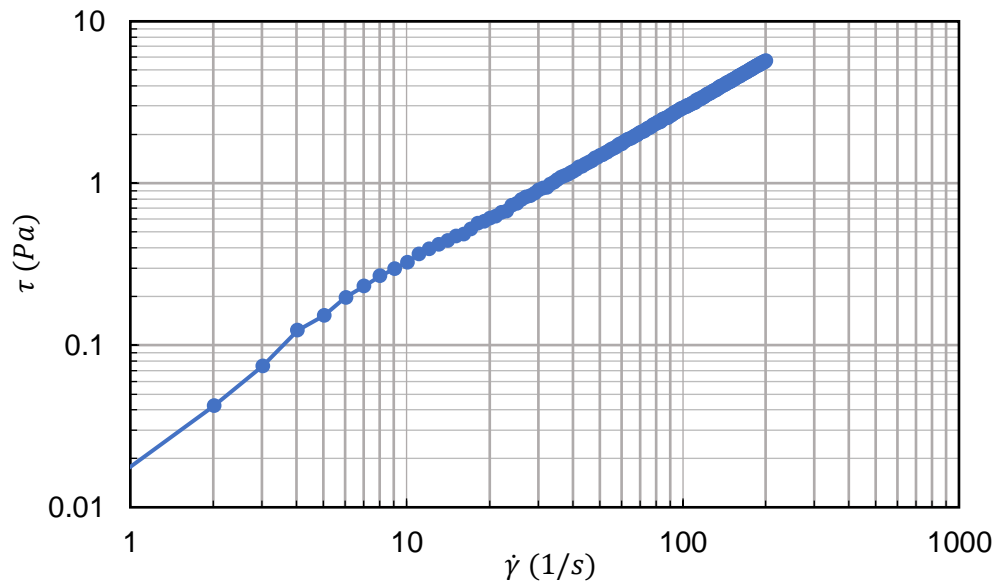


Figura 6.7: Diagrama reológico de glicerina diluida al 70% con agua destilada a 19°C .

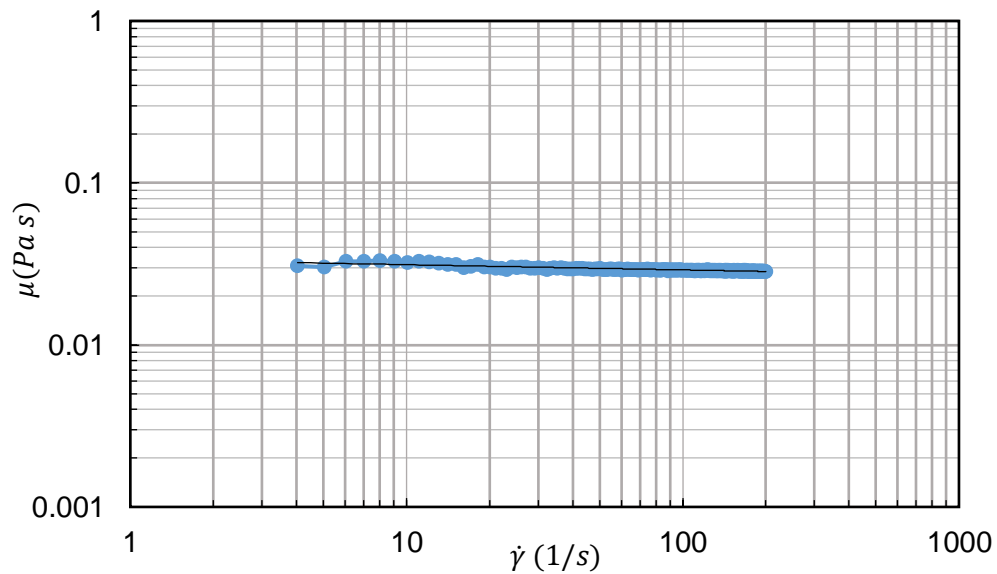


Figura 6.8: Viscosidad efectiva de glicerina diluida al 70% con agua destilada a 19°C.

A partir de la reología presentada, se determina que la viscosidad de la glicerina 70% utilizada presenta una viscosidad μ ($Pa\ s$) equivalente a $0,0291 \pm 0,0009$ ($Pa\ s$), aproximadamente 29 veces la viscosidad del agua ($0,001 Pa\ s$). A su vez, su densidad ρ (Kg/m^3) es de 1263 ± 17 (Kg/m^3).

6.2 FTP

6.2.1 Perfil longitudinal

A continuación, en la Figura 6.11, se presentan los perfiles longitudinales obtenidos mediante FTP para la segunda campaña de experimentos en goma xanthan, para frecuencias entre 3,0 y 5,0 Hz y amplitud de la carrera de 1,0 a 3,0 cm. El resto de los perfiles, tanto para goma xanthan (campañas 1 y 3) como para glicerina se encuentran en el anexo Perfiles longitudinales

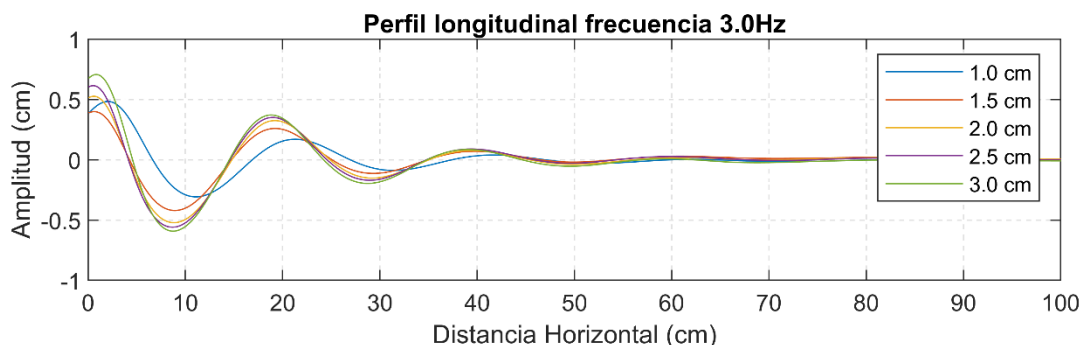


Figura 6.9: Perfiles longitudinales según frecuencia para segunda campaña de experimentos en goma xanthan. Eje horizontal corresponde a posición de la onda en el canal. En la simbología se presenta la amplitud de carrera de paleta para cada frecuencia. Continúa.

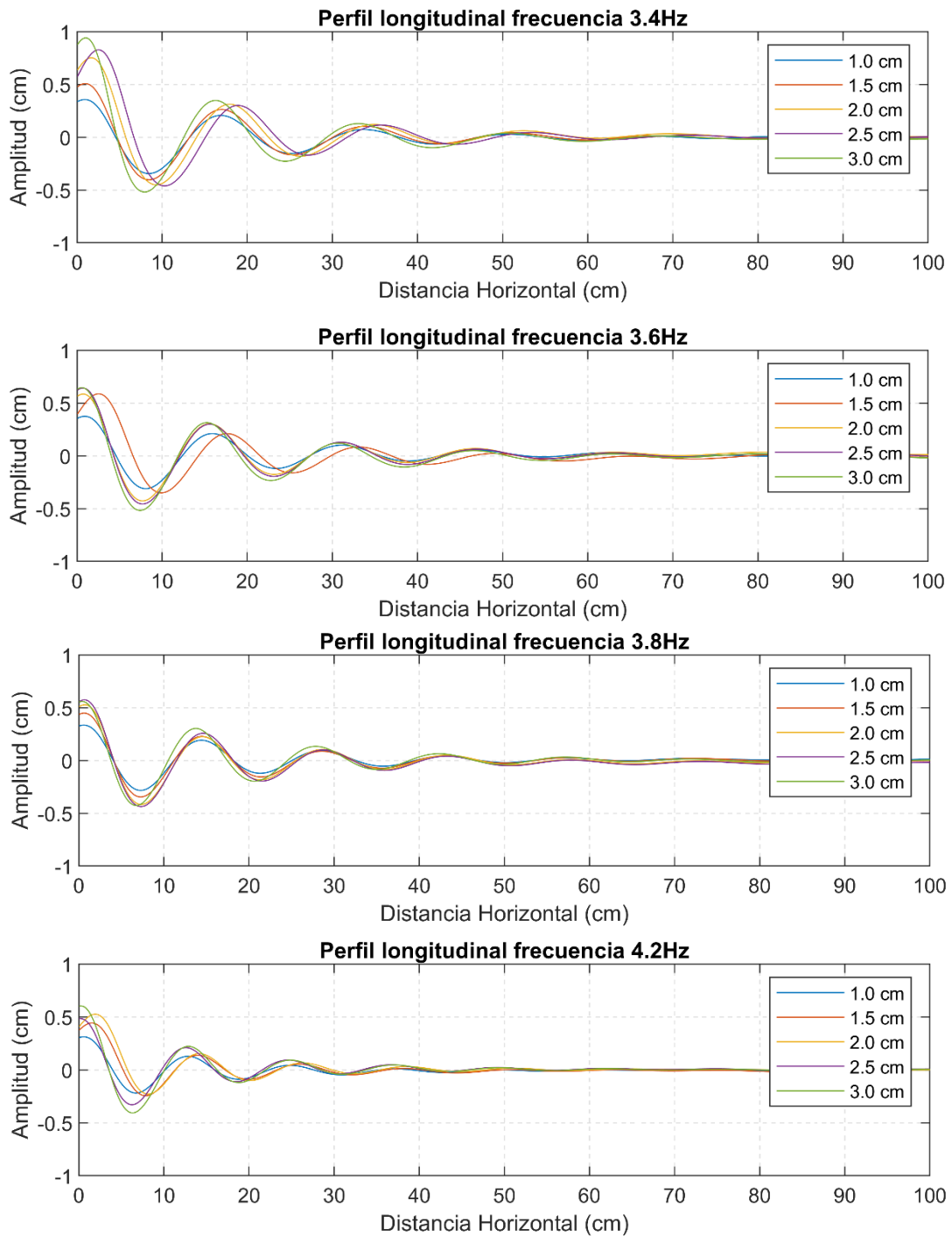


Figura 6.10: Perfiles longitudinales según frecuencia para segunda campaña de experimentos en goma xanthan. Eje horizontal corresponde a posición de la onda en el canal. En la simbología se presenta la amplitud de carrera de paleta para cada frecuencia. Continúa.

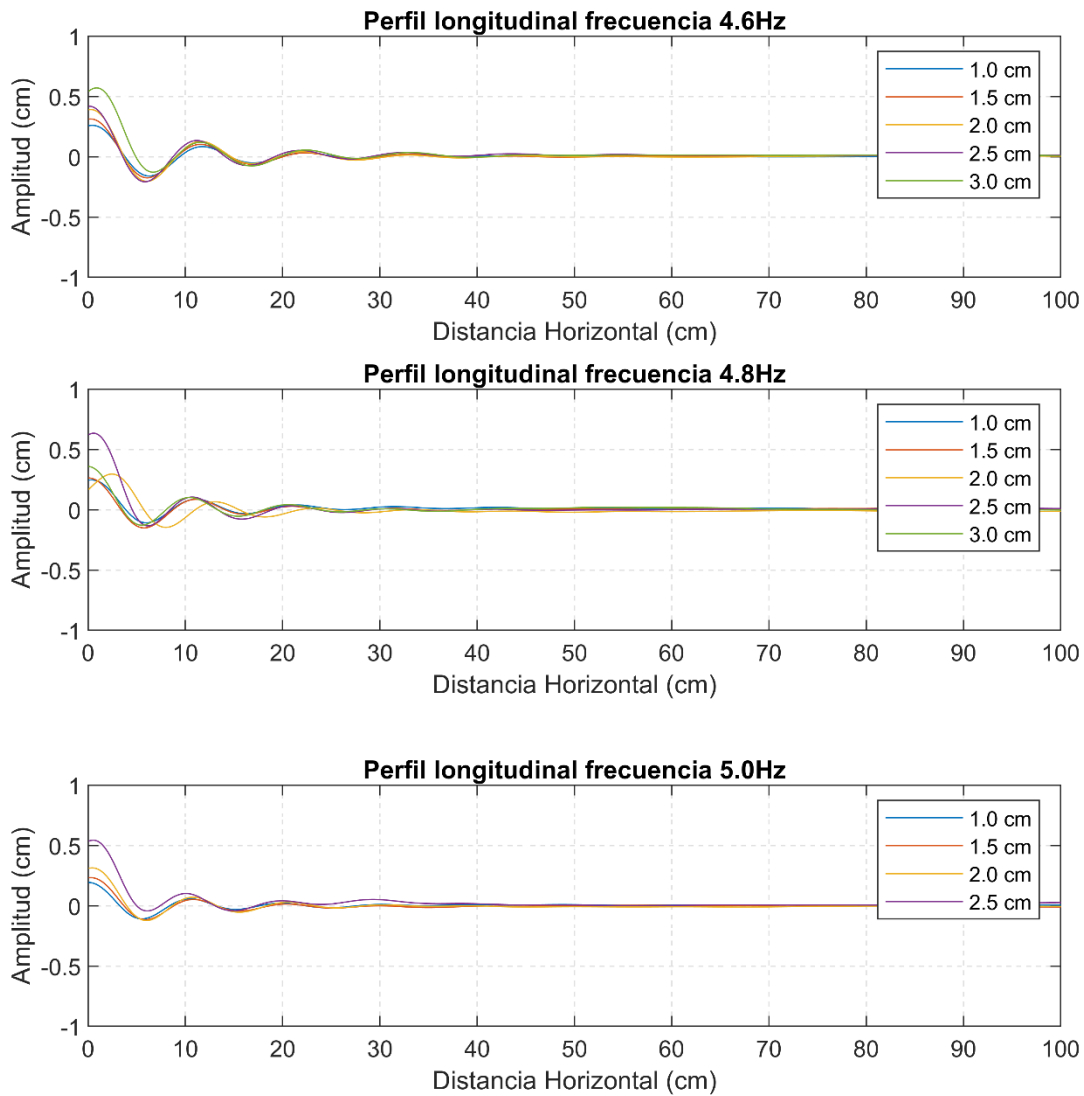


Figura 6.11: Perfiles longitudinales según frecuencia para segunda campaña de experimentos en goma xanthan. Eje horizontal corresponde a posición de la onda en el canal. En la simbología se presenta la amplitud de carrera de paleta para cada frecuencia

6.2.2 Efecto de la viscosidad sobre amplitud

Se grafica en el eje horizontal la posición adimensional de la onda (x/h), mientras que en el eje vertical se grafica la amplitud adimensional, dada por la razón de amplitud de la onda A y la amplitud de la primera cresta registrada A_0 para cada configuración de amplitud y frecuencia. En la Figura 6.12 se presenta este gráfico, en escala semilogarítmica, correspondiente al promedio de amplitudes adimensionales obtenidas para cada frecuencia para el promedio de las campañas de experimentos en goma xanthan.

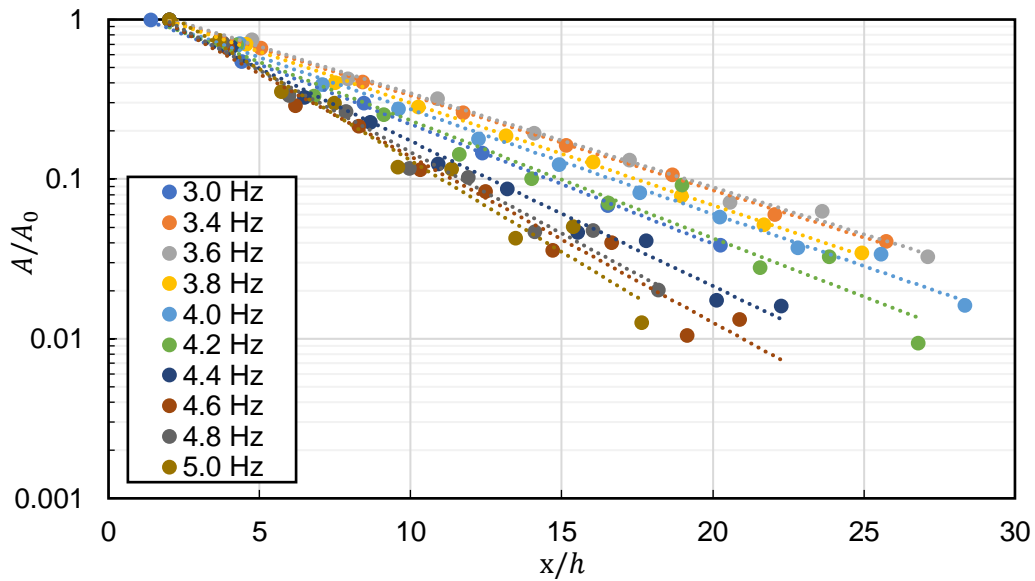


Figura 6.12: Variación de la amplitud en función de la posición. Promedio entre campañas para goma xanthan.

Tabla 6.2: Valor de A_0 promedio para 3 campañas de experimentos realizadas en goma xanthan según frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta (cm)

Frecuencia	Valor A_0 promedio (cm)				
	Amplitud de carrera de paleta				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	0,71 ± 0,03	1,02 ± 0,06	1,24 ± 0,04	1,32 ± 0,05	1,42 ± 0,04
3.4 Hz	0,77 ± 0,03	1,01 ± 0,03	1,15 ± 0,04	1,21 ± 0,05	1,27 ± 0,07
3.6 Hz	0,77 ± 0,02	0,99 ± 0,02	1,115 ± 0,004	1,17 ± 0,02	1,24 ± 0,04
3.8 Hz	0,753 ± 0,005	0,8 ± 0,3	0,8 ± 0,3	0,9 ± 0,4	0,9 ± 0,4
4.0 Hz	0,694 ± 0,004	0,7 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0,8 ± 0,4	0,8 ± 0,4
4.2 Hz	0,641 ± 0,009	0,6 ± 0,2	0,6 ± 0,3	0,7 ± 0,3	0,8 ± 0,3
4.4 Hz	0,54 ± 0,01	0,5 ± 0,2	0,5 ± 0,3	0,6 ± 0,3	0,7 ± 0,3
4.6 Hz	0,49 ± 0,02	0,4 ± 0,2	0,5 ± 0,3	0,6 ± 0,3	0,6 ± 0,3
4.8 Hz	0,43 ± 0,02	0,3 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,5 ± 0,3	0,4 ± 0,2
5.0 Hz	0,38 ± 0,01	0,3 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,5 ± 0,2

La variación de la amplitud en función de la posición por campaña de experimentos o para agua y glicerina, se encuentran en el anexo A.4

Para cada frecuencia, se realiza una regresión exponencial, a modo de obtener una relación con la siguiente forma

$$A/A_0 = e^{-\beta\left(\frac{x-5}{h}\right)} \quad (6.1)$$

En donde $A(cm)$, la amplitud en un punto, $A_0(cm)$, la amplitud característica definida a 5 cm del fin de carrera de la paleta, $x(cm)$, la posición en el canal, α al coeficiente de atenuación. Los coeficientes de atenuación (β) según frecuencia y campaña de experimentos, tanto para la mezcla pseudoplástica, agua y glicerina, se presentan en las tablas 6.3 y 6.4.

Tabla 6.3: Coeficientes de atenuación según campaña de experimentos en goma xanthan y frecuencia aplicada en Hz.

Frec (Hz)	Coeficiente de atenuación								
	Campaña 1			Campaña 2			Campaña 3		
3.0	0,12	±	0,01	0,15	±	0,01	0,20	±	0,04
3.4	0,133	±	0,001	0,139	±	0,005	0,130	±	0,002
3.6				0,139	±	0,007	0,134	±	0,002
3.8	0,154	±	0,009	0,141	±	0,002	0,149	±	0,002
4.0	0,180	±	0,002	0,153	±	0,002	0,151	±	0,002
4.2	0,201	±	0,005	0,18	±	0,05	0,172	±	0,003
4.4	0,24	±	0,01	0,203	±	0,003	0,20	±	0,01
4.6	0,26	±	0,02	0,23	±	0,06	0,26	±	0,01
4.8	0,22	±	0,05	0,25	±	0,01	0,22	±	0,02
5.0	0,2	±	0,1	0,26		0,01	0,27		0,01

Tabla 6.4: Coeficientes de atenuación según frecuencia para experimentos en agua y glicerina 70%.

Frec (Hz)	Coeficiente de atenuación					
	Agua		Glicerina			
2.0	0,014	0,001	0,0256	±	0,0008	
2.4	0,011	±	0,001	0,0318	±	0,004
2.6	0,012	±	0,002	0,0364	±	0,002
2.8	0,014	±	0,001	0,0419	±	0,0005
3.0	0,016	±	0,002	0,0485	±	0,001
3.2	0,025	±	0,001	0,0561	±	0,002
3.4	0,025	±	0,003	0,0646	±	0,002
3.6	0,033	±	0,001	0,0741	±	0,002
3.8	0,039	±	0,002	0,0847	±	0,003
4.0	0,045	±	0,003	0,0962	±	0,003
4.2				0,1087	±	0,01
4.4				0,1222	±	0,02
4.6	0,068	±	0,01	0,14	±	0,07
4.8			0	0,170	±	0,005
5.0	0,088	±	0,001	0,21	±	0,01

Lo anterior se presenta en un gráfico frecuencia vs β (Figura 6.13), incluyendo los casos para el coeficiente de atenuación para el agua y para el caso viscoso.

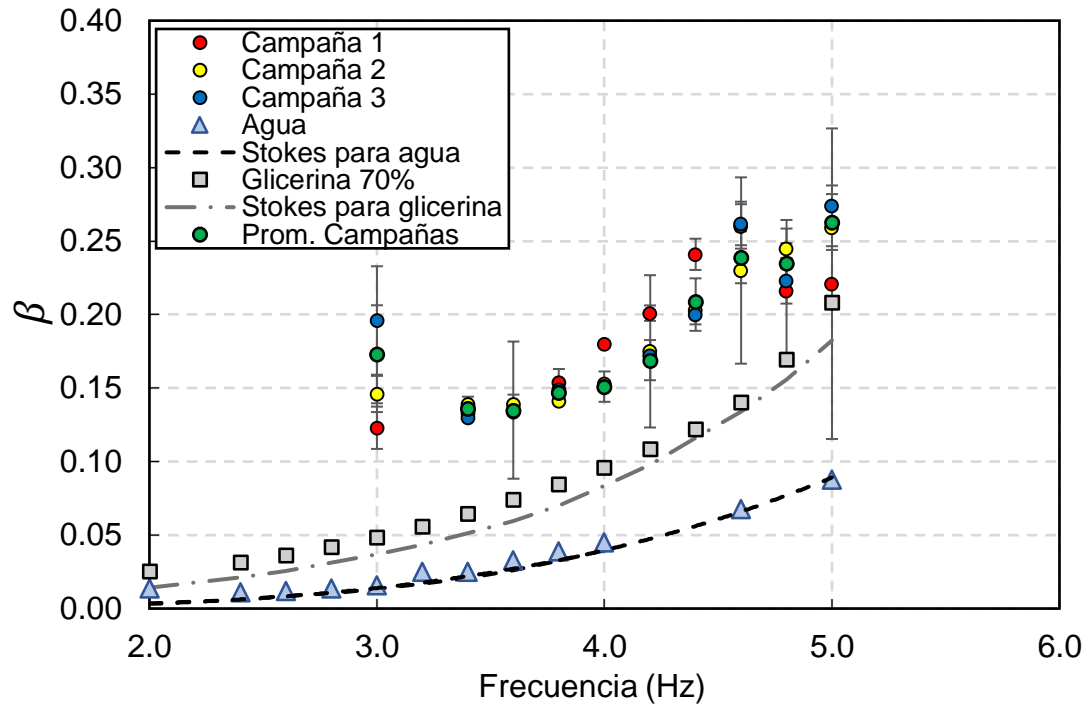


Figura 6.13: Coeficiente de atenuación β en función de la frecuencia para campañas 1, 2 y 3 en goma xanthan, en glicerina 70%, agua destilada. Círculos rojos, amarillos y azules, cuadrado gris y triángulo celeste corresponden a los coeficientes ajustados a partir de datos experimentales, mientras que líneas punteadas gris y negras corresponden al ajuste según la ecuación de Stokes (Ecuación (2.53)), considerando $\rho = 1.260 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, $\mu = 0,029 \text{ (Pa s)}$ y $\gamma = 0,067 \text{ (kg/s}^2\text{)}$ para glicerina y $\rho = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, $\mu = 0,001 \text{ (Pa s)}$ y $\gamma = 0,073 \text{ (kg/s}^2\text{)}$ para agua.

En la Figura 6.13 se observa que los resultados obtenidos para agua se ajustan de manera consistente con lo predicho por la Ecuación (2.53), mientras que para el caso de la glicerina, si bien se observa una tendencia similar, esta presenta una diferencia porcentual de alrededor del 10% respecto al valor predicho por las ecuaciones (2.52) y (2.53). Respecto a los datos obtenidos para las campañas de experimentos en goma xanthan, se tiene que existe gran dispersión de los datos para las frecuencias de 4,6, 4,8 y 5,0 Hz, producto que, al ser frecuencias mayores, la amplitud de onda resultante es menor y se disipa rápidamente a lo largo del canal, disminuyendo la cantidad de información disponible para estimar su atenuación. Sin embargo, se observa que el coeficiente de atenuación β presenta una tendencia similar a las observadas para el agua y glicerina.

6.2.3 Efecto de la viscosidad y frecuencia sobre la celeridad

La celeridad promedio a lo largo del canal, según campaña de experimento y frecuencia, se presenta en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5: Celeridad y su error según campaña de experimento y frecuencia.

Frec (Hz)	Celeridad				
	Agua	Glicerina	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3
2.0	48,0 ± 1,0	47,3 ± 0,4			
2.4	46,9 ± 0,5	46,0 ± 0,2			
2.6	45,8 ± 0,9	45,2 ± 0,2			
2.8	45,0 ± 0,8	44,5 ± 0,3			
3.0	44,0 ± 0,8	43,5 ± 0,3	57,3 ± 1,1	60,35 ± 2,0	61,0 ± 1,0
3.2	42,9 ± 1,3	42,7 ± 0,4			
3.4	42,0 ± 0,9	41,7 ± 0,2	57,2 ± 0,9	58,08 ± 1,6	58,4 ± 1,3
3.6	41,0 ± 1,4	40,5 ± 0,2		56,05 ± 1,0	56,5 ± 1,3
3.8	39,7 ± 1,1	40,0 ± 0,4	54,0 ± 1,0	54,45 ± 1,0	54,6 ± 1,3
4.0	38,7 ± 1,6	38,9 ± 1,3	51,8 ± 1,4	52,50 ± 1,2	52,8 ± 1,3
4.2		36,9 ± 1,6	50,3 ± 2,1	51,30 ± 1,6	51,6 ± 1,6
4.4		35,0 ± 2,0	49,3 ± 2,2	49,65 ± 1,2	49,8 ± 0,8
4.6	34,7 ± 2,2	35,2 ± 0,8	50,0 ± 2,1	49,04 ± 1,5	49,8 ± 1,0
4.8		32,9 ± 1,5	48,6 ± 1,8	49,06 ± 0,8	49,8 ± 1,3
5.0	32,8 ± 3,3	30,4 ± 2,2	47,8 ± 1,8	48,65 ± 1,6	49,1 ± 1,1

En la Figura 6.14 se presenta la celeridad adimensional y la longitud de onda adimensional promedio para un instante dado, a lo largo del canal para las 3 campañas de experimentos en goma xanthan, agua y glicerina.

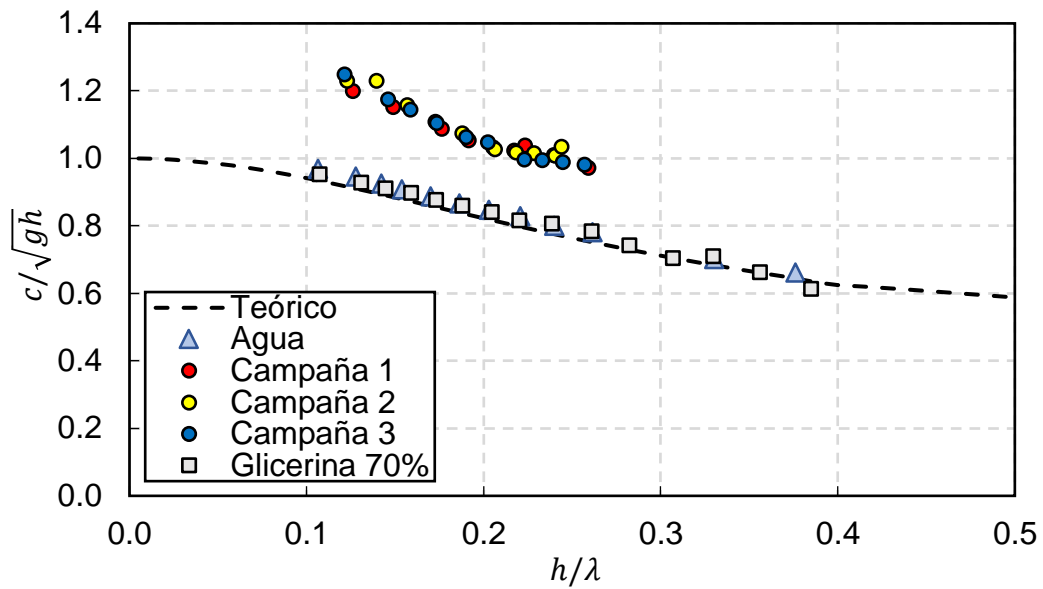


Figura 6.14: Celeridad adimensional promedio en función de longitud de onda adimensional promedio para campañas de experimentos en goma xanthan (círculos), agua (triángulos) y glicerina 70% (cuadrados). Valor teórico calculada a partir de la ecuación (2.12) según el número de onda k determinado para una frecuencia f según la ecuación (2.12) para el caso invíscido.

A partir de la Figura 6.14 se observa que tanto el agua como la glicerina se comportan como fluidos ideales, incluso para un fluido 29 veces más viscoso que el agua. A su vez, se observa que los resultados en goma xanthan, respecto a la celeridad promedio a lo largo del canal, sigue una tendencia similar, pero desplazada, respecto al caso invíscido y viscoso, lo cual se asocia principalmente a la diferencia entre las viscosidades para cada una de las mezclas.

6.2.4 Efecto de la viscosidad sobre longitud de onda

En la Figura 6.15 se presentan las longitudes de onda promedio entre campañas en función de su posición a lo largo del canal.

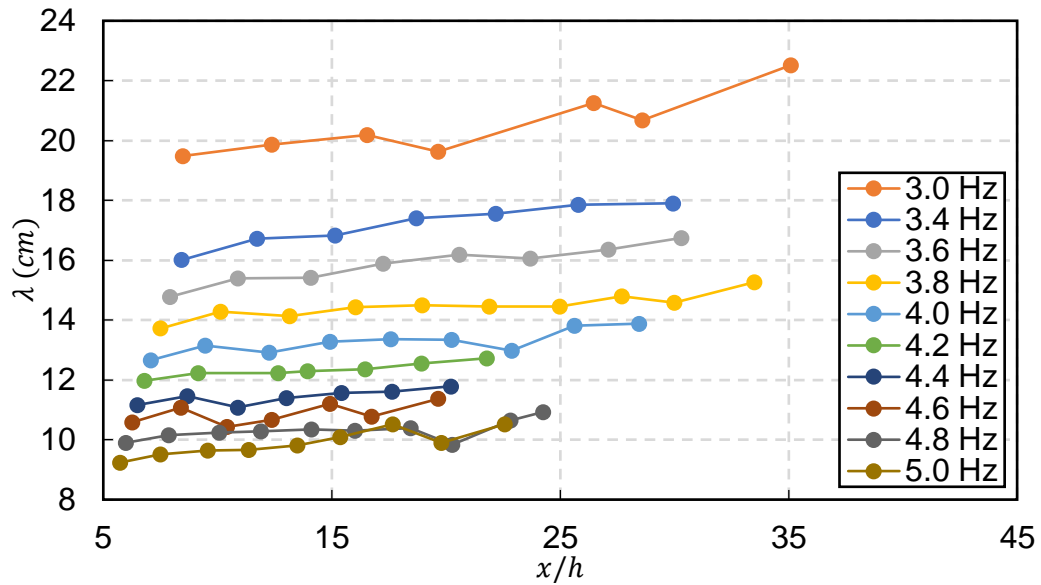


Figura 6.15: Longitud de onda promedio entre campañas de experimentos en goma xanthan en función de la posición adimensional y la frecuencia aplicada.

Los valores de la longitud de onda y posición adimensional presentados en la Figura 6.15, se presentan en las tablas 6.6, 6.7 y 6.8.

Tabla 6.6: Valores longitud de onda promedio entre campañas para goma xanthan en función de la frecuencia. Continúa

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz
19,48 ± 0,09	16,0 ± 0,5	14,78 ± 0,08	13,7 ± 0,2	12,7 ± 0,2
19,9 ± 0,7	16,7 ± 0,1	15,39 ± 0,01	14,3 ± 0,3	13,1 ± 0,3
20,2 ± 0,2	16,8 ± 0,2	15,41 ± 0,02	14,1 ± 0,2	12,9 ± 0,2
19,6 ± 0,5	17,4 ± 0,3	15,87 ± 0,03	14,4 ± 0,2	13,3 ± 0,2
21,2 ± 0,4	17,5 ± 0,5	16,19 ± 0,03	14,5 ± 0,1	13,36 ± 0,08
20,7 ± 0,5	17,9 ± 0,1	16,0 ± 0,1	14,5 ± 0,3	13,3 ± 0,2
22,5 ± 0,8	17,9 ± 0,7	16,36 ± 0,04	14,5 ± 0,9	13 ± 1,0
21,6 ± 0,2		16,7 ± 0,7	14,80 ± 0,08	13,82 ± 0,01
			14,59 ± 0,05	13,9 ± 0,3
			15,27 ± 0,03	12,9 ± 0,2

Tabla 6.7: Valores longitud de onda promedio entre campañas para goma xanthan en función de la frecuencia.

4.2 Hz		4.4 Hz		4.6 Hz		4.8 Hz		5.0 Hz	
11,97	± 0,09	11,2	± 0,2	10,6	± 0,2	9,9	± 0,2	9,2	± 0,3
12,2	± 0,2	11,5	± 0,4	11,1	± 0,8	10,15	± 0,09	9,52	± 0,07
12,2	± 0,6	11,1	± 0,3	10,4	± 0,3	10,24	± 0,06	9,6	± 0,2
12,3	± 0,2	11,38	± 0,08	10,7	± 0,2	10,3	± 0,3	9,67	± 0,04
12,4	± 0,1	11,6	± 0,2	11,2	± 0,8	10,4	± 0,3	9,8	± 0,1
12,5	± 0,3	11,6	± 0,1	10,8	± 0,4	10,3	± 0,4	10,1	± 0,2
12,7	± 0,3	11,8	± 0,2	11,4	± 0,4	10,4	± 0,4	10,5	± 0,3
						9,8	± 0,6	9,9	± 0,9
						10,7	± 0,3	10,5	± 0,8
						10,9	± 0,1		

Tabla 6.8: Posición adimensional x/h promedio entre campañas para goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz		3.4 Hz		3.6 Hz		3.8 Hz		4.0 Hz	
8,47	± 0,05	8,42	± 0,03	7,92	± 0,05	7,50	± 0,02	7,08	± 0,02
12,4	± 0,1	11,74	± 0,04	10,90	± 0,05	10,14	± 0,04	9,46	± 0,04
16,54	± 0,05	15,16	± 0,05	14,09	± 0,06	13,16	± 0,03	12,25	± 0,03
19,7	± 0,2	18,7	± 0,1	17,25	± 0,05	16,04	± 0,05	14,92	± 0,05
26,5	± 0,4	22,2	± 0,1	20,58	± 0,09	18,95	± 0,06	17,59	± 0,05
28,6	± 0,5	25,8	± 0,1	23,68	± 0,07	21,9	± 0,1	20,24	± 0,05
35,1	± 0,2	29,9	± 0,1	27,10	± 0,09	24,97	± 0,09	22,9	± 0,1
		33,3	± 0,2	30,3	± 0,1	27,69	± 0,08	25,6	± 0,1
						30,0	± 0,2	28,4	± 0,3
						33,50	± 0,03		

4.2 Hz		4.4 Hz		4.6 Hz		4.8 Hz		5.0 Hz	
6,81	± 0,03	6,48	± 0,03	6,25	± 0,05	5,97	± 0,09	5,72	± 0,02
9,15	± 0,03	8,67	± 0,03	8,4	± 0,1	7,9	± 0,1	7,49	± 0,03
12,7	± 1,0	10,88	± 0,04	10,41	± 0,05	10,07	± 0,18	9,57	± 0,03
13,93	± 0,08	13,01	± 0,04	12,4	± 0,1	11,91	± 0,05	11,35	± 0,04
16,5	± 0,1	15,44	± 0,06	14,9	± 0,1	14,11	± 0,06	13,50	± 0,06
18,92	± 0,09	17,65	± 0,07	16,8	± 0,2	16,0	± 0,1	15,38	± 0,06
21,8	± 0,1	20,2	± 0,1	19,7	± 0,1	18,5	± 0,1	17,67	± 0,09
23,88	± 0,01	21,2	± 0,1	21,17	± 0,02	20,28	± 0,02	19,78	± 0,07
27,1	± 0,2	24,8	± 0,2	23,54	± 0,01	22,81	± 0,01	22,6	± 0,5
29,4	± 0,2	26,9	± 0,1	26,20	± 0,02	24,25	± 0,02	24,4	± 0,3
		30,8	± 0,2					26,62	± 0,02

Lo anterior puede presentarse adimensionalmente tomando el adimensional de la posición como x/h y el adimensional de la longitud de onda como λ/λ_0 . En la Figura 6.16 se presenta el gráfico x/h vs λ/λ_0 para goma xanthan, en la Figura 6.17, para glicerina 70% y finalmente, en la Figura 6.18 para agua.

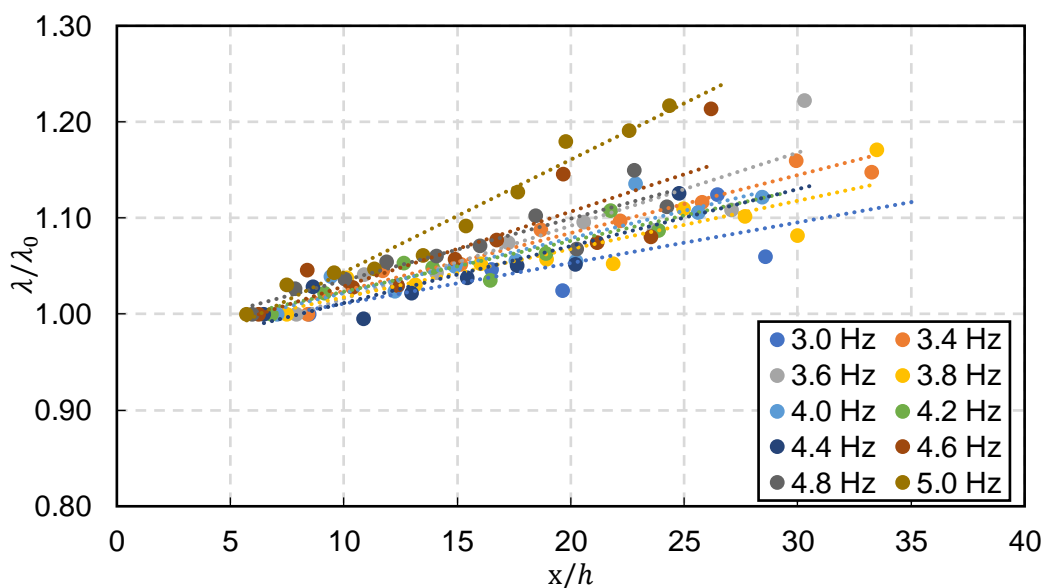


Figura 6.16: Longitud de onda adimensional en función de posición adimensional para experimentos en goma xanthan¹.

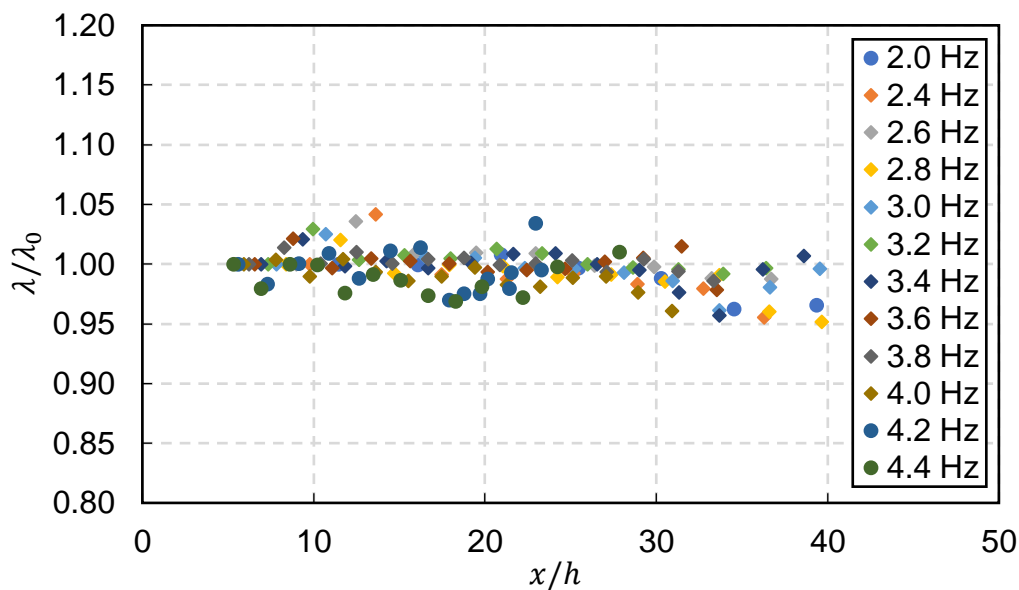


Figura 6.17: Longitud de onda adimensional en función de posición adimensional para experimentos en Glicerina 70%.

¹ La variación de la longitud de onda en función de la posición para las 3 campañas en goma xanthan se presentan en el Anexo A.5.

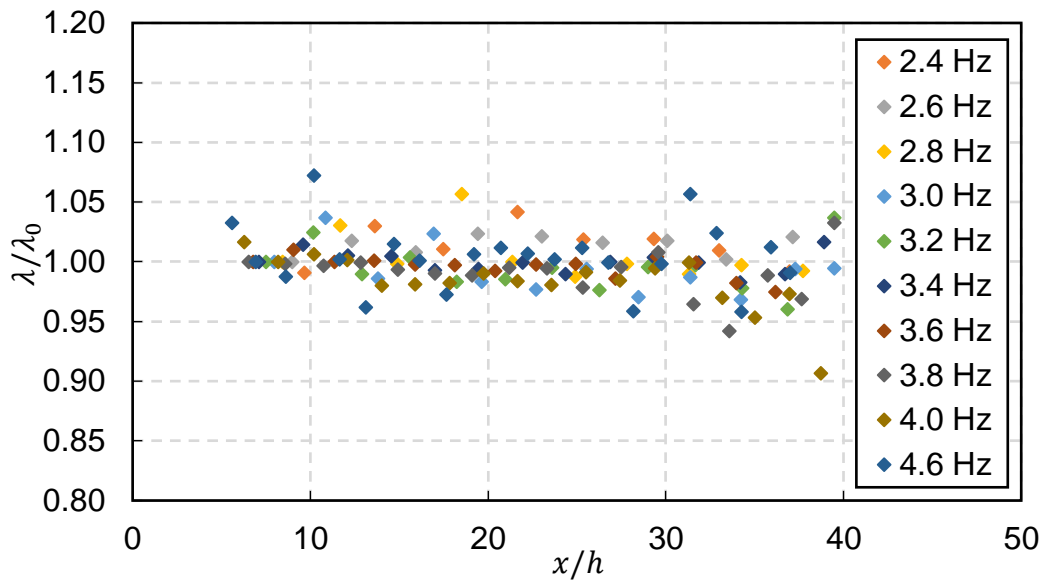


Figura 6.18: Longitud de onda adimensional en función de posición adimensional para experimentos en agua.

Aunque con cierta dispersión, se tiene que los casos newtonianos (Agua y glicerina) presentados en la Figura 6.17 y Figura 6.18 respectivamente, no presentan variación de su longitud de onda a lo largo del canal, puesto que la relación λ/λ_0 se mantiene centrada en 1. A su vez, en la Figura 6.16 se observa que existe una relación lineal entre la frecuencia y la variación de la longitud de onda.

Se espera que la variación de la longitud de onda presentada en la Figura 6.16 sea dependiente tanto de la frecuencia como de la amplitud, de modo que se grafica la relación A/A_0 vs λ/λ_0 para el caso pseudoplástico. Junto con lo anterior, se presenta el comportamiento en agua (Figura 6.20) y en glicerina (Figura 6.21). Para el caso pseudoplástico se realiza un ajuste potencial a los resultados, mientras que para el caso newtoniano, la relación A/A_0 vs λ/λ_0 es constante.

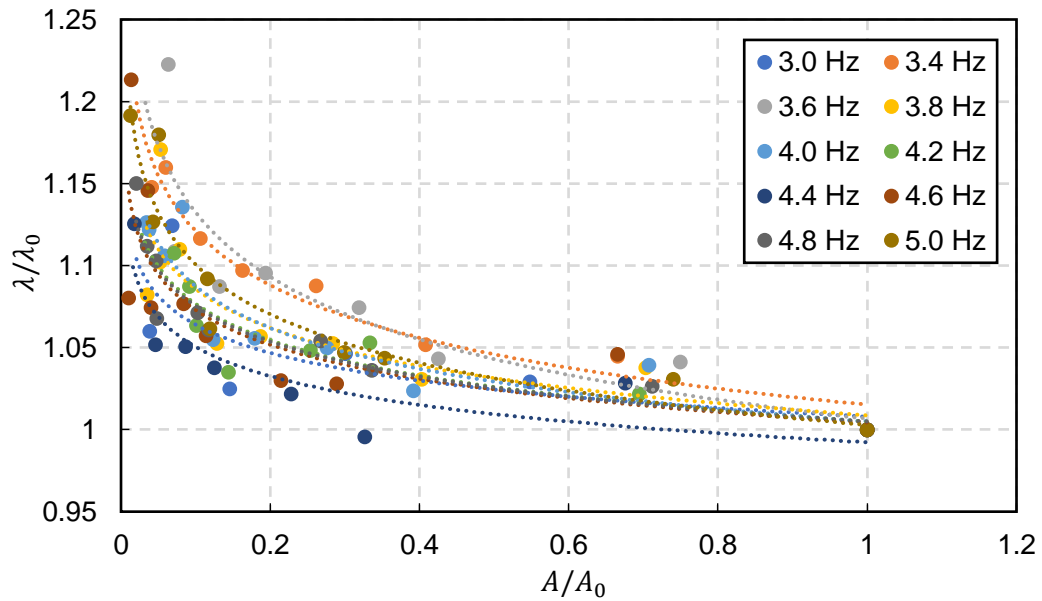


Figura 6.19: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para promedio entre campañas realizadas en goma xanthan.²

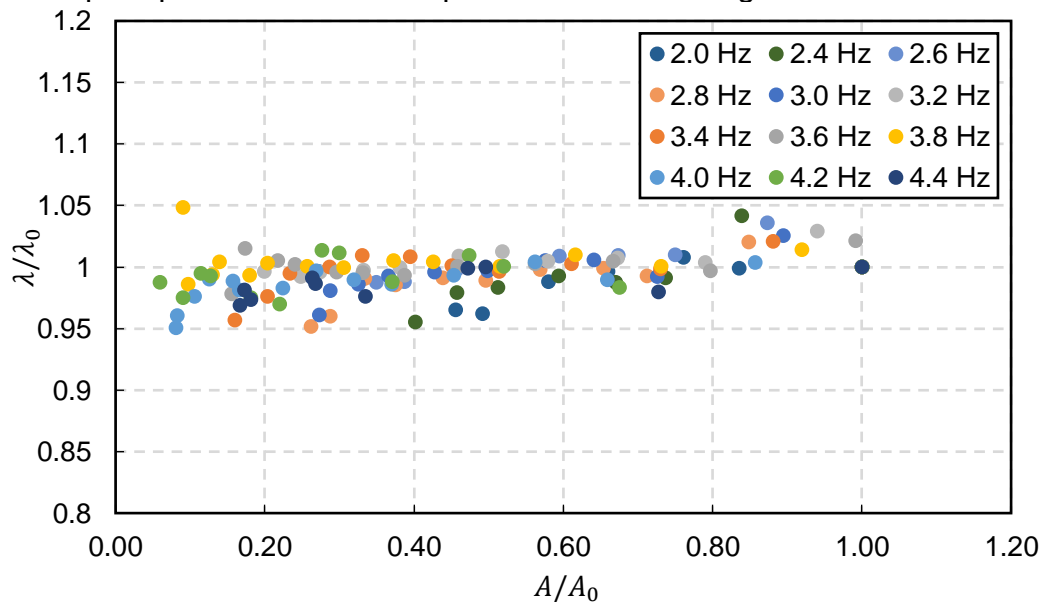


Figura 6.20: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para experimentos realizados en glicerina 70%.

² El resto de gráficos longitud de onda adimensional en función de amplitud adimensional, correspondientes a las 3 campañas de experimentos en goma xanthan se encuentran en el Anexo Longitud de onda adimensional en función de amplitud adimensional

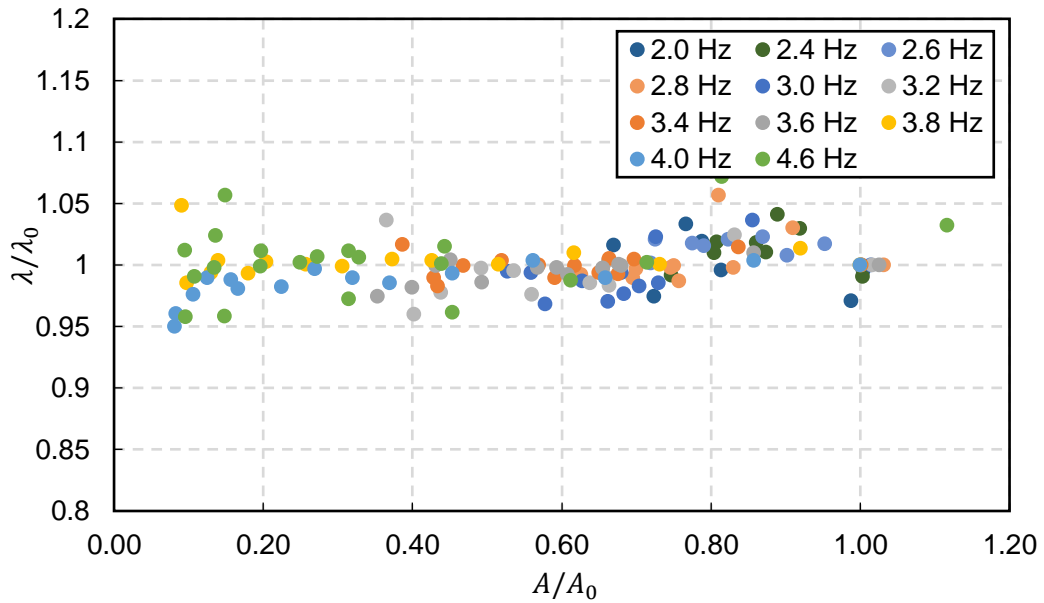


Figura 6.21: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para experimentos realizados en agua.

Dado que la longitud de onda de la onda en goma xanthan varía a lo largo del canal, no es posible comparar directamente con la longitud de onda resultante para agua o glicerina, de modo que considerando el promedio entre las longitudes de onda obtenidas, presentadas en la Figura 6.15, se comparan los resultados experimentales de la variación de la longitud de onda entre el caso invíscido (agua), viscoso (glicerina 70%) y pseudoplástico (goma xanthan) y el valor teórico dado por la relación de dispersión en agua, en función de la frecuencia, para verificar si el valor promedio sigue o no la tendencia respecto al valor esperado para el caso newtoniano. Lo cual se presenta en la Figura 6.22.

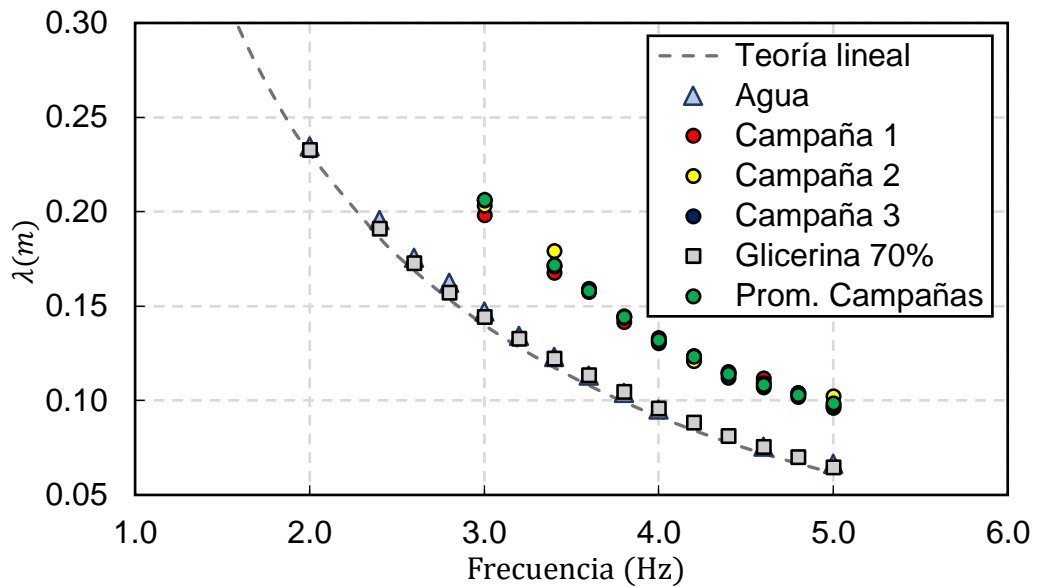


Figura 6.22: Variación de la longitud de onda en función de la frecuencia para agua, glicerina y el promedio entre las campañas realizadas para el caso pseudoplástico.

Los valores promedio de longitud de onda según frecuencia mostrados en la Figura 6.22 se presentan en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: Valores promedio en la longitud de onda para agua, glicerina y campañas en goma xanthan en función de la frecuencia.

Frec (Hz)	Longitud de onda (cm)									
	Agua		Glicerina		Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3			
2.0	23,5	± 0,1	23,29	± 0,08						
2.4	19,6	± 0,1	19,21	± 0,09						
2.6	17,56	± 0,06	17,39	± 0,04						
2.8	16,24	± 0,09	15,77	± 0,04						
3.0	14,71	± 0,08	14,45	± 0,04	19,8	± 0,4	20,3	± 0,5	20,6	± 0,3
3.2	13,42	± 0,05	13,32	± 0,02						
3.4	12,31	± 0,03	12,23	± 0,03	16,8	± 0,3	17,9	± 0,4	17,1	± 0,2
3.6	11,32	± 0,03	11,37	± 0,02			15,9	± 0,3	15,8	± 0,2
3.8	10,42	± 0,04	10,48	± 0,03	14,2	± 0,2	14,5	± 0,2	14,4	± 0,1
4.0	9,55	± 0,02	9,61	± 0,02	13,1	± 0,2	13,3	± 0,1	13,2	± 0,2
4.2			8,85	± 0,03	12,2	± 0,1	12,1	± 0,3	12,4	± 0,1
4.4			8,14	± 0,04	11,5	± 0,1	11,5	± 0,1	11,2	± 0,3
4.6	7,57	± 0,04	9,8	± 0,7	11,2	± 0,3	11,0	± 0,2	10,7	± 0,2
4.8			7,2	± 0,1	10,4	± 0,1	10,4	± 0,1	10,2	± 0,1
5.0	6,65	± 0,07	7,0	± 0,2	9,6	± 0,1	10,3	± 0,2	9,7	± 0,1

Según lo presentado en la Figura 6.22, el valor de la longitud de onda promedio para una frecuencia dada en goma xanthan, sigue una tendencia similar a la dada por el caso invíscido (agua) y viscoso (glicerina), generándose una diferencia de alrededor del 25% entre estos, disminuyendo esta diferencia a medida que aumenta la frecuencia.

7 DISCUSIÓN

7.1 MOVIMIENTO DEL GENERADOR DE ONDAS

Uno de los asuntos más importantes del sistema de movimiento, es asegurar que el movimiento sea consistente en el tiempo, esto es, que la frecuencia y amplitud de carrera de paleta a experimentar sean constantes a lo largo de todo el experimento y entre experimentos. De otro modo, la variación en la longitud de onda no vendría dada por el efecto de la viscosidad propia del fluido, que es lo que se pretende estudiar, sino que por la inconsistencia del movimiento.

En la Figura 4.5 es posible notar que el movimiento real se aproxima de manera consistente al movimiento teórico dado para una amplitud y frecuencia, asegurándonos que no existirán errores asociados al sistema de movimiento. En la Figura A 9.30, correspondiente a una amplitud de carrera de paleta de 3,0 cm y frecuencia de 6,0 Hz, no se observa esto, sino que la amplitud varía en el tiempo, siendo esta una de las razones por las que no se utiliza esta configuración en los experimentos.

Si bien es posible notar que eventualmente el movimiento real discrepa del teórico, se considera que este error es despreciable y poco significativo, puesto que los resultados se presentan como promedios espacio temporales, minimizando la influencia de este tipo de errores.

Con respecto al movimiento vertical, se estima que este es despreciable.

7.2 REOLOGÍA

El comportamiento de las mezclas utilizadas se ve reflejada en su reología, la cual nos da una idea de lo que podríamos esperar para cada experimento. En el caso de la reología del CMC, mostrado en la Figura 5.2, este presenta un comportamiento “no newtoniano” según ley de potencia a partir de una tasa de deformación del orden de 10 s^{-1} para tasas de deformación menores a esta, su comportamiento es lineal, con viscosidad constante, de modo que en este rango se comporta como newtoniano.

En cambio, para mezclas realizadas con goma xanthan a un 0,58% peso/peso, como se muestra en la Figura 6.4, es posible notar que esta presenta un comportamiento no newtoniano según ley de potencia a partir para tasas de deformación del orden de $0,1\text{ s}^{-1}$, Para los experimentos a realizar se esperan tasas de deformación entre $0,4$ y 5 s^{-1} , de modo que, de acuerdo a lo observado en la reología, la mezcla debiese comportarse como un fluido no newtoniano para todas las configuraciones de amplitud y frecuencias contempladas en las campañas de experimentos.

A muy bajas tasas de deformación (inferiores a $0,01$ ($1/s$)), el reómetro deja de ser un instrumento válido debido a su precisión. En la Figura A 9.36 se muestra el comportamiento del reómetro a bajas tasas de deformación para una mezcla de goma xanthan y agua.

7.3 EFECTO DE LA VISCOSIDAD SOBRE LA AMPLITUD

De acuerdo a lo observado en la Figura 6.12, la amplitud de la onda presenta un decaimiento exponencial en función de su posición en el canal. El coeficiente de atenuación con el cual la onda disminuye su amplitud está determinado por la frecuencia aplicada sobre la mezcla, de modo que, a mayores frecuencias, el coeficiente de atenuación es mayor, tanto para el caso pseudoplástico (goma xanthan), como para el caso viscoso (glicerina) y el caso invíscido (agua).

Tanto para el agua como para la glicerina, los resultados experimentales son consistentes con el valor teórico dado por la relación de dispersión, como se muestra en la Figura 6.13, siendo la atenuación del caso viscoso mucho mayor que la del caso invíscido.

El coeficiente de atenuación para el caso pseudoplástico mostrado en la Figura 6.13 puede ser descrito a partir de 3 zonas de interés, la primera, correspondiente a la frecuencia de $3,0$ Hz, la segunda entre $3,4$ y $4,6$ Hz y la tercera entre $4,6$ y $5,0$ Hz. En la primera zona es posible notar una dispersión en el valor del coeficiente de atenuación, lo cual viene dado principalmente por la dispersión de los datos obtenidos en esta frecuencia. La segunda zona corresponde a una zona cuyos valores se mantienen relativamente estables, siguiendo una tendencia similar a la presentada para el caso invíscido y viscoso, pero desplazada en la vertical. Finalmente, la tercera zona, corresponde a las mayores frecuencias y se estima que la dispersión en estos valores corresponde principalmente a un factor experimental, en donde a altas frecuencias se tiene que la mezcla comienza a salpicar, siendo difícil mantener una condición permanente que permita reducir la dispersión de los datos.

A partir de lo anterior, se tiene que el coeficiente de atenuación para el caso pseudoplástico sigue una tendencia similar a la expuesta para el caso invíscido y viscoso, pero desplazada en la vertical debido a la alta viscosidad de la mezcla. A su vez, se tiene que esta depende únicamente de la frecuencia y no de la posición en el canal.

Sin embargo, no se descarta completamente el efecto que pueda tener la posición en el canal sobre el coeficiente de atenuación, puesto que este puede presentar un efecto sutil que no haya sido identificado debido a la dispersión de los datos.

7.4 EFECTO DE LA VISCOSIDAD SOBRE LONGITUD DE ONDA

En la Figura 6.15 se muestra la longitud de onda promedio entre campañas en goma xanthan en función de la posición adimensional en el canal y la frecuencia aplicada sobre la mezcla. Se observa que existe una disminución general de la longitud de onda en función de la frecuencia, de modo que, a mayor frecuencia, menor es la longitud de onda, lo cual se condice con lo establecido para el caso invíscido. Junto con lo anterior, se tiene que existe una variación local de la longitud de onda en función de la posición en el canal, de modo que a mayor distancia se encuentre la onda respecto al origen de la perturbación, mayor será su longitud de onda respecto a la longitud de onda inicial, lo cual, según se muestra en las figuras 6.17 y 6.18 no sucede para el caso newtoniano, puesto que la relación λ/λ_0 se mantiene, con cierta dispersión de los datos, constante y en torno a 1. Lo anterior implica que no existe variación de la longitud de onda en función de la posición para el caso newtoniano invíscido ni newtoniano viscoso. Ahora bien, existe la posibilidad de que efectivamente exista variación mínima para estos casos, pero que la dispersión de los datos sea superior a la variación misma, de modo que esta no se aprecia.

En la Figura 6.16 se muestra un ajuste lineal de la longitud de onda adimensional a lo largo del canal, en donde se observa que existe una relación lineal entre la frecuencia y la variación de la longitud de onda, de modo que a mayor frecuencia, mayor es la diferencia entre la longitud de onda inicial y final. Sin embargo, no se obtuvo una relación consistente entre campañas, de modo que existe gran dispersión en los datos, lo cual hace pensar que la frecuencia no es la única variable importante en la variación de la longitud de onda. Para clarificar lo anterior, se grafica la longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional, como se muestra en la Figura 6.19. En esta, se tiene que existe una relación ajustada mediante una regresión potencial entre la amplitud y la longitud de onda, mientras que para el caso invíscido (Figura 6.20) y viscoso (Figura 6.21), esta permanece relativamente constante y centrada en 1. Ante lo anterior, se presume que, producto de la disminución en la amplitud de la onda, existe una variación en la tasa de deformación de la onda a lo largo del canal, lo cual implica una variación en su viscosidad de acuerdo a una ley potencial, lo cual se traduce en una variación en la longitud de onda.

Finalmente, en la Figura 6.22 se muestran las longitudes de onda promedio en función de la frecuencia para los experimentos en agua, glicerina y goma xanthan. En esta, se observa que tanto la longitud de onda en agua como en glicerina se ajustan al comportamiento teórico dado por la relación de dispersión para el caso invíscido, mientras que el caso pseudoplástico se encuentra desplazado con respecto a estos, presentando una mayor longitud de onda que el agua o glicerina a una misma frecuencia. Lo anterior, se asocia inicialmente a la existencia de una diferencia en la viscosidad entre las mezclas, puesto que cada fluido presenta una tendencia similar, pero desplazado, del valor teórico.

7.5 EFECTO DE LA VISCOSIDAD SOBRE LA CELERIDAD

En la Figura 6.14 se presenta la variación de la celeridad adimensional promedio en función de la longitud de onda adimensional promedio para agua, glicerina, las 3 campañas de experimentos en goma xanthan, y el resultado teórico dado por la relación de dispersión en agua.

Se tiene que tanto el agua como la glicerina siguen el mismo comportamiento que la predicción teórica, dada por la relación de dispersión, mientras que el caso pseudoplástico se encuentra desplazado en la vertical, con un ligero cambio de pendiente respecto al caso teórico, de modo que la celeridad en el caso pseudoplástico, para la concentración utilizada, es mayor que para el agua o glicerina a una misma frecuencia. Se estima que la diferencia existente tiene su origen en la diferencia de viscosidades entre las mezclas, de modo que la perturbación se propaga más rápidamente en fluidos más viscosos.

Saasen et al, en 1993, compararon la celeridad de onda en 6 diferentes fluidos pseudoplásticos y la compararon con el comportamiento invíscido. En esta, se mostró que el comportamiento pseudoplástico se ajustaba al comportamiento invíscido para un rango de tasas de deformación entre $0,1$ y 100 s^{-1} e índices de consistencia entre $0,1$ y $1,3$ (Pa s^n). Sin embargo, a partir de lo obtenido en el presente estudio, se observa que existe una diferencia para la solución de goma xanthan en agua, la cual presenta un índice de consistencia entre 5 y 6 , mucho mayor a las usadas por Saasen, de modo que se asocia este resultado a la diferencia entre viscosidades.

8 CONCLUSIÓN

Con respecto al movimiento del generador de ondas, se tiene que, para las amplitudes de carrera de paleta y frecuencias utilizadas en las campañas, el movimiento describe una sinusoidal para cada uno de los casos, de modo que cualquier variación será efecto del comportamiento propio de la mezcla y no de un movimiento errático.

Si bien se consideraron diferentes sustancias y concentraciones en la elaboración de mezclas de fluido para realizar los experimentos, es posible que la concentración utilizada no sea la óptima para otros rangos de frecuencia y amplitud, de modo que, si se desean ampliar estos rangos, es necesario buscar otras concentraciones que maximicen el número de longitudes de onda a observar.

La amplitud de la onda superficial presenta un decaimiento exponencial, el cual está relacionado directamente con la frecuencia aplicada sobre la mezcla. Si bien, la magnitud del decaimiento en una misma mezcla varía en función de la frecuencia, este también varía en función de la viscosidad de la mezcla, de modo que, a mayor viscosidad y frecuencia, mayor coeficiente de atenuación. Ante lo anterior, se tiene que la atenuación resultó ser más significativa en el caso pseudoplástico, que en el caso invíscido o viscoso.

Para los fluidos no-newtonianos ensayados la longitud de onda disminuye a medida que se aumenta la frecuencia a la que se somete a la mezcla y aumenta a medida que esta se propaga a lo largo del canal, mientras que, para el caso newtoniano, ésta se mantiene invariante. Se determina que la variación de la longitud de onda a lo largo del canal presenta una doble dependencia con respecto a la frecuencia aplicada sobre la mezcla y la amplitud de la onda, de modo que existe una relación potencial entre la longitud de onda y la amplitud de esta. Lo anterior implica que, producto de la variación de la amplitud de la onda a lo largo del canal, existe una variación en la viscosidad de la mezcla, generando un cambio en la longitud de la onda.

La celeridad disminuye con la frecuencia, de modo que esta sigue una tendencia similar a la dada para el caso invíscido y viscoso presentadas en la Figura 6.12. La diferencia se asocia principalmente a la diferencia en la viscosidad entre las diferentes mezclas.

Con respecto al desarrollo experimental, se tiene que uno de los principales problemas corresponde a la dispersión de los datos, lo cual obliga a filtrar resultados, principalmente en las zonas más alejadas del origen de la perturbación. Lo anterior, producto de complicaciones con la instalación experimental, como lo es la existencia de zonas con mayor iluminación producto de la disposición del proyector, que finalmente se traducen en una distorsión en la amplitud registrada.

Como recomendaciones para un trabajo experimental futuro se plantea el de variar la altura en reposo de la mezcla para aplicar frecuencias mayores, teniendo especial cuidado de que será necesaria una instalación que evite el rebase de la mezcla. A su vez, variar la concentración de mezcla y experimentar con diferentes tipos de fluidos no newtonianos. A su vez, se requiere buscar alternativas de mezcla o metodologías que permitan determinar las tasas de deformación efectivas sobre la mezcla a lo largo del canal.

Puesto que el desarrollo experimental consideró un rango acotado de frecuencias (3.0 a 5.0 Hz), se propone el desarrollo de un modelo numérico que replique las configuraciones de amplitud de paleta y frecuencia calibrado a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, y que permita evaluar el efecto de la viscosidad variable para un mayor espectro de amplitudes y frecuencias.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Allouche, M., Botton, V., Henry, D., Millet, S., Usha, R., Ben Hadid, H. (2014). Experimental determination of the viscosity at very low shear rate for shear thinning fluids by electrocapillarity. *Journal of Non-Newtonian fluids mechanics* 215, 60-69.
- [2] Antosik, A., Gluszek, M., Zurowski, R., Szafran, M. (2017). Influence of carrier fluid on the electrokinetic and rheological properties of shear thickening fluids. *Ceramics international*. Volume 43, issue 15, pages 12293-12301.
- [3] Barnes, H, Hutton, F, Walters, K. (1989). *An introduction to rheology*. Elsevier Science publishers, 1st edition.
- [4] Barnes, H., (1989). ShearThickening (“Dilatancy”) in suspensions of Nonaggregating solid particles dispersed in newtonian liquids. *Journal of Rheology*, Vol.33, issue 2, p.329.
- [5] Benchabane, A, & Bekkour, K. (2008). Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. *Colloid polym Sci* 286-1173-1180.
- [6] Biasseti, J, Auer, M, Gasser, T, Hedin, U. (2010). Hemodynamics of the Normal Aorta Compared to Fusiform and Saccular Abdominal Aortic Aneurysms with Emphasis on a Potencial Thrombus Formation Mechanism. *Annals of Biomedical Engineering* 38(2), 380-390.
- [7] Calvo, C. (2018), Estudio teórico, experimental y numérico de ondas superficiales de gravedad en fluidos no newtonianos. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- [8] Cobelli, P.J., A. Maurel, V. Pagneux, y P. Petitjeans. (2009). “Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry”. *Experiments in fluids*, 46(6), 1037-1047.
- [9] Cochard, S, & Ancey, C,. (2007). Tracking the free surface of time-dependent flows: image processing for the dam-break problem. *Exp. Fluids* 44:59-71
- [10] Deshpande, A., Krishnan, J., Kumar, P. (2010). *Rheology of complex fluids*, Indian institute of Technology Madras, Springer.
- [11] Eliades, T, Zinelis, S, Kim, D, Brantley, W (2017). Structure/property relationships in orthodontic polymers, *Orthodontic applications of biomaterials*, pp. 39-59.

- [12] Escudier, M., Gouldson, I., Pereira, A., Pinho, E., Poole, R., (2001). On the reproductibility of the rheology of shear-thinning liquids. *Journal of Non-Newtonian fluids Mechanics*. 97, 99-124.
- [13] Fritz, K, (1997). *Oscillations and waves*. Springer 1st edition.
- [14] Garcés, A (2017). Características de formas de fondo generadas en un ducto a presión debido al flujo en régimen laminar de un fluido pseudoplástico. Memoria para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio ambiente hídrico. Departamento de Ingeniería Civil.
- [15] Siginer, D,A, De Kee, D., Chhabra, R, P. (1999). *Advances in the Flow and Rheology of Non-Newtonian Fluids*. Volume 8, 1st edition, Elsevier Science.
- [16] Kakutani, T. & Matsuuchi, K. (1975). Effect of viscosity on long gravity waves. *Journal of the physical society of Japan*, Vol.39, No.°1, 237-246.
- [17] Przadka, A., Cabane, B., Pagneux, V., Maurel, A., & Petitjeans, P. (2012). Fourier transform profilometry for water waves: how to achieve clean water attenuation with diffusive reflection at the water surface? *Experiments in fluids*, 52(2), 519–527.
- [19] Saasen, A., Kurzhals, E., Halsey, G. (1993). Surface gravity wave experiments on shear-thinning fluids. *Fluid dynamics research* 12, 49-53.
- [20] Song, K,. Kim, Y,. Chang, G. (2006). Rheology of concentrated xanthan gum solutions: steady shear flow behavior. *Fibers and polymers*, vol 7, No.2, pages 129-138.
- [21] Takeda, M and Mutoh, K. (1983). Fourier Transform Profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied optics*, volume 22, pages 3977-3982.
- [22] Zhang, L,. che, L,. Zhou, W,. Dong, X,. (2012). Rheological beavior of Agar solution in relation to the making of instant edible bird's nest products. *International journal of food engineering*, Volume 8, issue 3, Article 10. DOI: 10.1515/1556-3758.10.
- [23] Zhang, X., Li, W., Gong,X. (2008). The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper. *Smart materials and structures*. 17, 035027 (7pp).

ANEXOS

A.1 SISTEMA DE MOVIMIENTO

A.1.1 VERIFICACIÓN AMPLITUD DE MOVIMIENTO

Tabla A 9.1: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 1,0 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.

	1 hz			2 hz			3 hz			4 hz			5 hz			6 hz		
	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real
1	7,42	8,45	1,03	7,40	8,40	1,00	7,40	8,38	0,98	7,40	8,38	0,98	7,40	8,35	0,95	7,38	8,30	0,92
2	7,45	8,45	1,00	7,40	8,40	1,00	7,38	8,38	1,00	7,42	8,35	0,93	7,35	8,35	1,00	7,35	8,33	0,98
3	7,45	8,45	1,00	7,40	8,40	1,00	7,40	8,38	0,98	7,40	8,35	0,95	7,40	8,35	0,95	7,35	8,33	0,98
4				7,40	8,40	1,00	7,40	8,38	0,98	7,40	8,35	0,95	7,40	8,33	0,93	7,38	8,33	0,95
5				7,42	8,40	0,98	7,40	8,40	1,00	7,42	8,40	0,98	7,40	8,38	0,98	7,35	8,40	1,05

Tabla A 9.2: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 1,5 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.

	1 hz			2 hz			3 hz			4 hz			5 hz			6 hz		
	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real
1	6,85	8,40	1,55	6,85	8,40	1,55	6,85	8,35	1,50	6,88	8,32	1,44	6,78	8,35	1,57	6,85	8,40	1,55
2	6,85	8,40	1,55	6,85	8,40	1,55	6,85	8,35	1,50	6,85	8,35	1,50	6,80	8,35	1,55	6,80	8,38	1,58
3	6,85	8,40	1,55	6,85	8,40	1,55	6,85	8,35	1,50	6,82	8,30	1,48	6,80	8,30	1,50	6,75	8,40	1,65
4				6,85	8,40	1,55	6,85	8,35	1,50	6,85	8,35	1,50	6,85	8,30	1,45	6,82	8,40	1,58
5				6,85	8,40	1,55	6,88	8,35	1,47	6,85	8,32	1,47	6,80	8,35	1,55	6,82	8,35	1,53

Tabla A 9.3: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 2,0 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.

	1 hz			2 hz			3 hz			4 hz			5 hz			6 hz		
	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real
1	6,35	8,40	2,05	6,35	8,38	2,03	6,35	8,35	2,00	6,35	8,35	2,00	6,38	8,40	2,02	6,20	8,40	2,20
2	6,35	8,40	2,05	6,35	8,38	2,03	6,38	8,38	2,00	6,35	8,32	1,97	6,38	8,40	2,02	6,28	8,30	2,02
3	6,35	8,40	2,05	6,35	8,40	2,05	6,40	8,35	1,95	6,38	8,35	1,97	6,40	8,45	2,05	6,25	8,30	2,05
4				6,35	8,38	2,03	6,35	8,35	2,00	6,32	8,35	2,03	6,40	8,40	2,00	6,30	8,25	1,95
5				6,35	8,40	2,05	6,38	8,35	1,97	6,35	8,33	1,98	6,40	8,40	2,00	6,25	8,40	2,15

Tabla A 9.4: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 2,5 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.

	1 hz			2 hz			3 hz			4 hz			5 hz			6 hz		
	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real
1	5,85	8,45	2,60	5,85	8,40	2,55	5,85	8,35	2,50	5,90	8,40	2,50	5,80	8,40	2,60	6,05	8,15	2,10
2	5,85	8,45	2,60	5,85	8,40	2,55	5,85	8,35	2,50	5,80	8,40	2,60	5,80	8,40	2,60	5,95	8,25	2,30
3	5,85	8,45	2,60	5,85	8,40	2,55	5,85	8,35	2,50	5,85	8,40	2,55	5,78	8,45	2,67	5,90	8,50	2,60
4	5,85	8,45	2,60	5,85	8,40	2,55	5,85	8,35	2,50	5,85	8,40	2,55	5,80	8,45	2,65	5,85	8,35	2,50
5				5,85	8,40	2,55	5,85	8,35	2,50	5,85	8,40	2,55	5,85	8,40	2,55	6,10	8,30	2,20

Tabla A 9.5: Set de amplitudes reales para amplitud teórica de 3,0 cm y frecuencia de 1 a 6 Hz.

	1 hz			2 hz			3 hz			4 hz			5 hz			6 hz		
	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real	Min. Amp	Max. Amp	Amp. Real
1	5,38	8,45	3,07	5,36	8,42	3,06	5,40	8,38	2,98	5,40	8,45	3,05	5,15	8,50	3,35	5,50	8,00	2,50
2	5,35	8,45	3,10	5,37	8,40	3,03	5,38	8,35	2,97	5,35	8,40	3,05	5,20	8,55	3,35	5,30	8,25	2,95
3	5,38	8,45	3,07	5,35	8,40	3,05	5,35	8,38	3,03	5,33	8,48	3,15	5,30	8,50	3,20	5,80	8,30	2,50
4				5,33	8,40	3,07	5,35	8,35	3,00	5,40	8,35	2,95	5,15	8,60	3,45	5,70	8,20	2,50
5				5,35	8,40	3,05	5,35	8,35	3,00	5,40	8,40	3,00	5,35	8,40	3,05	5,55	7,85	2,30

A.1.2 MOVIMIENTO SINUSOIDAL

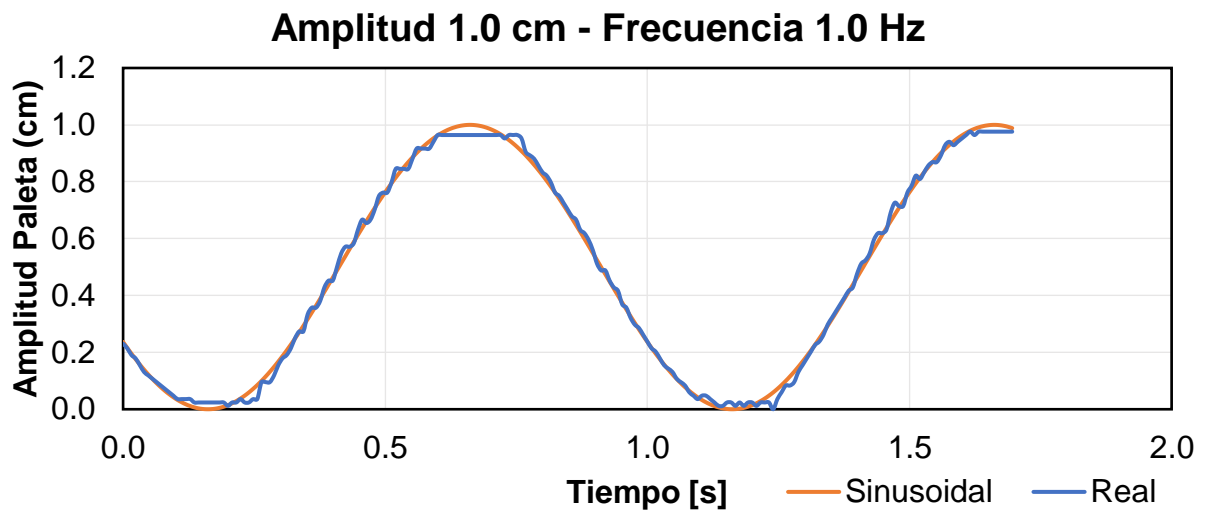


Figura A 9.1: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).

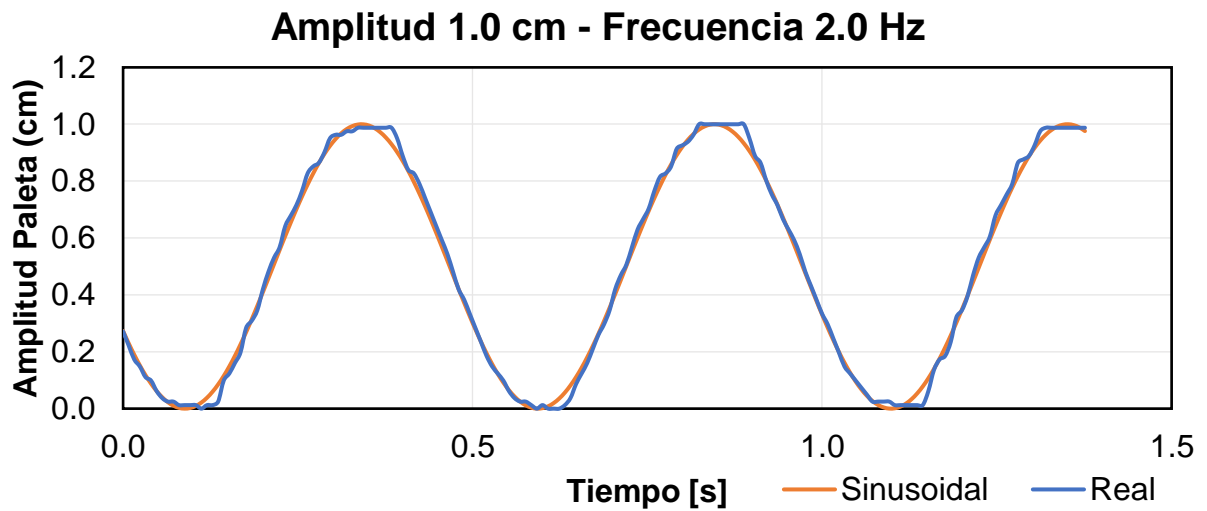


Figura A 9.2: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).

Amplitud 1.0 cm - Frecuencia 3.0 Hz

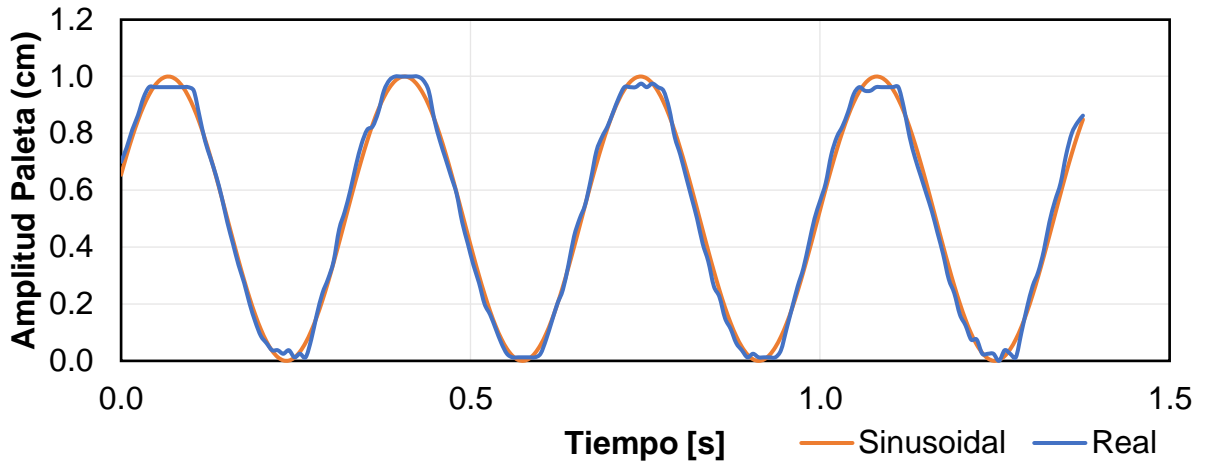


Figura A 9.3: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).

Amplitud 1.0 cm - Frecuencia 4.0 Hz

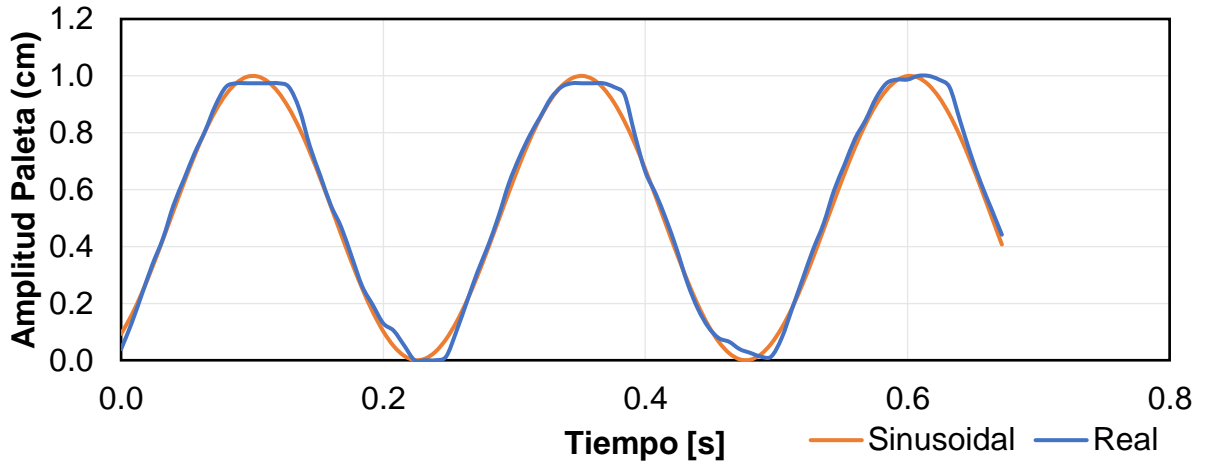


Figura A 9.4: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

Amplitud 1.0 cm - Frecuencia 5.0 Hz

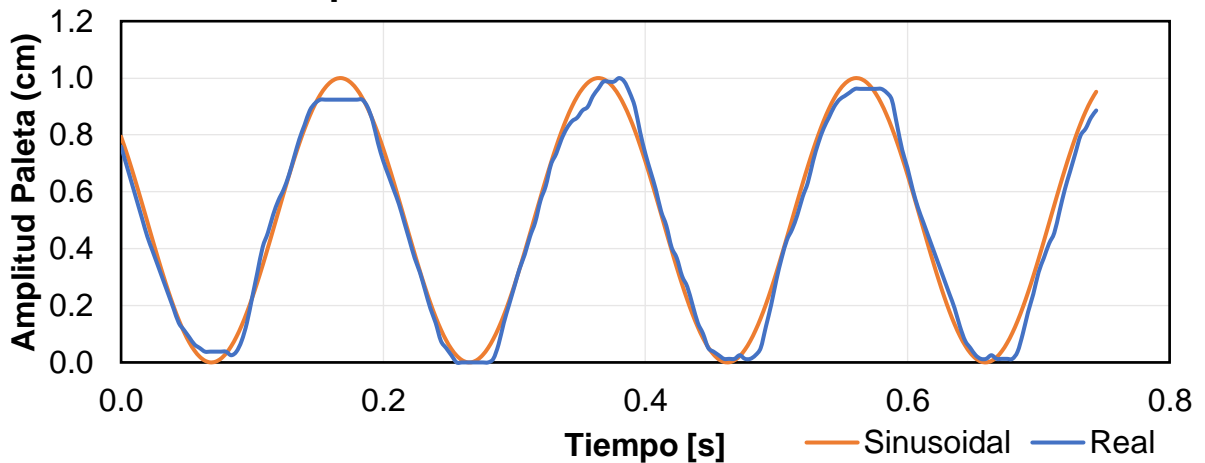


Figura A 9.5: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).

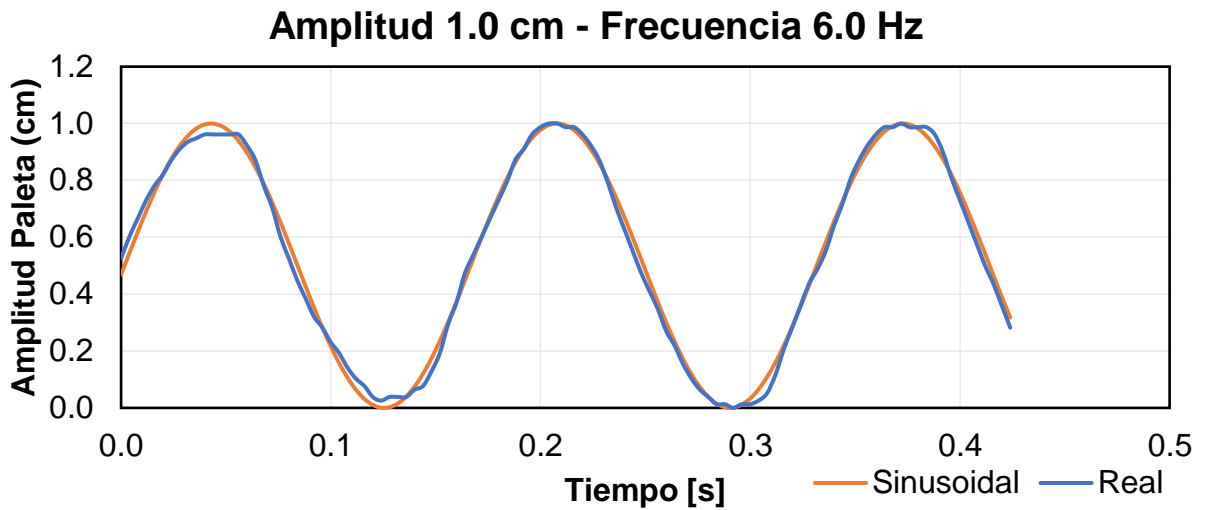


Figura A 9.6: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,0 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).

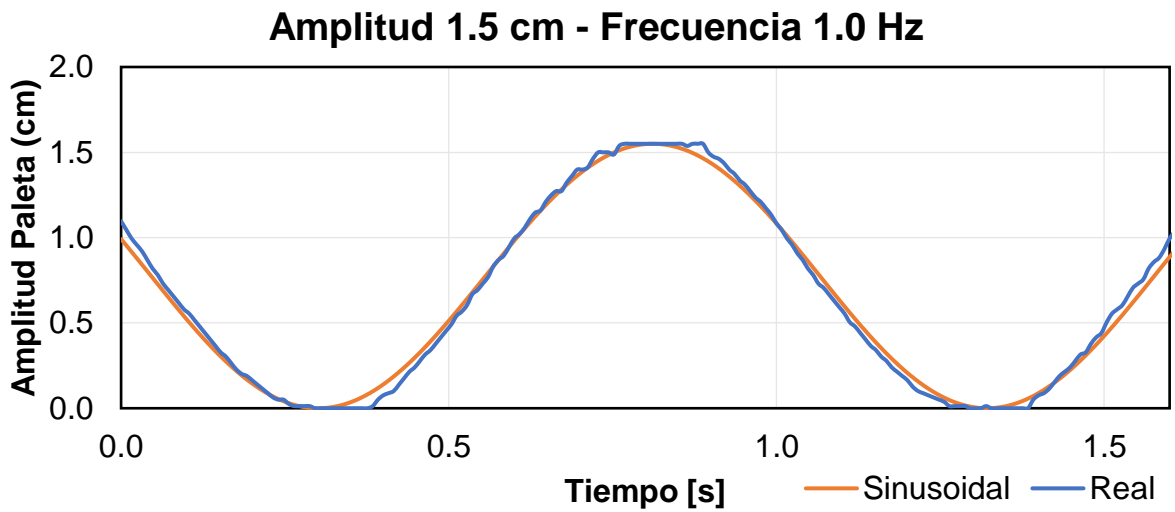


Figura A 9.7: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).

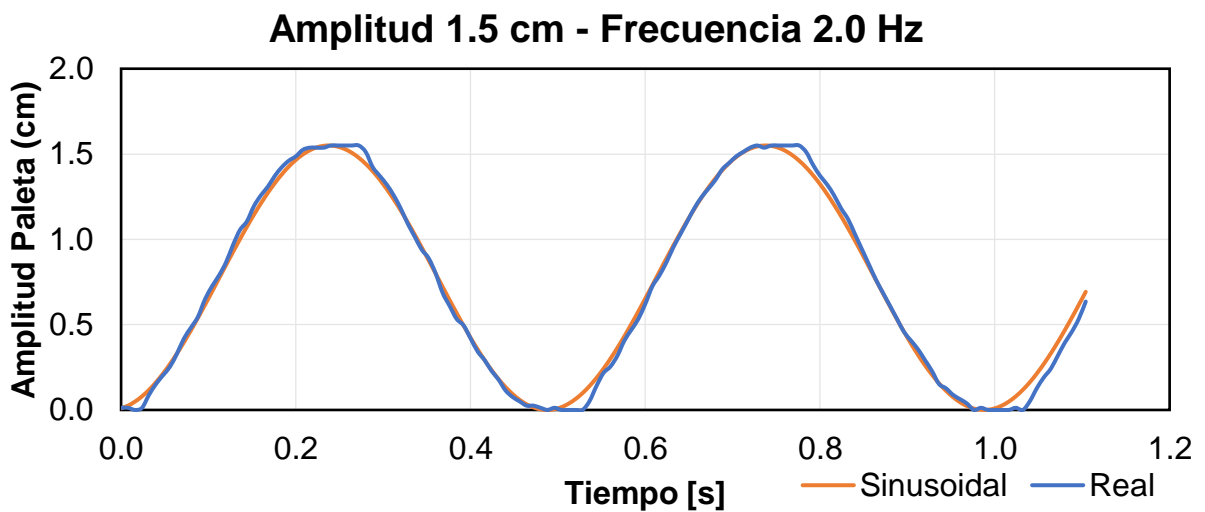


Figura A 9.8: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).

Amplitud 1.5 cm - Frecuencia 3.0 Hz

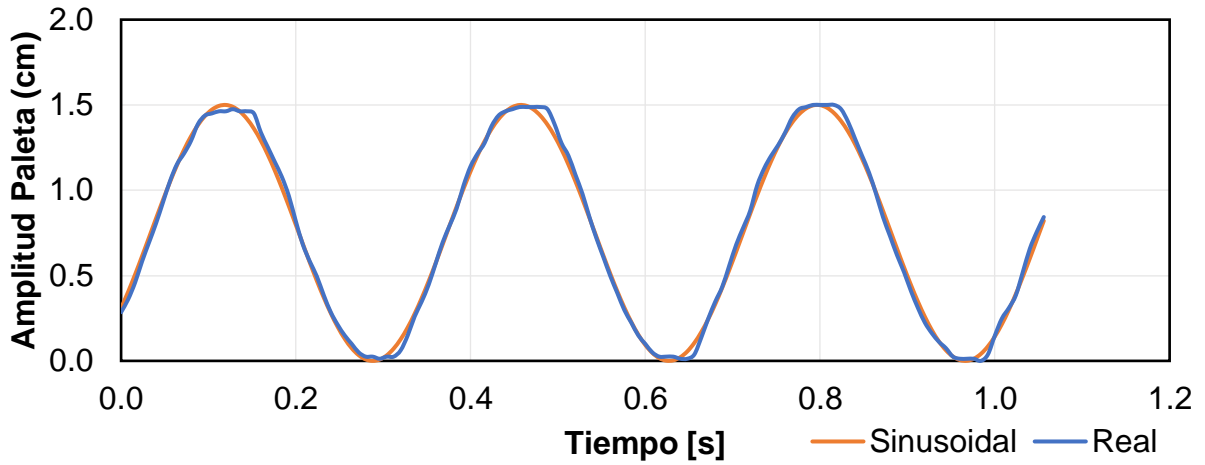


Figura A 9.9: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).

Amplitud 1.5 cm - Frecuencia 4.0 Hz

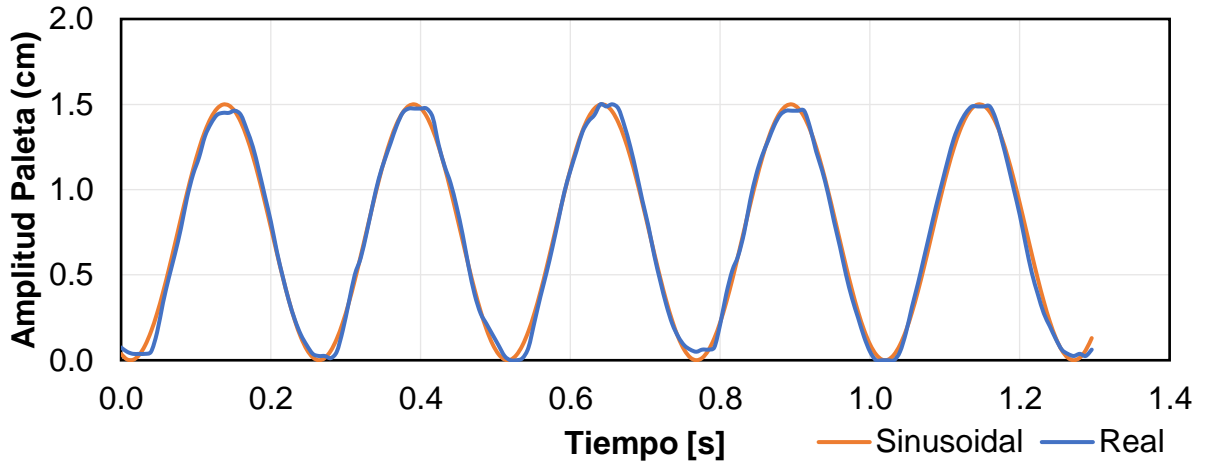


Figura A 9.10: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

Amplitud 1.5 cm - Frecuencia 5.0 Hz

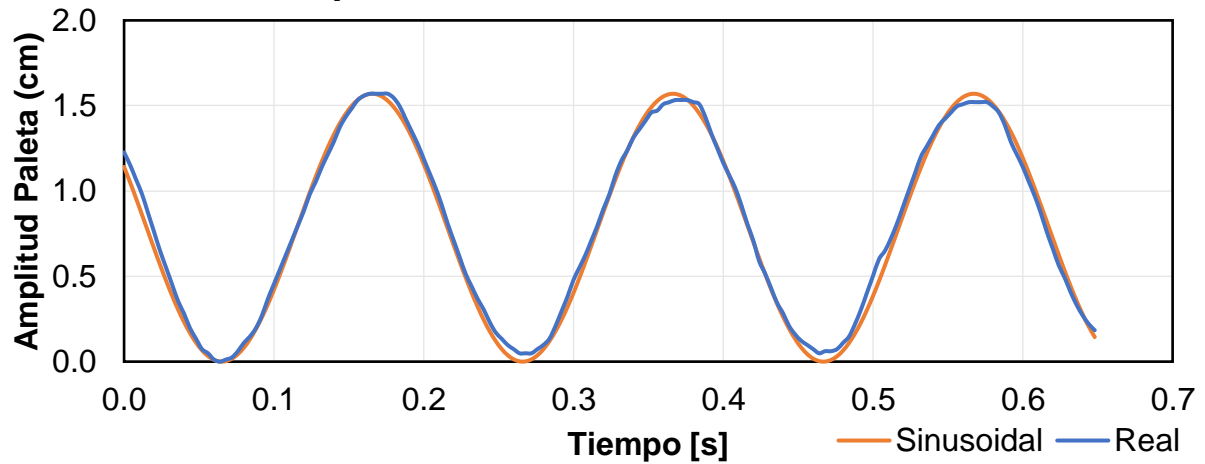


Figura A 9.11: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).

Amplitud 1.5 cm - Frecuencia 6.0 Hz

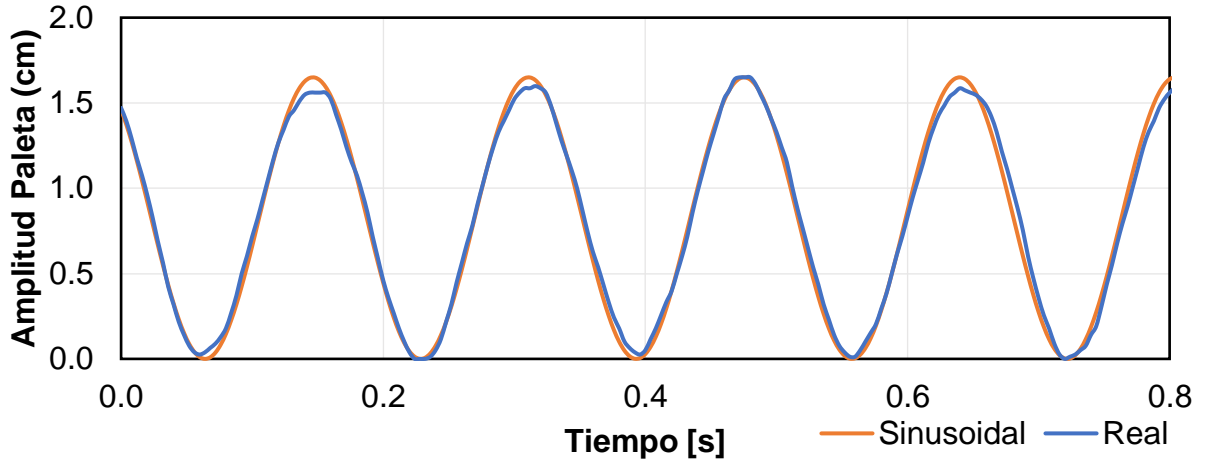


Figura A 9.12: Movimiento sinusoidal para amplitud 1,5 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).

Amplitud 2.0 cm - Frecuencia 1.0 Hz

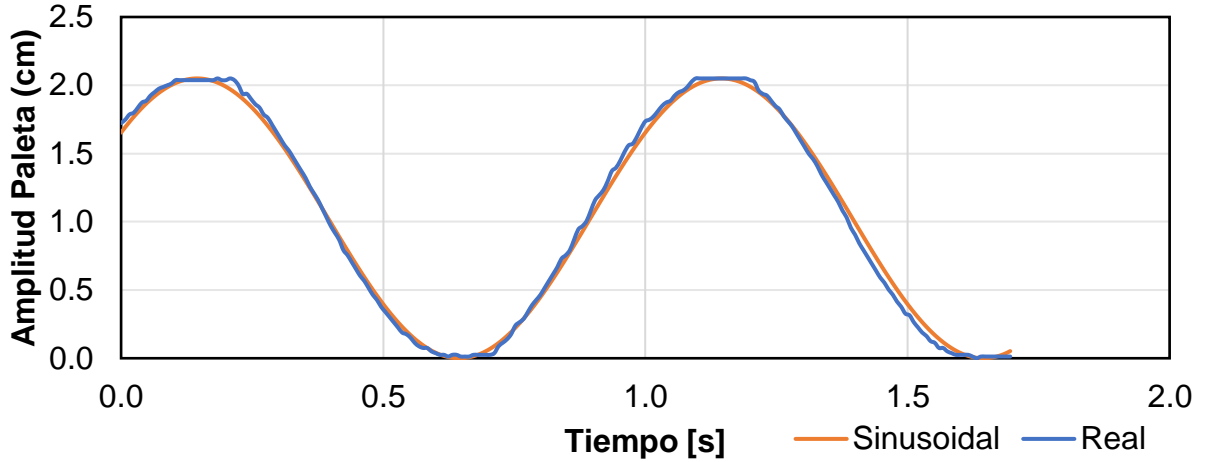


Figura A 9.13: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).

Amplitud 2.0 cm - Frecuencia 2.0 Hz

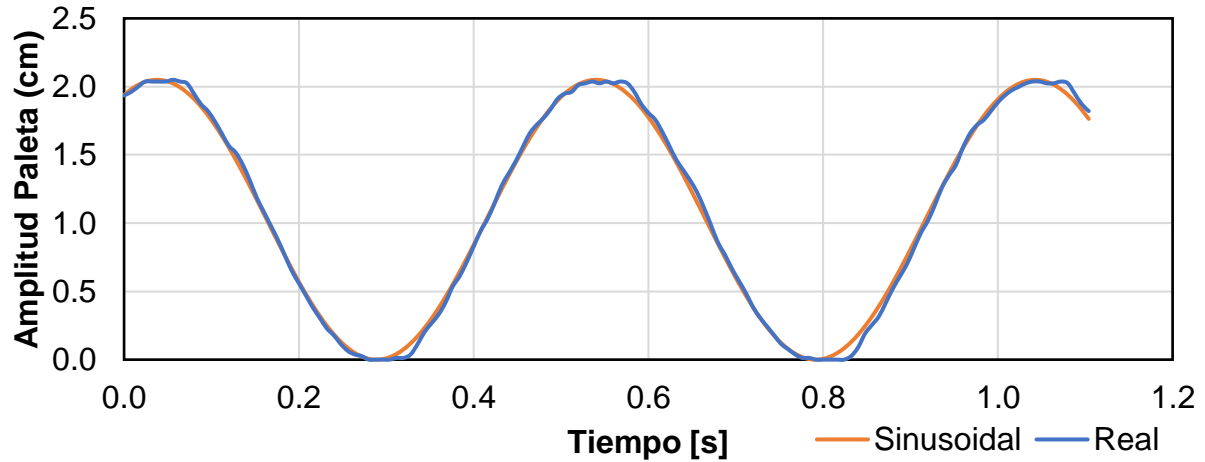


Figura A 9.14: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).

Amplitud 2.0 cm - Frecuencia 3.0 Hz

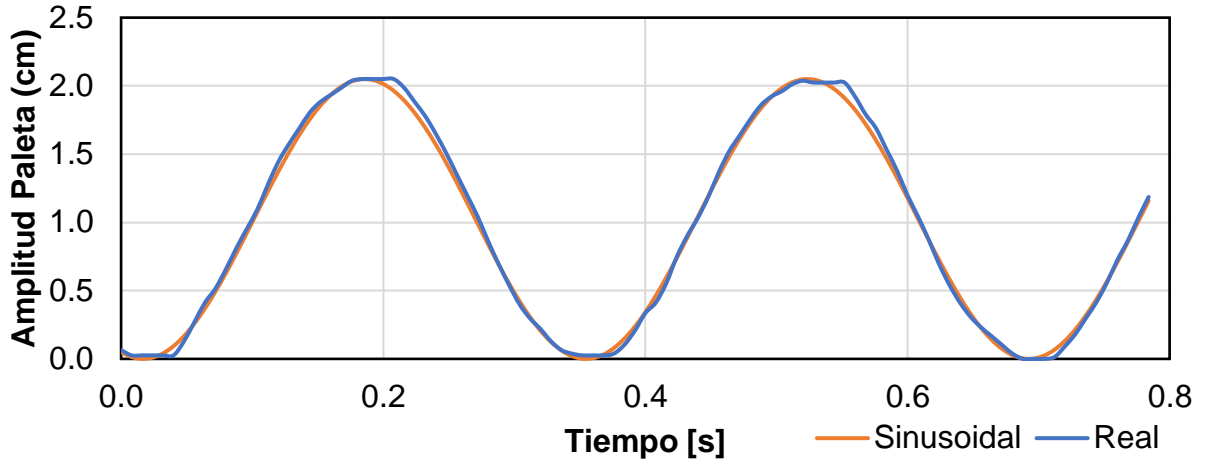


Figura A 9.15: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).

Amplitud 2.0 cm - Frecuencia 4.0 Hz

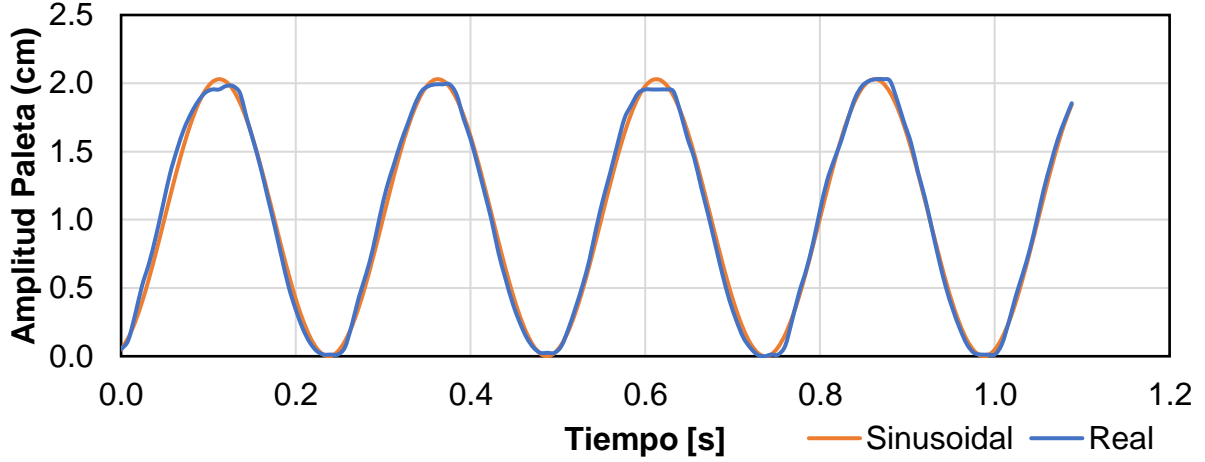


Figura A 9.16: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

Amplitud 2.0 cm - Frecuencia 5.0 Hz

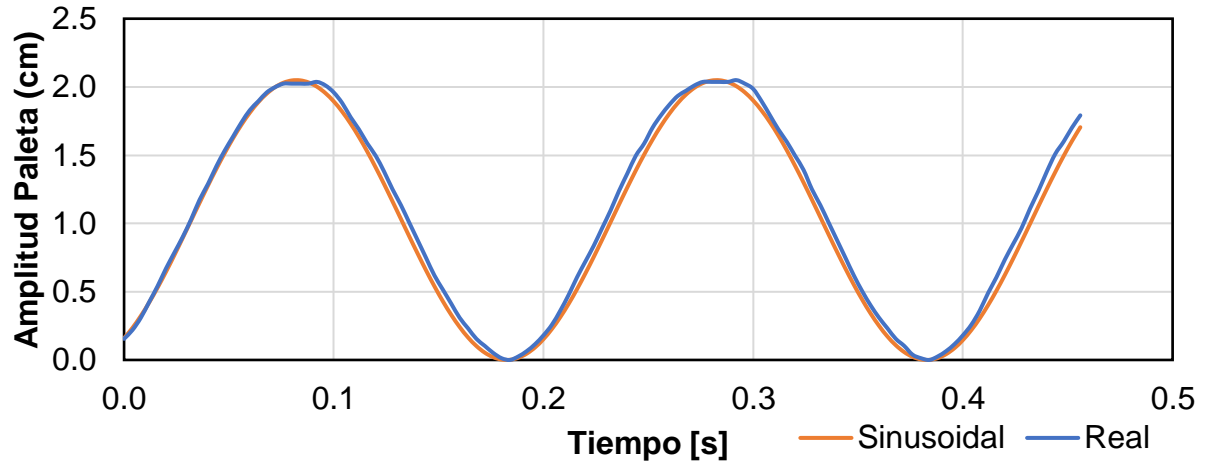


Figura A 9.17: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).

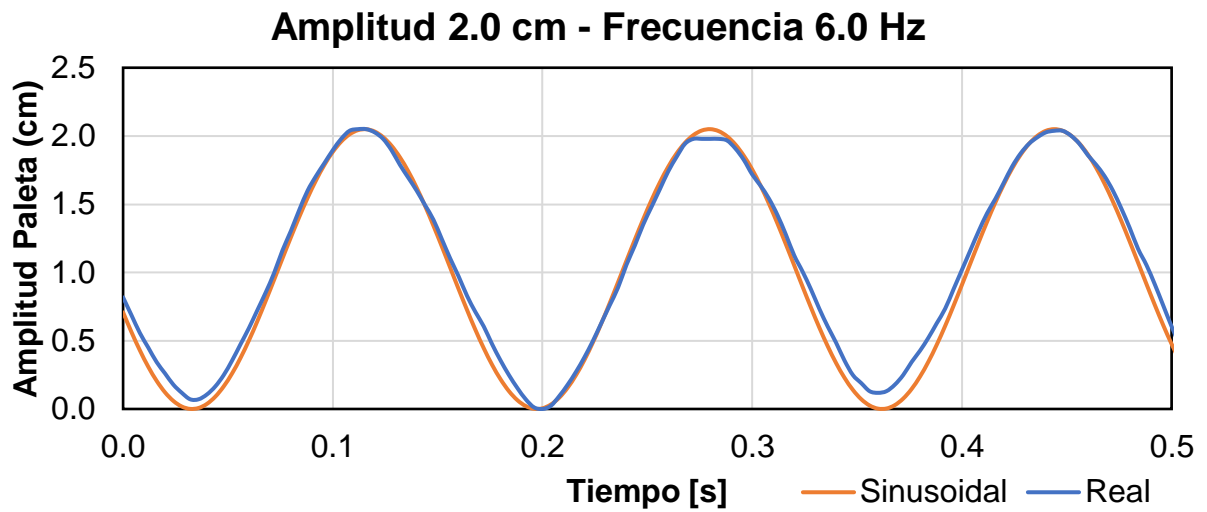


Figura A 9.18: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,0 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).

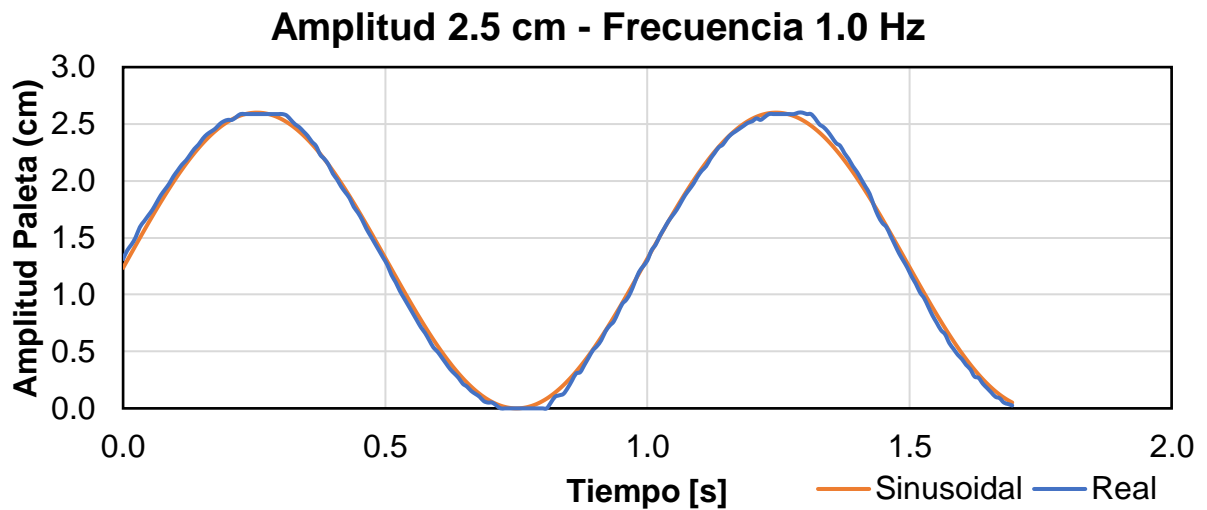


Figura A 9.19: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).

Amplitud 2.5 cm - Frecuencia 2.0 Hz

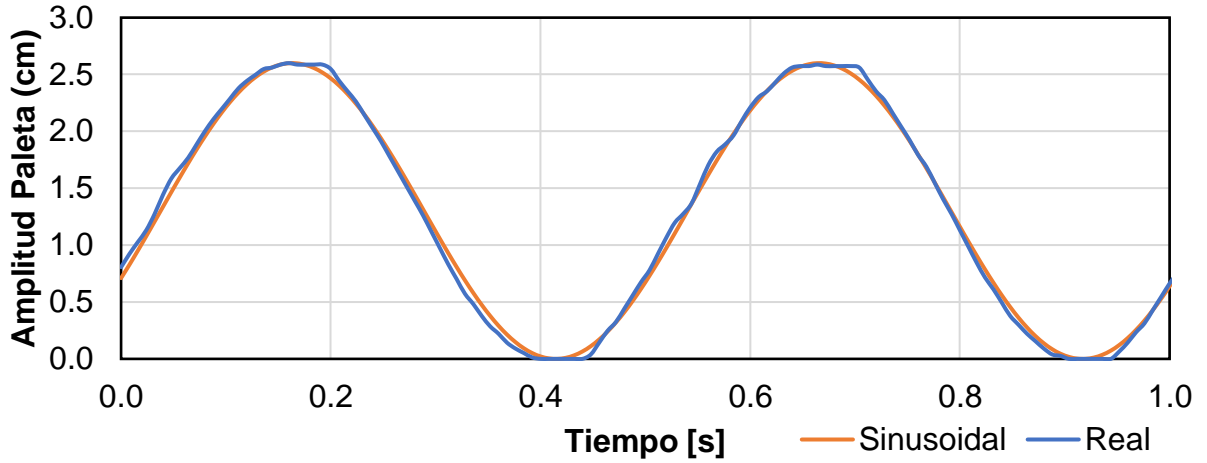


Figura A 9.20: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).

Amplitud 2.5 cm - Frecuencia 3.0 Hz

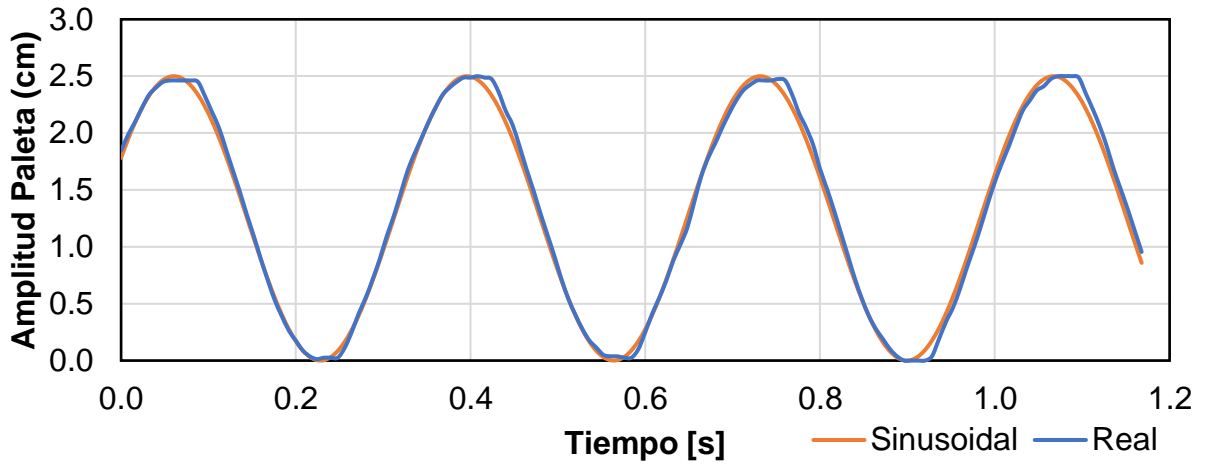


Figura A 9.21: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).

Amplitud 2.5 cm - Frecuencia 4.0 Hz

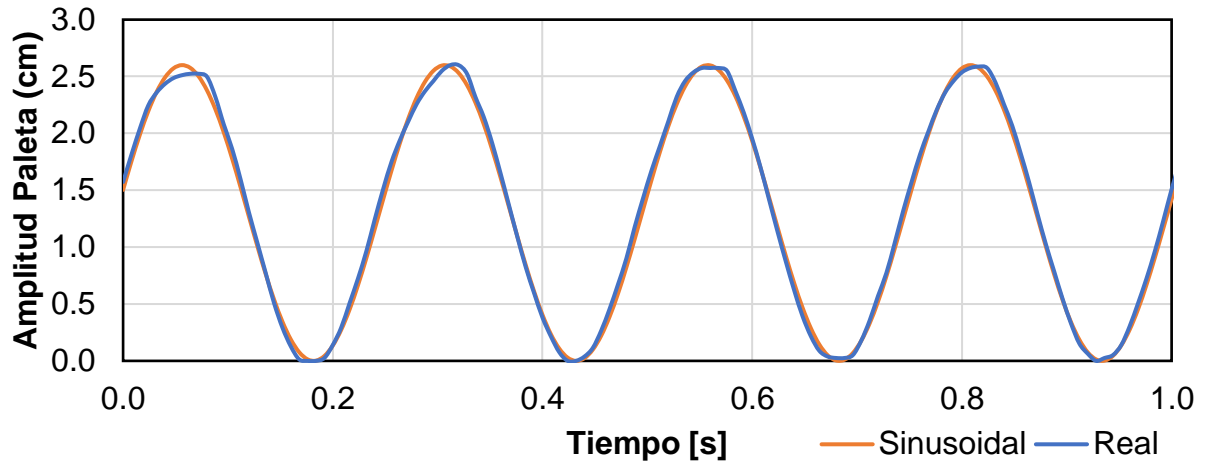


Figura A 9.22: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

Amplitud 2.5 cm - Frecuencia 5.0 Hz

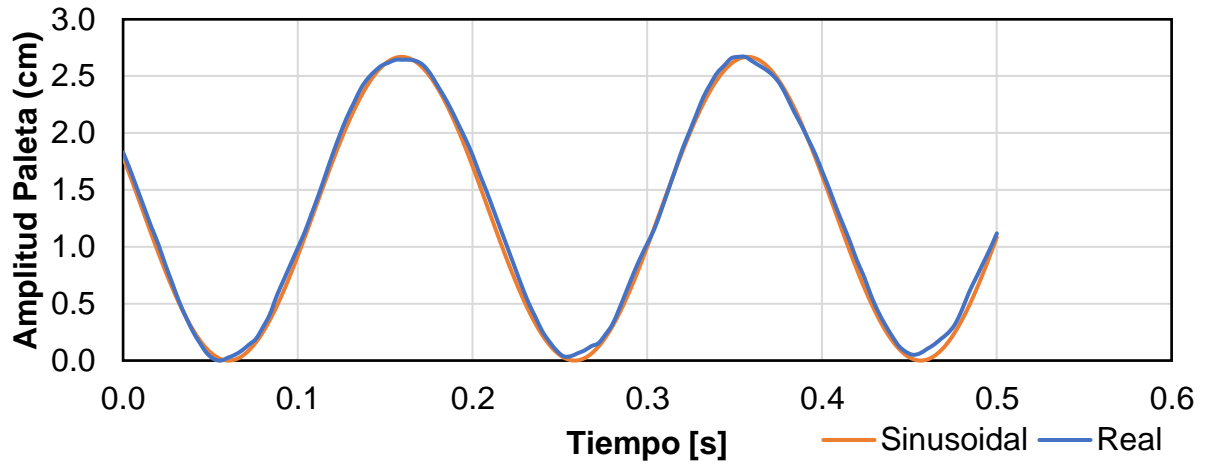


Figura A 9.23: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).

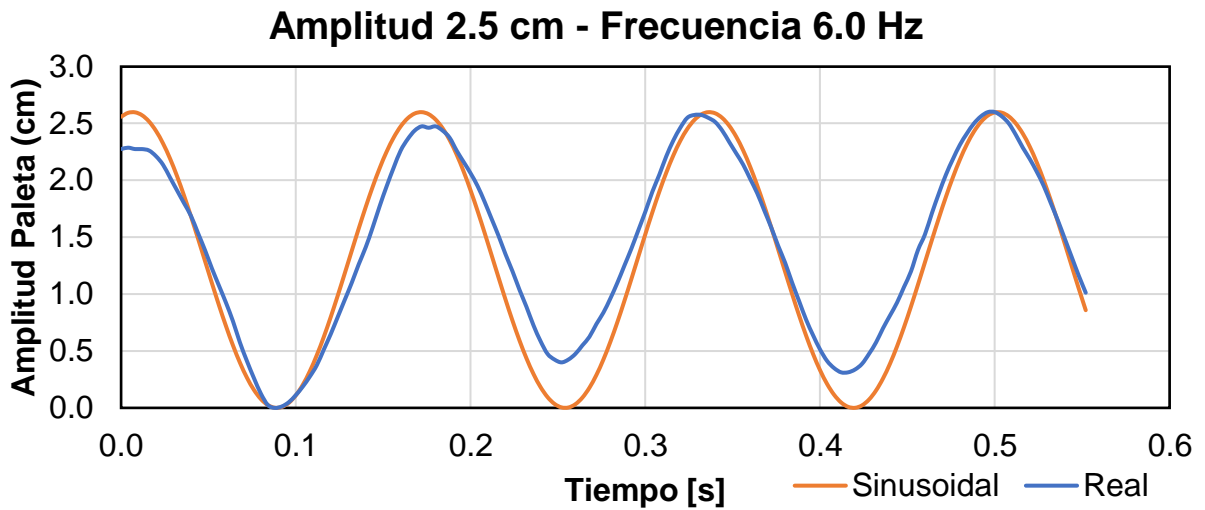


Figura A 9.24: Movimiento sinusoidal para amplitud 2,5 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).

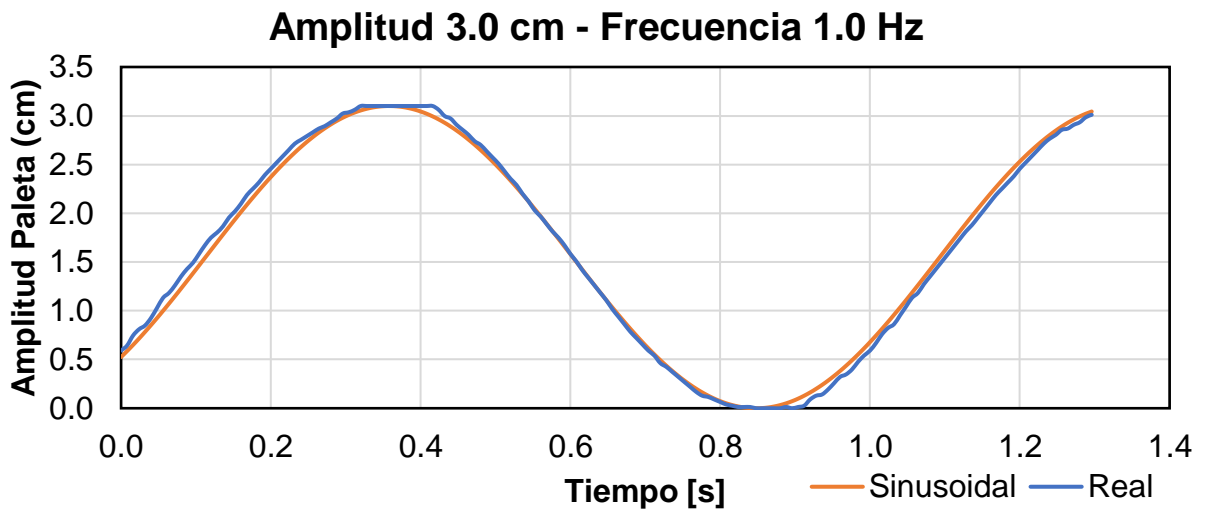


Figura A 9.25: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 1,0 (Hz).

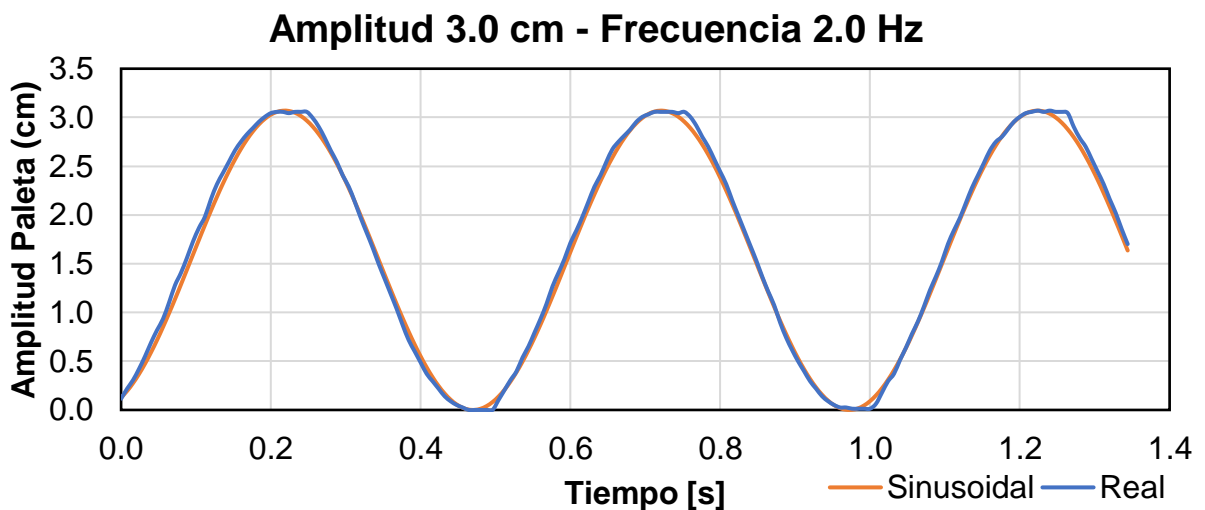


Figura A 9.26: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 2,0 (Hz).

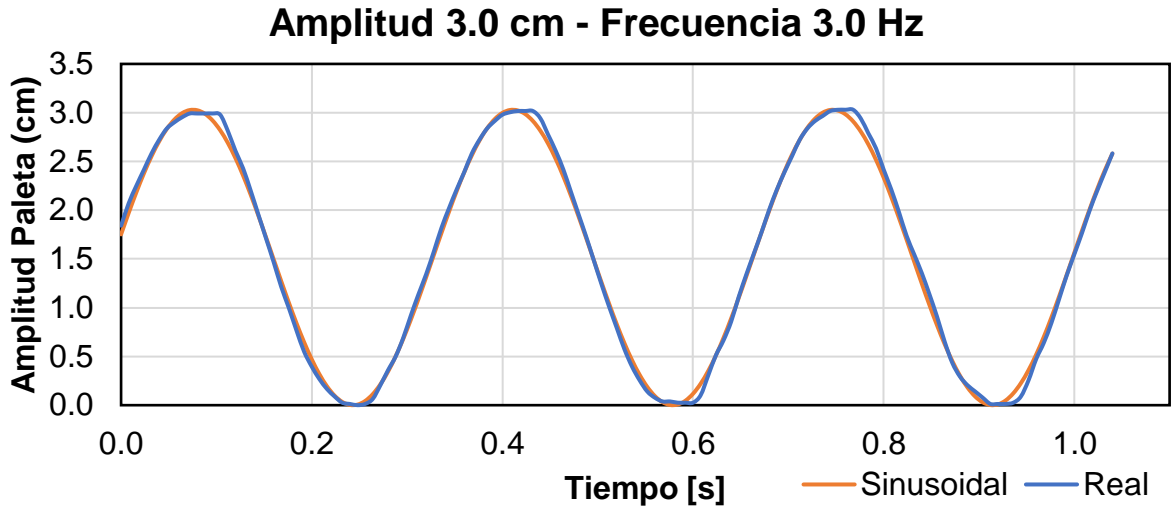


Figura A 9.27: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 3,0 (Hz).

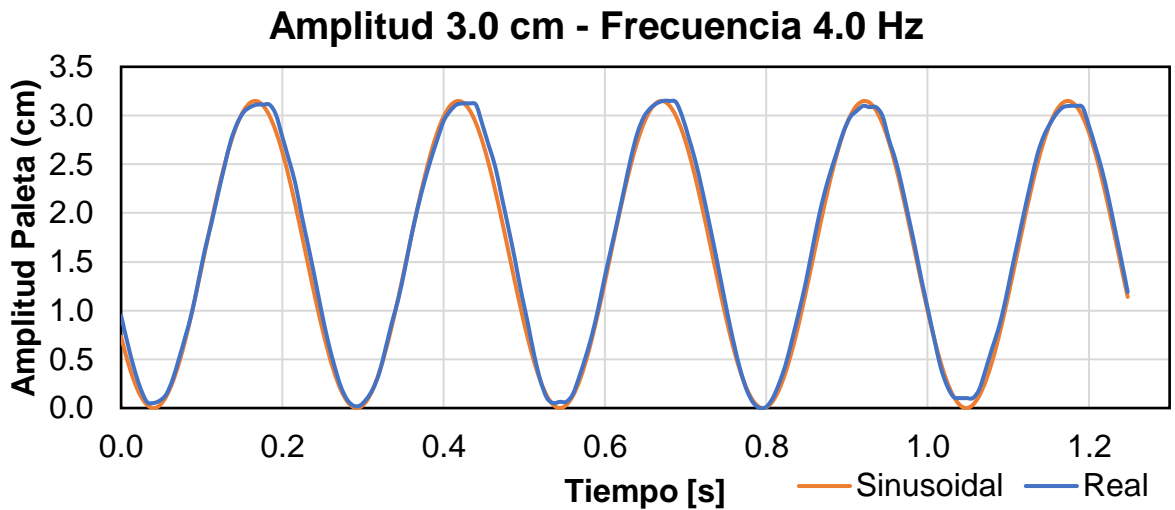


Figura A 9.28: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 4,0 (Hz).

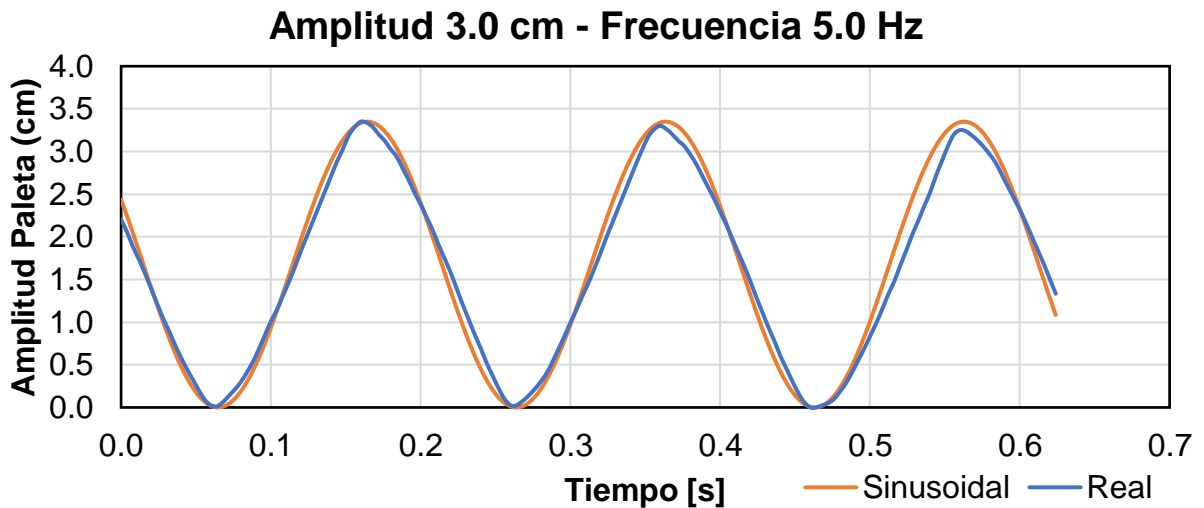


Figura A 9.29: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 5,0 (Hz).

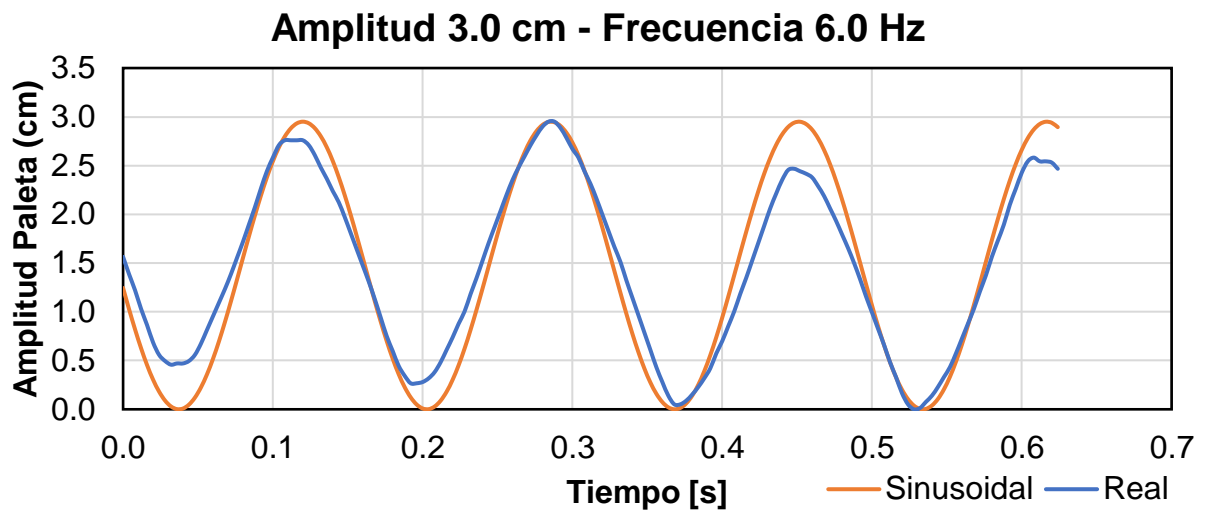


Figura A 9.30: Movimiento sinusoidal para amplitud 3,0 (cm) y frecuencia 6,0 (Hz).

A.1.3 CONFIABILIDAD DEL MOVIMIENTO

Tabla A 9.6: Velocidad de servo motor (cm/s) y confiabilidad del sistema de movimiento en función de la amplitud de carrera de paleta, en cm y frecuencia en Hz.

Velocidad de servo (cm/s)	Amplitud de carrera de paleta (cm)													
	1,0	1,2	1,5	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8	3,0	
Frecuencia de paleta (Hz)	1,0	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6
	1,2	2	3	4	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7
	1,4	3	3	4	4	4	5	6	6	7	7	7	8	8
	1,6	3	4	5	4	5	6	6	7	8	8	8	9	10
	1,8	4	4	5	5	6	6	7	8	9	9	9	10	11
	2,0	4	5	6	6	6	7	8	9	10	10	10	11	12
	2,2	4	5	7	6	7	8	9	10	11	11	11	12	13
	2,4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	12	12	13	14
	2,6	5	6	8	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	2,8	6	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	3,0	6	7	9	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	3,2	6	8	10	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19
	3,4	7	8	10	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20
	3,6	7	9	11	10	12	13	14	16	17	18	19	20	22
	3,8	8	9	11	11	12	14	15	17	18	19	20	21	23
	4,0	8	10	12	11	13	14	16	18	19	20	21	22	24
	4,2	8	10	13	12	13	15	17	18	20	21	22	24	25
	4,4	9	11	13	12	14	16	18	19	21	22	23	25	26
	4,6	9	11	14	13	15	17	18	20	22	23	24	26	28
	4,8	10	12	14	13	15	17	19	21	23	24	25	27	29
	5,0	10	12	15	14	16	18	20	22	24	25	26	28	30
	5,2	10	12	16	15	17	19	21	23	25	26	27	29	31
	5,4	11	13	16	15	17	19	22	24	26	27	28	30	32
	5,6	11	13	17	16	18	20	22	25	27	28	29	31	34
	5,8	12	14	17	16	19	21	23	26	28	29	30	32	35
	6,0	12	14	18	17	19	22	24	26	29	30	31	34	36
	6,2	12	15	19	17	20	22	25	27	30	31	32	35	37
	6,4	13	15	19	18	20	23	26	28	31	32	33	36	38
6,6	13	16	20	18	21	24	26	29	32	33	34	37	40	
6,8	14	16	20	19	22	24	27	30	33	34	35	38	41	
7,0	14	17	21	20	22	25	28	31	34	35	36	39	42	
7,2	14	17	22	20	23	26	29	32	35	36	37	40	43	
7,4	15	18	22	21	24	27	30	33	36	37	38	41	44	
7,6	15	18	23	21	24	27	30	33	36	38	40	43	46	
7,8	16	19	23	22	25	28	31	34	37	39	41	44	47	
8	16	19	24	22	26	29	32	35	38	40	42	45	48	

	Movimiento Consistente
	Movimiento Aceptable
	Movimiento Errático

- Movimiento consistente implica que la amplitud y la frecuencia son constantes en el tiempo.
- Movimiento aceptable indica que existen pequeñas variaciones en la amplitud real, pero la frecuencia es constante
- Movimiento errático es aquel donde la amplitud varía de forma importante en el tiempo, variando del orden de milímetros a centímetros.

A.2 REOLOGÍAS

A.2.1 CAMPAÑA 1 EN GOMA XANTHAN

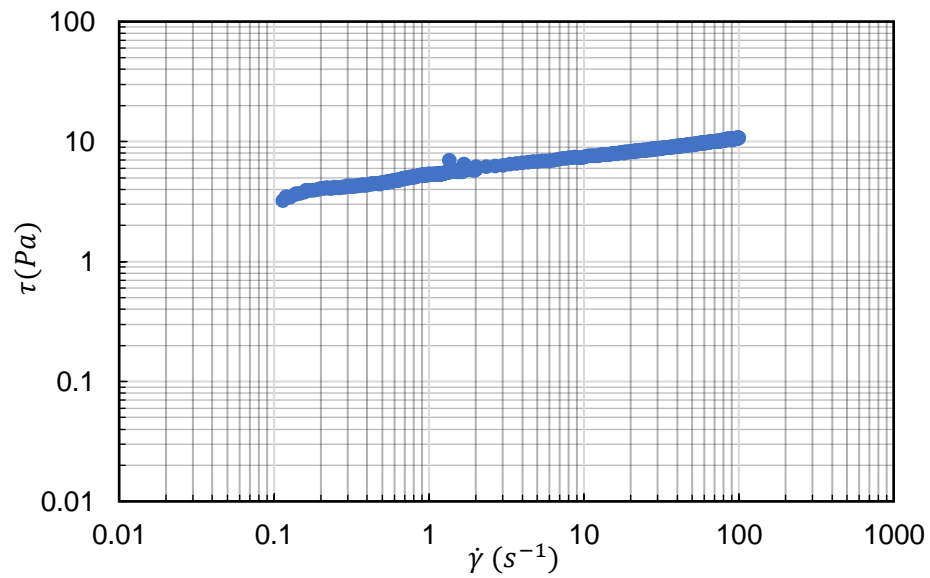


Figura A 9.31: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 1 a 19°C.

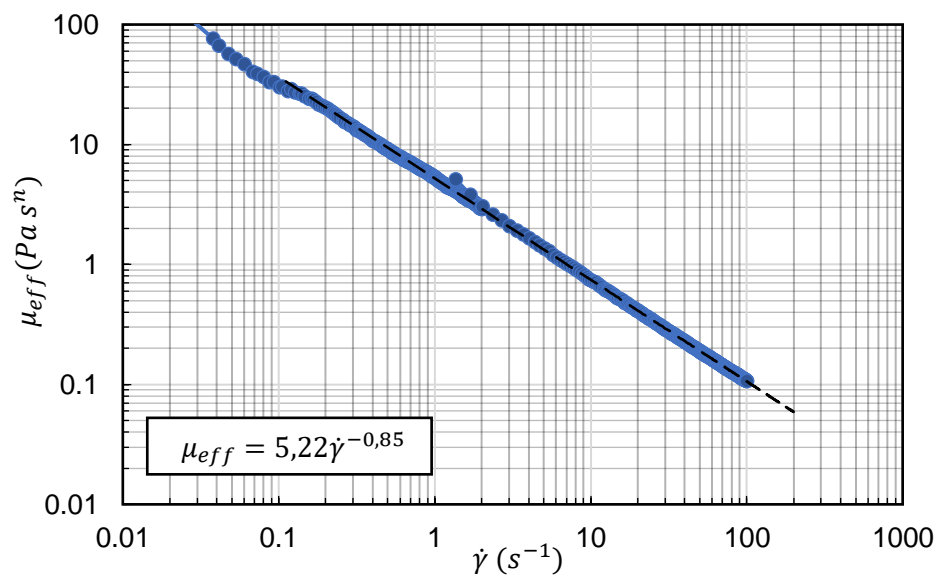


Figura A 9.32: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 1 a 19°C.

A.2.2 CAMPAÑA 2 EN GOMA XANTHAN

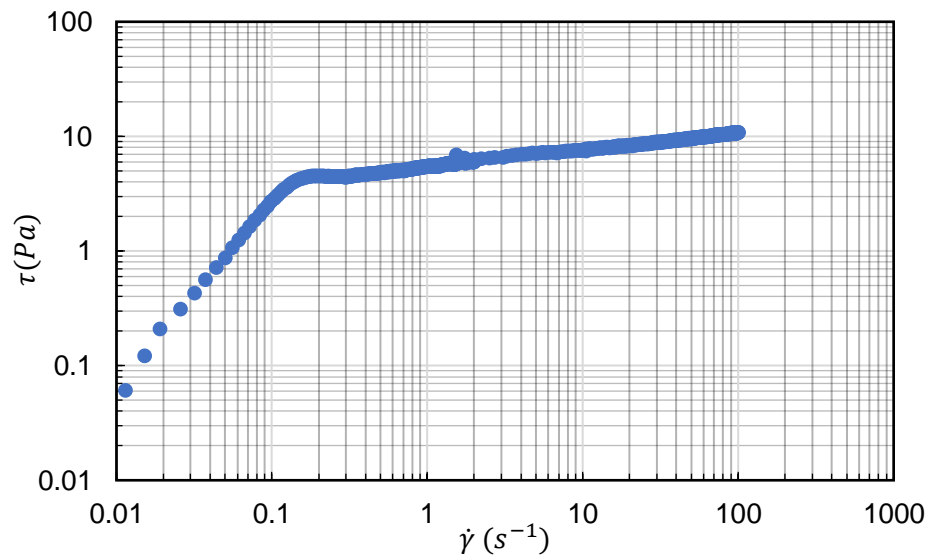


Figura A 9.33. Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 19°C.

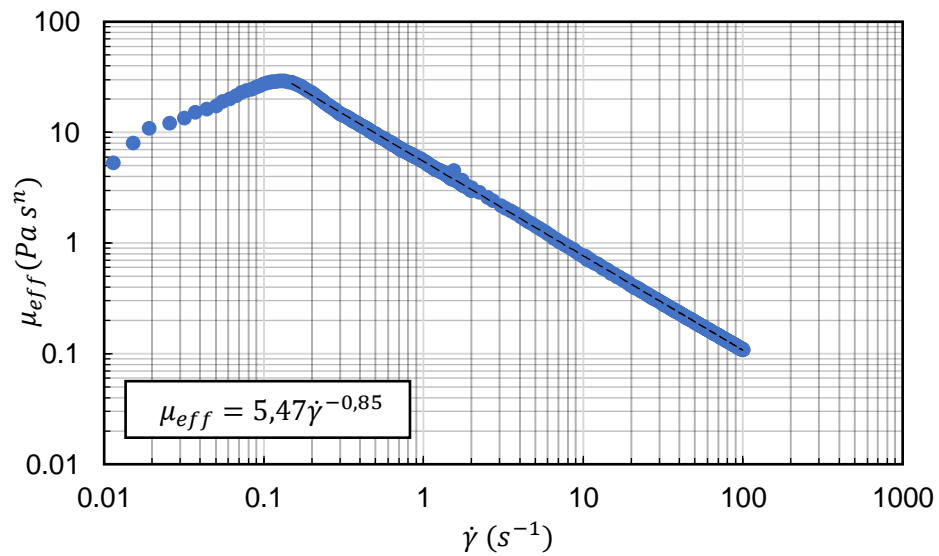


Figura A 9.34: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 19°C.

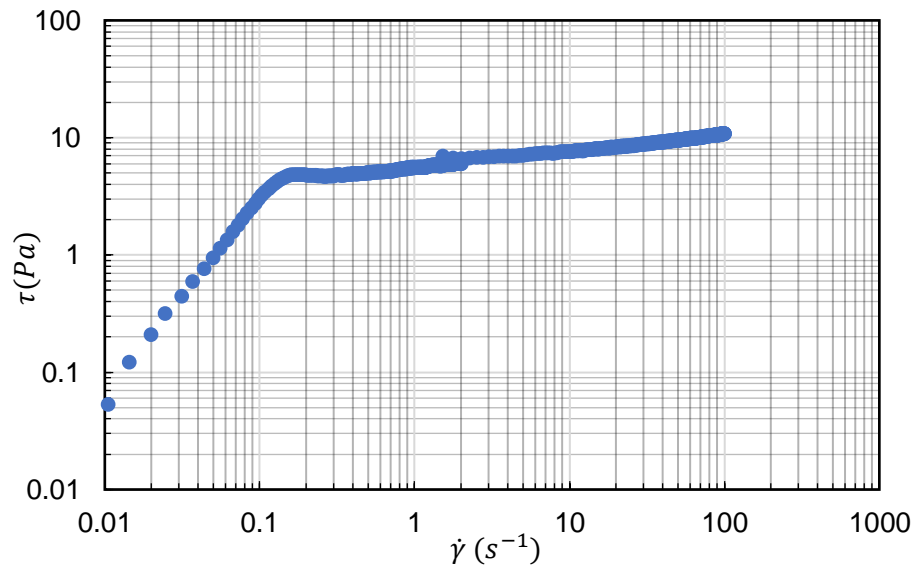


Figura A 9.35: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 20°C.

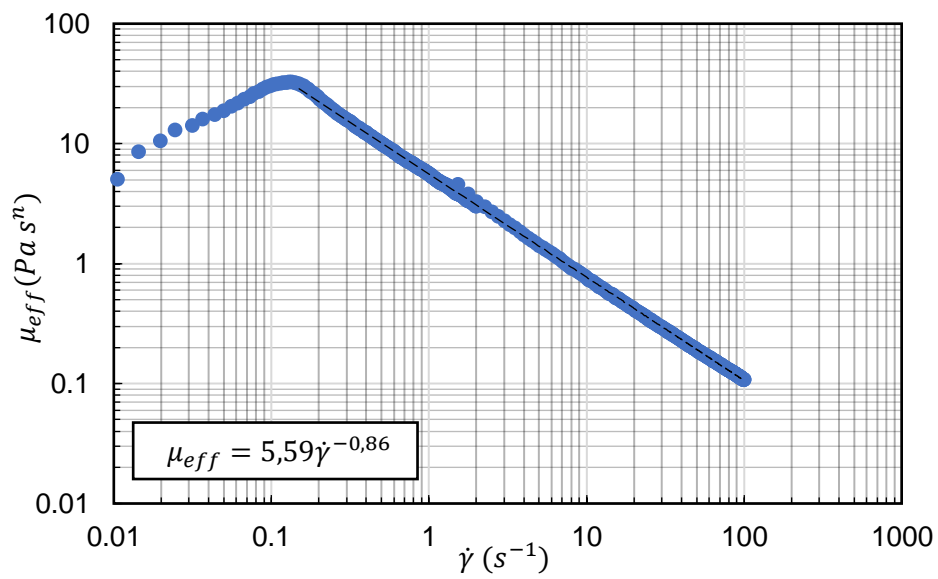


Figura A 9.36: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 2 a 20°C.

A.2.3 CAMPAÑA 3 EN GOMA XANTHAN

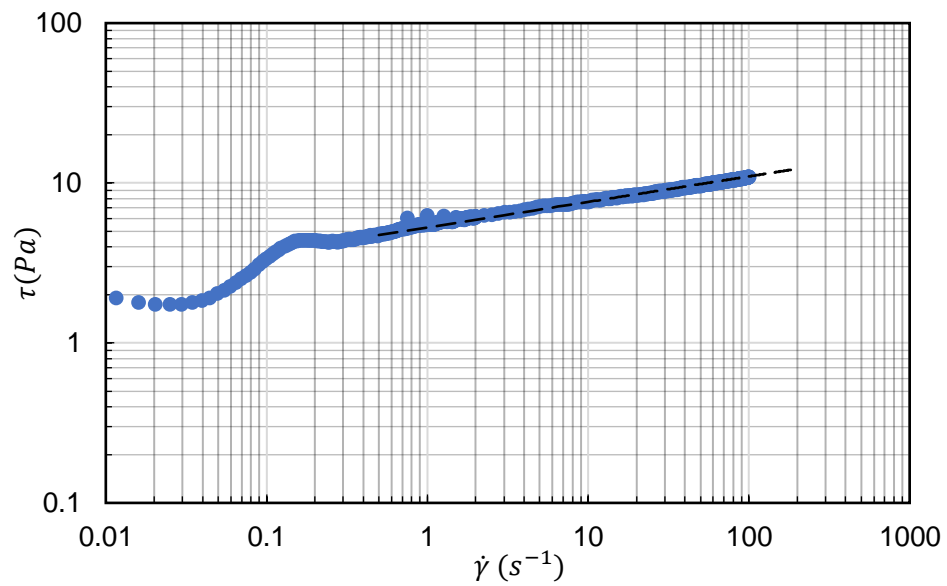


Figura A 9.37: Diagrama reológico goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 3 a 19°C.

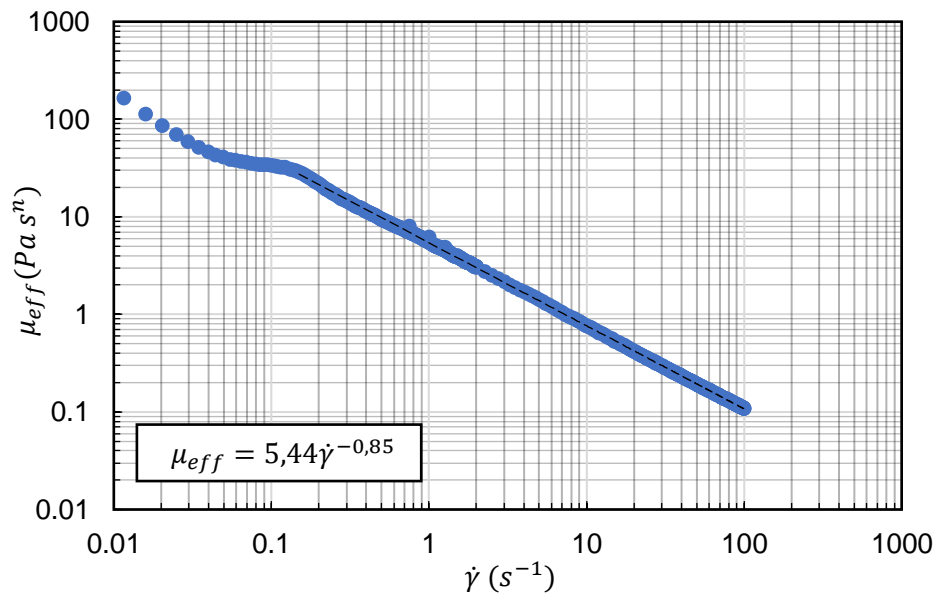


Figura A 9.38: Viscosidad efectiva goma xanthan 0,58 % peso peso campaña 3 a 19°C.

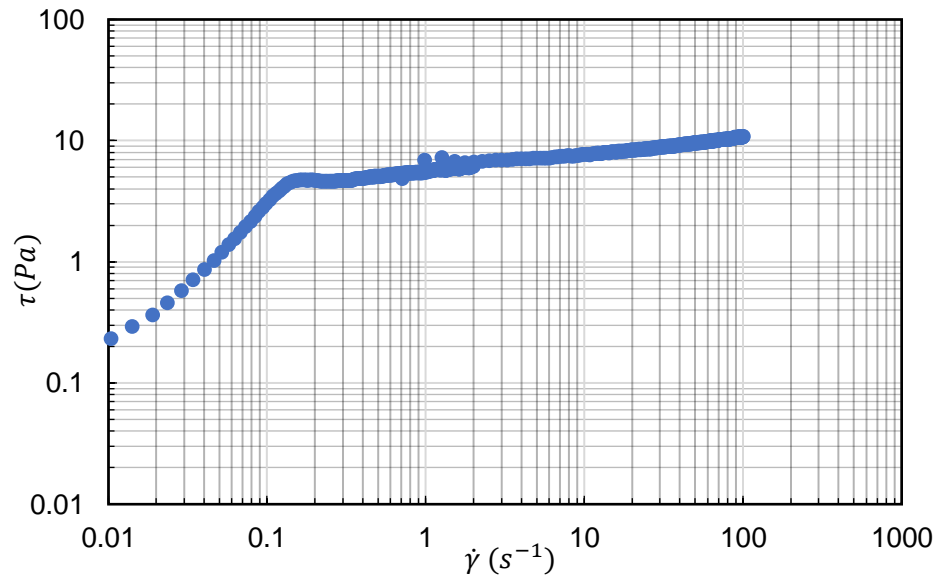


Figura A 9.39: Diagrama reológico goma xantán 0,58 % peso peso campaña 3 a 20°C.

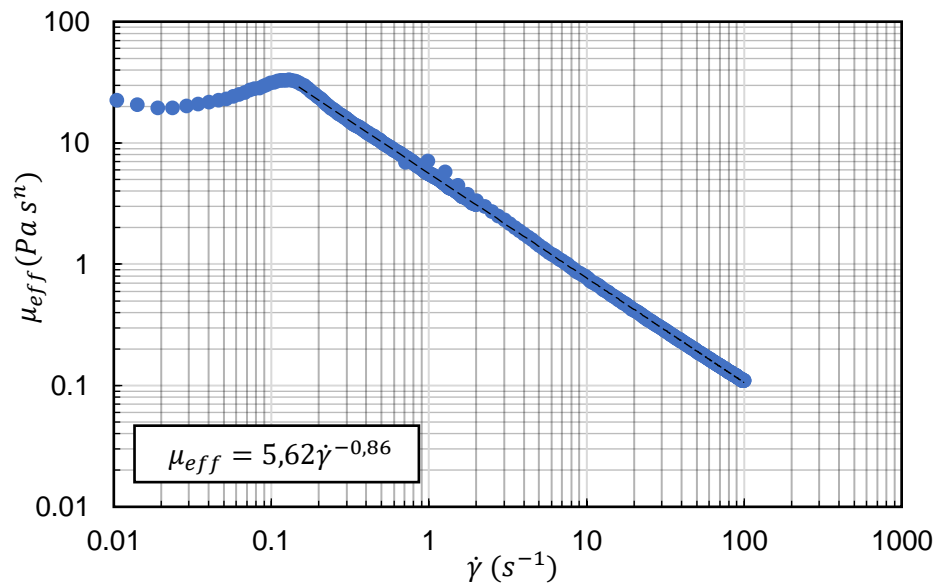


Figura A 9.40: Viscosidad efectiva goma xantán 0,58 % peso peso campaña 3 a 20°C.

A.3 PERFILES LONGITUDINALES

A.3.1 PERFILES LONGITUDINALES CAMPAÑA 1 EN GOMA XANTHAN

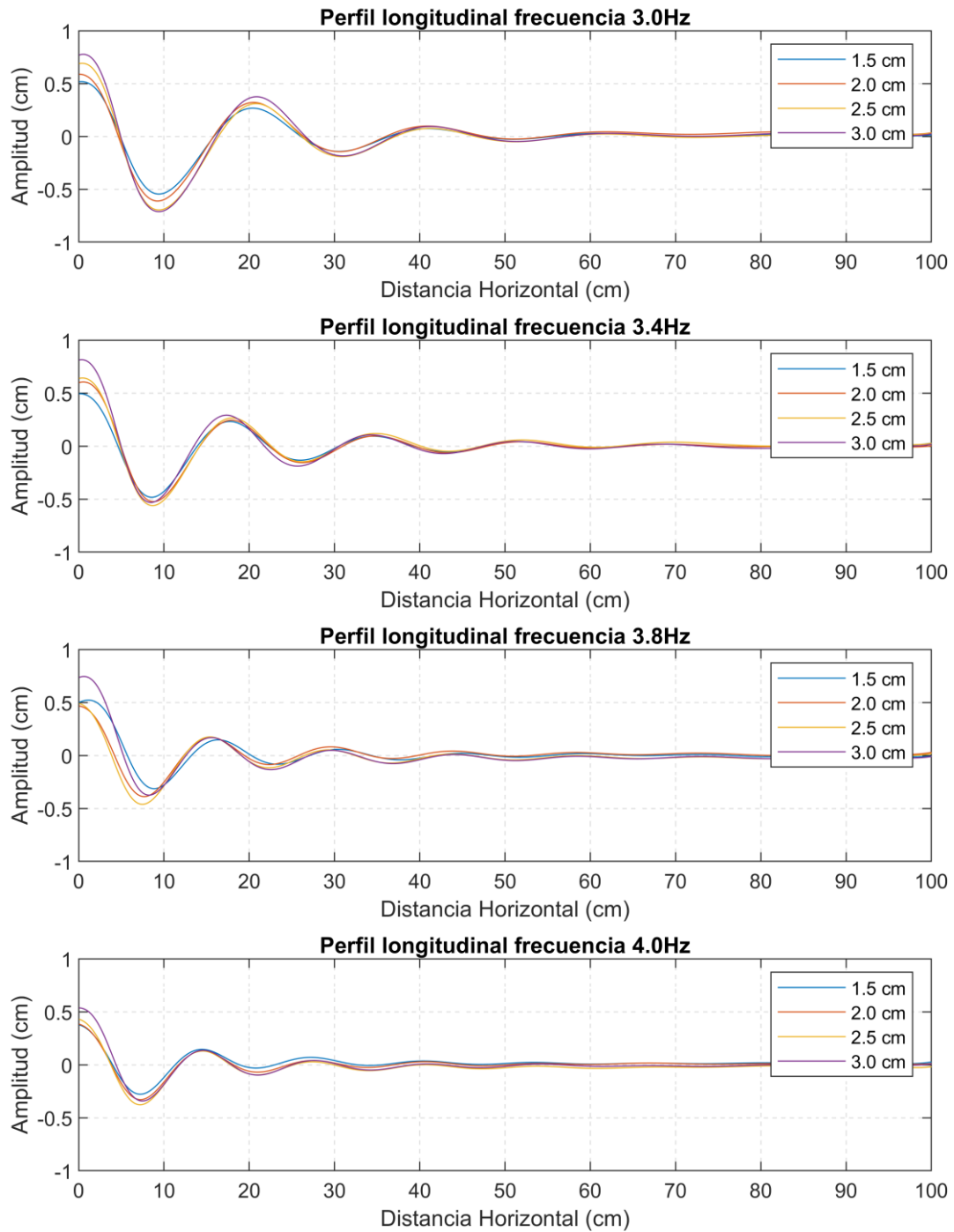


Figura A 9.41: Perfiles longitudinales para campaña 1 de experimentos con goma xanthan. Continúa

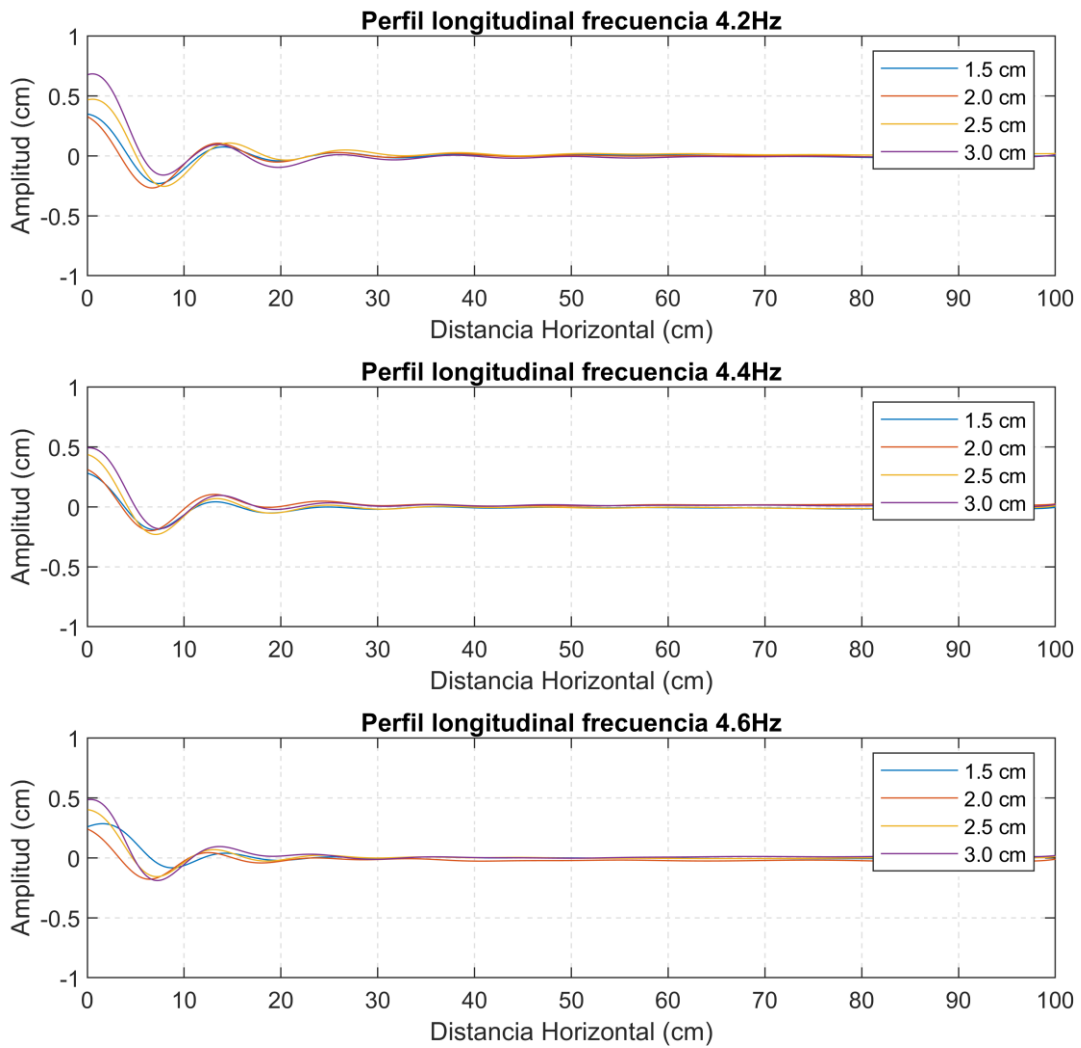


Figura A 9.42: Perfiles longitudinales para campaña 1 de experimentos con goma xanthan. Continúa

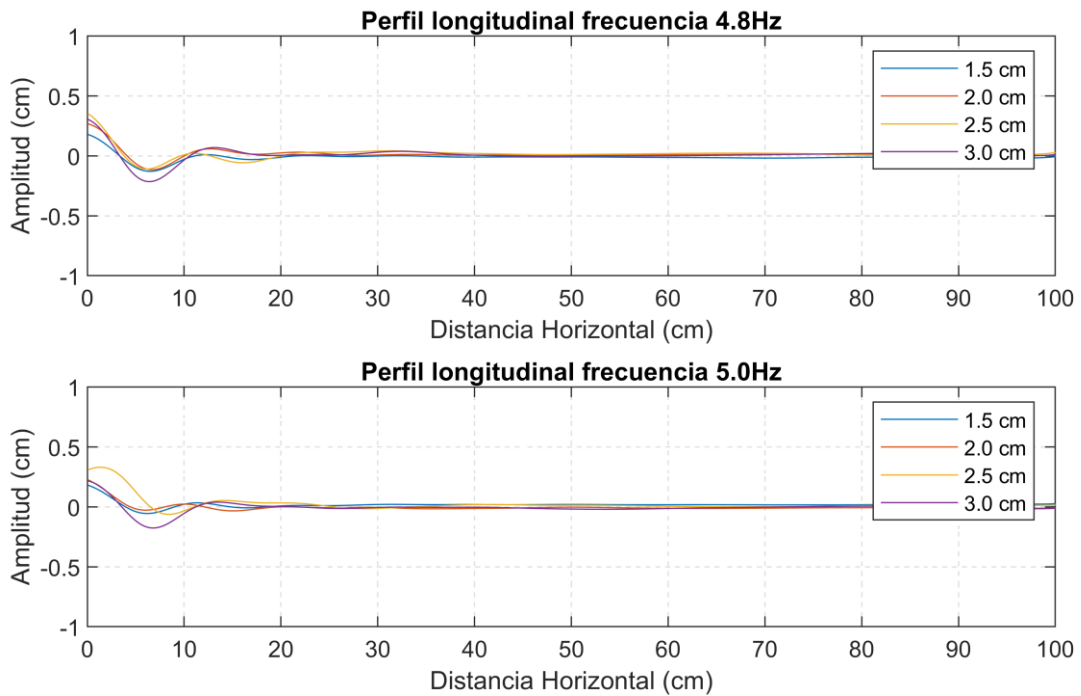


Figura A 9.43: Perfiles longitudinales para campaña 1 de experimentos con goma xanthan.

A.3.2 PERFILES LONGITUDINALES CAMPAÑA 3 EN GOMA XANTHAN

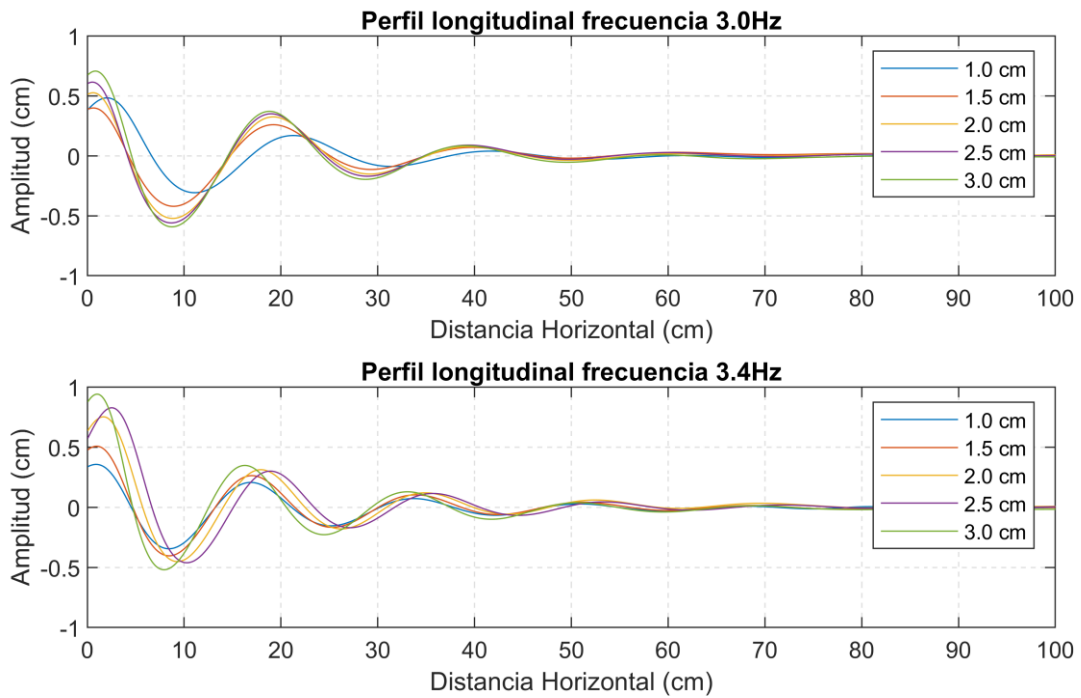


Figura A 9.442: Perfiles longitudinales para campaña 3 de experimentos con goma xanthan. Continúa

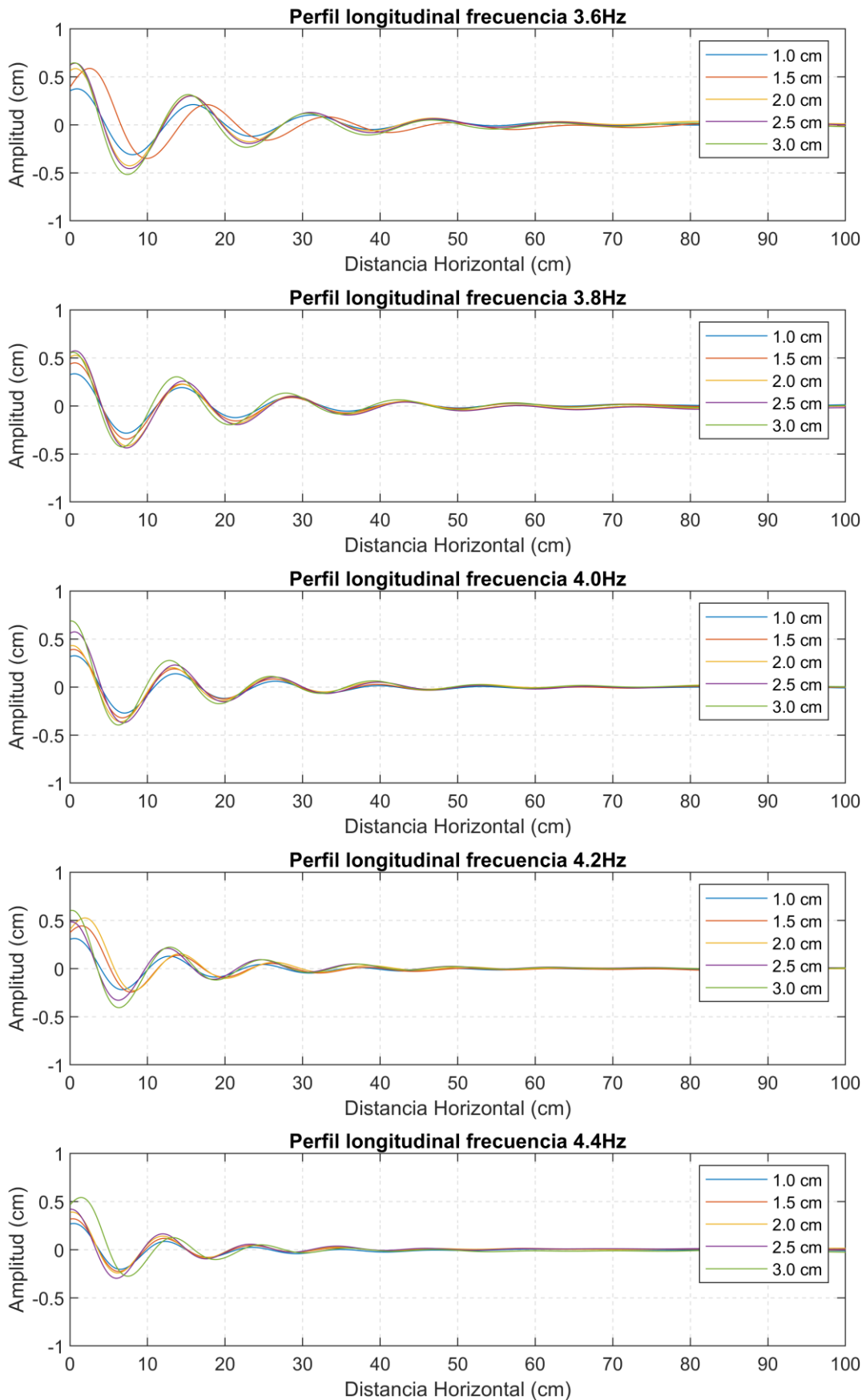


Figura A 9.452: Perfiles longitudinales para campaña 3 de experimentos con goma xanthan. Continúa

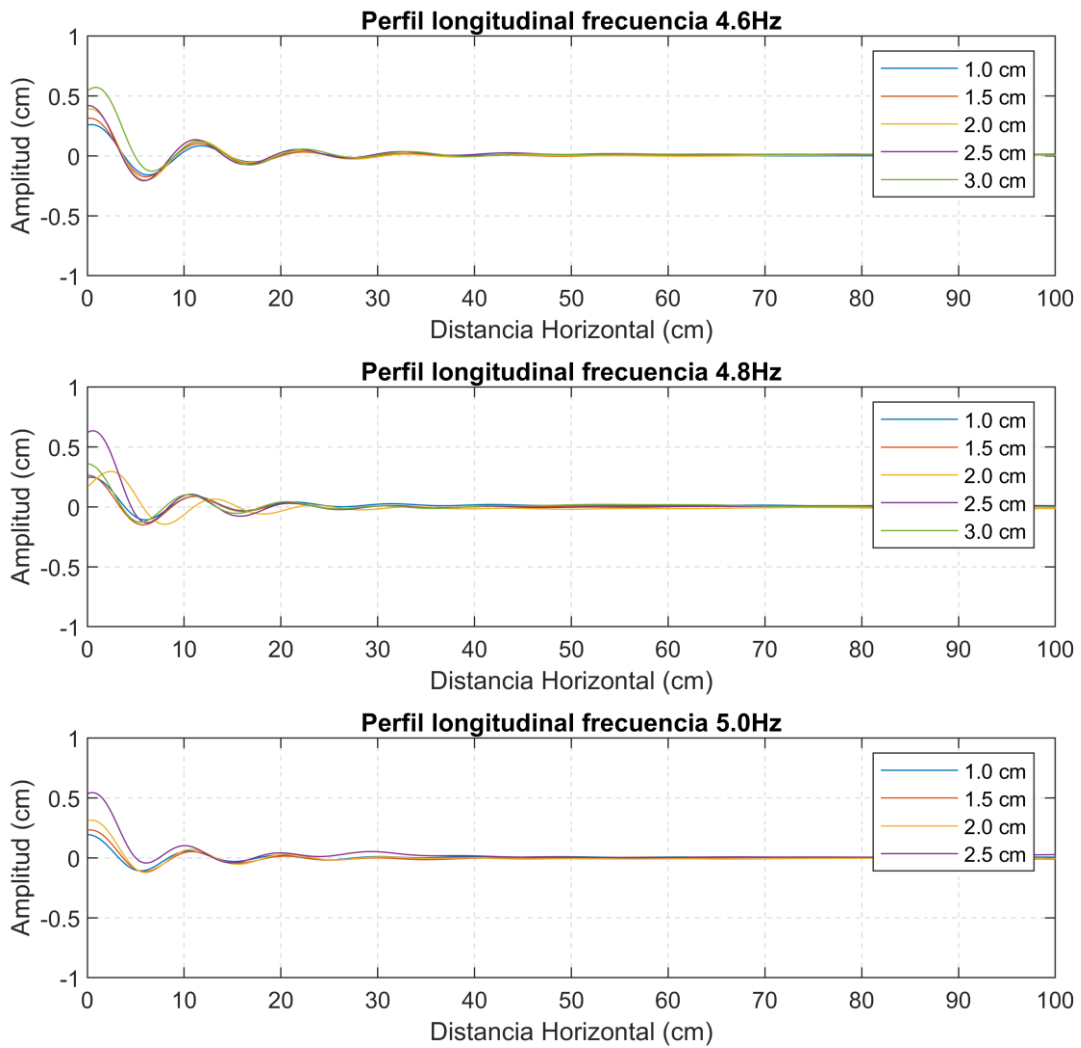


Figura A 9.46: Perfiles longitudinales campaña 3 de experimentos para goma xanthan.

A.3.3 PERFILES LONGITUDINALES CAMPAÑA EN GLICERINA 70%

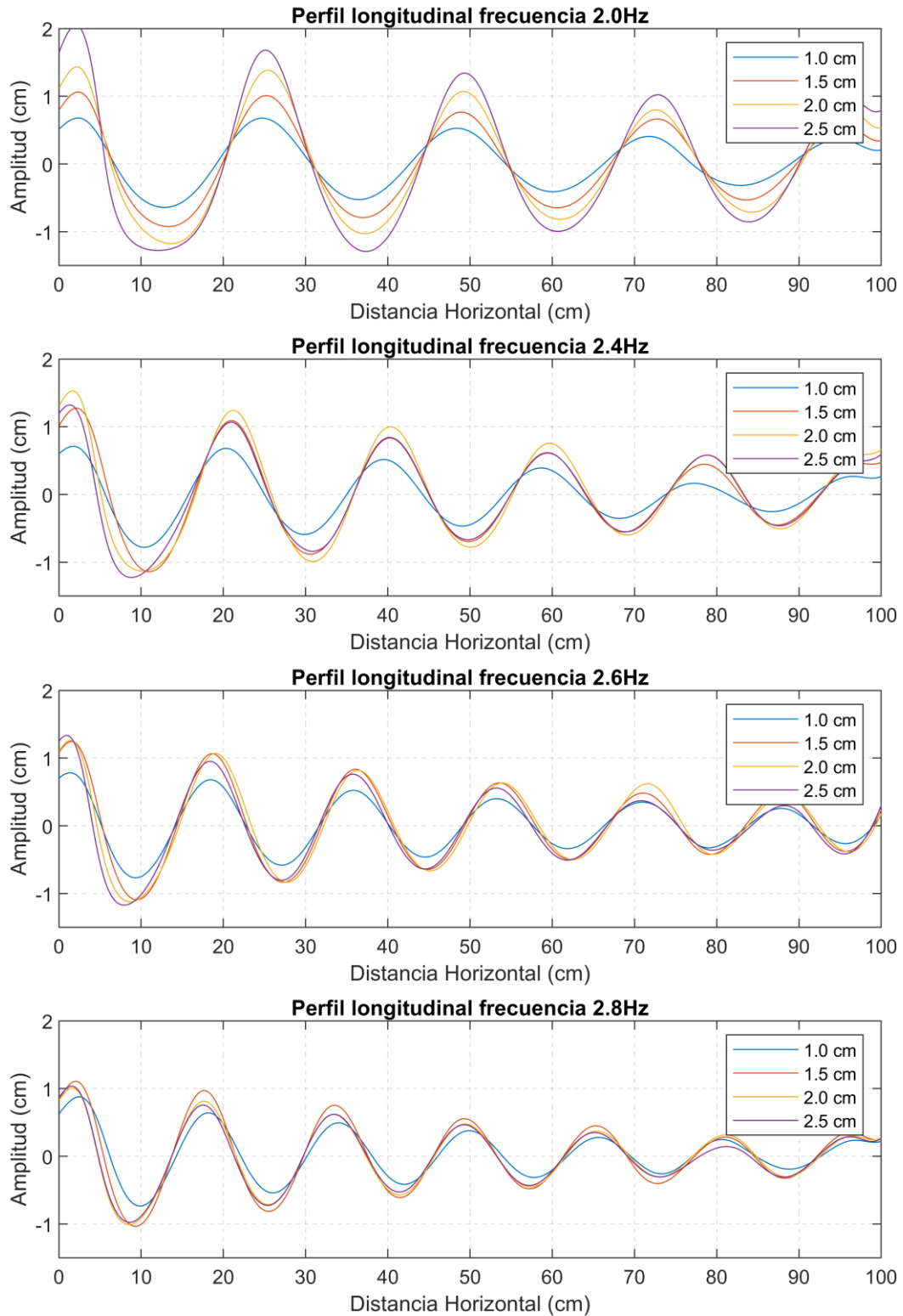


Figura A 9.47: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. Continúa.

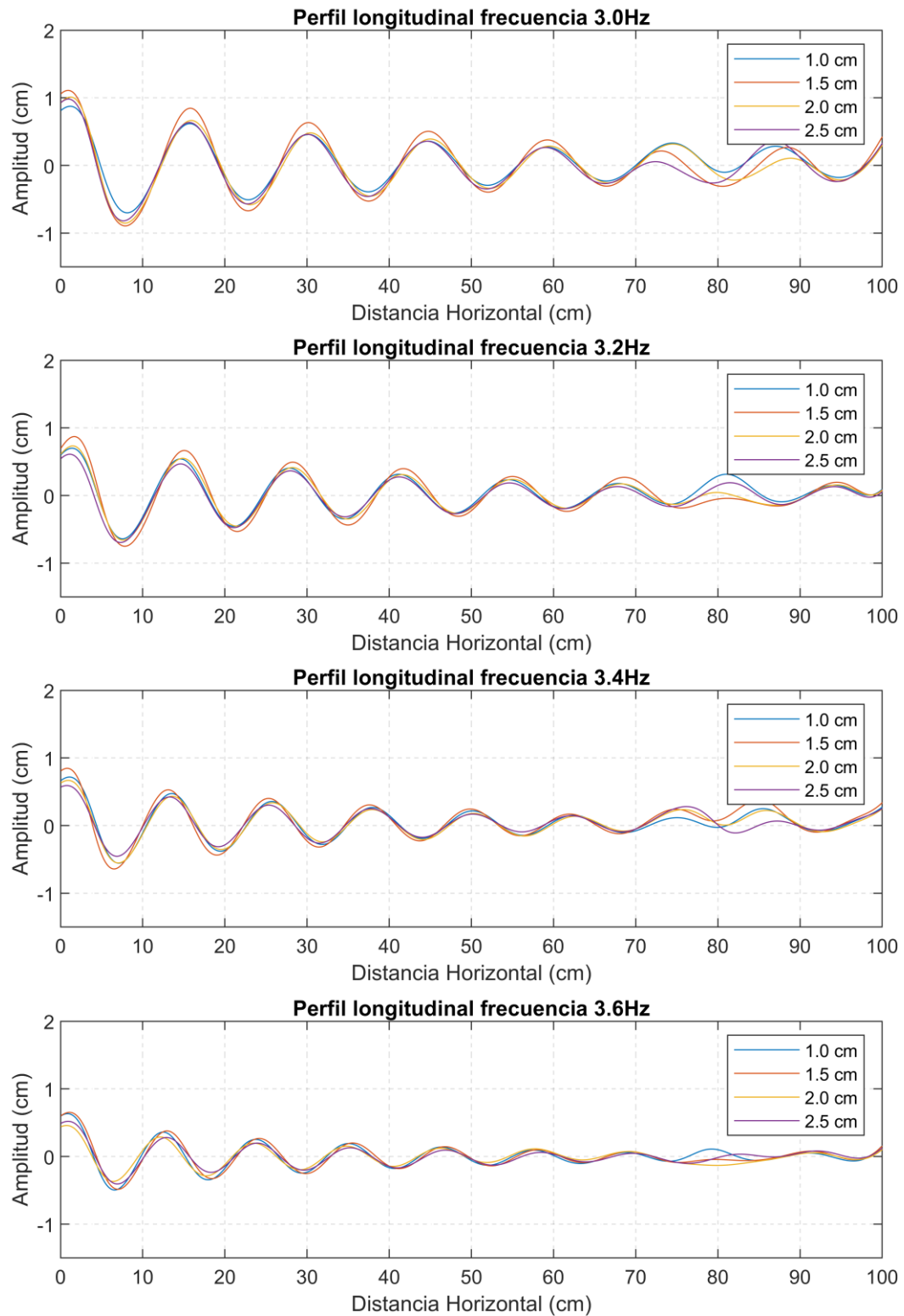


Figura A 9.48: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. Continúa.

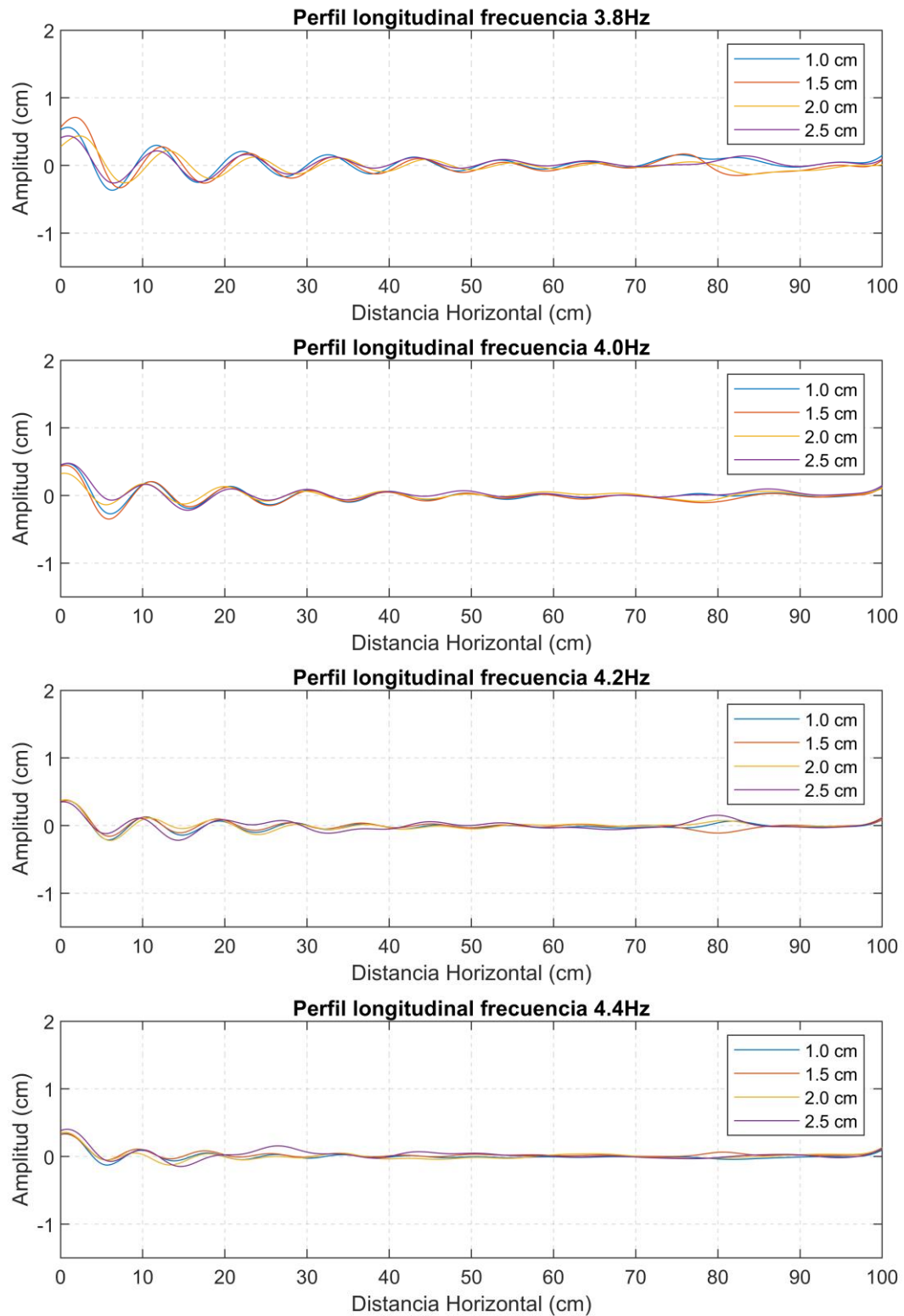


Figura A 9.49: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%. Continúa.

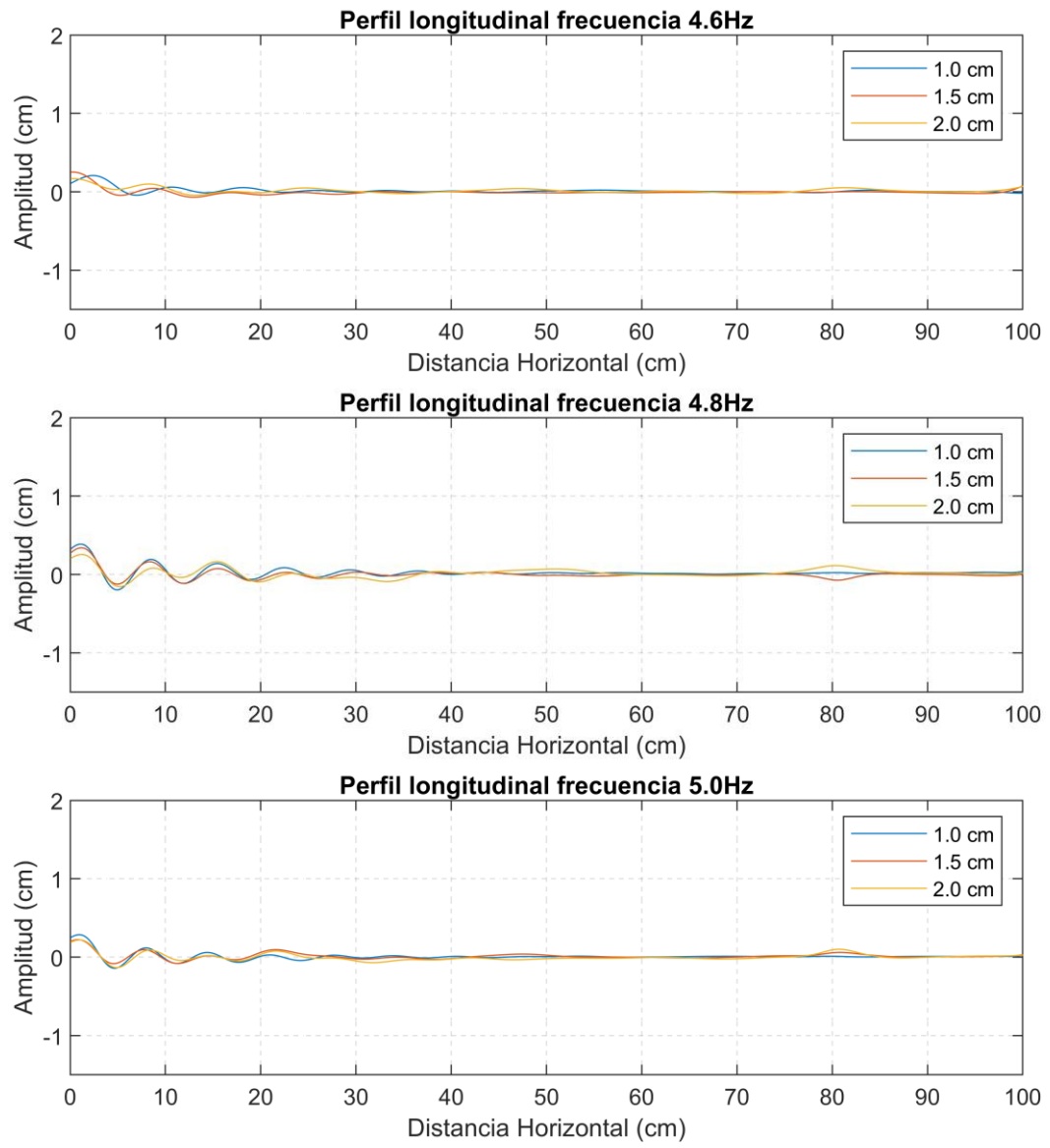


Figura A 9.50: Perfiles longitudinales campaña de experimentos con glicerina 70%.

A.4 VARIACIÓN DE LA AMPLITUD

A.4.1 PROMEDIO ENTRE CAMPAÑAS

Tabla A 9.7: A/A_0 promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,05	1,00 ± 0,02	1 ± 0,3	1 ± 0,3	1 ± 0,2	1 ± 0,2	1 ± 0,2	1 ± 0,2	1 ± 0,2
0,55 ± 0,07	0,67 ± 0,08	0,75 ± 0,05	0,70 ± 0,09	0,71 ± 0,09	0,69 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1
0,30 ± 0,02	0,408 ± 0,009	0,43 ± 0,04	0,40 ± 0,03	0,39 ± 0,04	0,33 ± 0,03	0,33 ± 0,04	0,29 ± 0,01	0,34 ± 0,03	0,35 ± 0,04
0,15 ± 0,02	0,26 ± 0,03	0,32 ± 0,02	0,284 ± 0,07	0,28 ± 0,08	0,25 ± 0,09	0,23 ± 0,09	0,2 ± 0,1	0,27 ± 0,06	0,30 ± 0,06
0,069 ± 0,01	0,163 ± 0,003	0,194 ± 0,005	0,19 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,14 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,114 ± 0,006	0,12 ± 0,01	0,119 ± 0,009
0,04 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,13 ± 0,01	0,13 ± 0,02	0,12 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,09 ± 0,03	0,08 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,12 ± 0,03
	0,06 ± 0,01	0,072 ± 0,007	0,078 ± 0,004	0,083 ± 0,009	0,07 ± 0,01	0,05 ± 0,01	0,036 ± 0,01	0,047 ± 0,006	0,04 ± 0,01
	0,04 ± 0,01	0,063 ± 0,004	0,05 ± 0,02	0,06 ± 0,02	0,09 ± 0,05	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,01	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02
		0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,02	0,037 ± 0,003	0,028 ± 0,009	0,017 ± 0,006	0,010 ± 0,003	0,02 ± 0,008	0,01 ± 0,01
				0,034 ± 0,003	0,033 ± 0,002	0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,01		
				0,02 ± 0,01	0,01 ± 0,04				

Tabla A 9.8: x/h promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,4 ± 0,8	2,02 ± 0,01	2,01 ± 0,01	2,018 ± 0,01	2,02 ± 0,02	2,021 ± 0,03	2,016 ± 0,02	2,018 ± 0,02	2,018 ± 0,01	2,02 ± 0,02
4 ± 2	5,05 ± 0,02	4,741 ± 9E-04	4,55 ± 0,07	4,3 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,1 ± 0,2	3,9 ± 0,1	3,79 ± 0,07	3,677 ± 0,007
8 ± 2	8,42 ± 0,09	7,92 ± 0,03	7,50 ± 0,06	7,08 ± 0,09	6,81 ± 0,06	6,5 ± 0,1	6,18 ± 0,09	5,97 ± 0,07	5,72 ± 0,08
12 ± 2	11,74 ± 0,04	10,9 ± 0,005	10,3 ± 0,2	9,6 ± 0,2	9,1 ± 0,2	8,7 ± 0,3	8,3 ± 0,3	7,9 ± 0,1	7,485 ± 0,006
17 ± 2	15,2 ± 0,1	14,09 ± 0,04	13,16 ± 0,04	12,25 ± 0,05	11,60 ± 0,08	10,91 ± 0,05	10,31 ± 0,03	9,97 ± 0,08	9,6 ± 0,1
20 ± 2	18,66 ± 0,07	17,25 ± 0,008	16,04 ± 0,09	14,9 ± 0,1	14,0 ± 0,2	13,2 ± 0,3	12,5 ± 0,3	11,9 ± 0,1	11,35 ± 0,03
	22,1 ± 0,1	20,58 ± 0,04	18,95 ± 0,08	17,59 ± 0,08	16,55 ± 0,03	15,5 ± 0,1	14,7 ± 0,2	14,11 ± 0,07	13,5 ± 0,1
	25,74 ± 0,04	23,61 ± 0,08	21,69 ± 0,02	20,2 ± 0,2	19,0 ± 0,2	17,8 ± 0,2	16,7 ± 0,3	16,0 ± 0,1	15,37 ± 0,05
		27,12 ± 0,03	24,93 ± 0,04	22,81 ± 0,09	21,6 ± 0,1	20,12 ± 0,01	19,1 ± 0,2	18,2 ± 0,2	17,6 ± 0,3
				25,57 ± 0,01	23,85 ± 0,01	22,27 ± 0,01	20,9 ± 0,2		
				28,35 ± 0,02	26,8 ± 0,01				

A.4.2 CAMPAÑA 1 EN GOMA XANTHAN

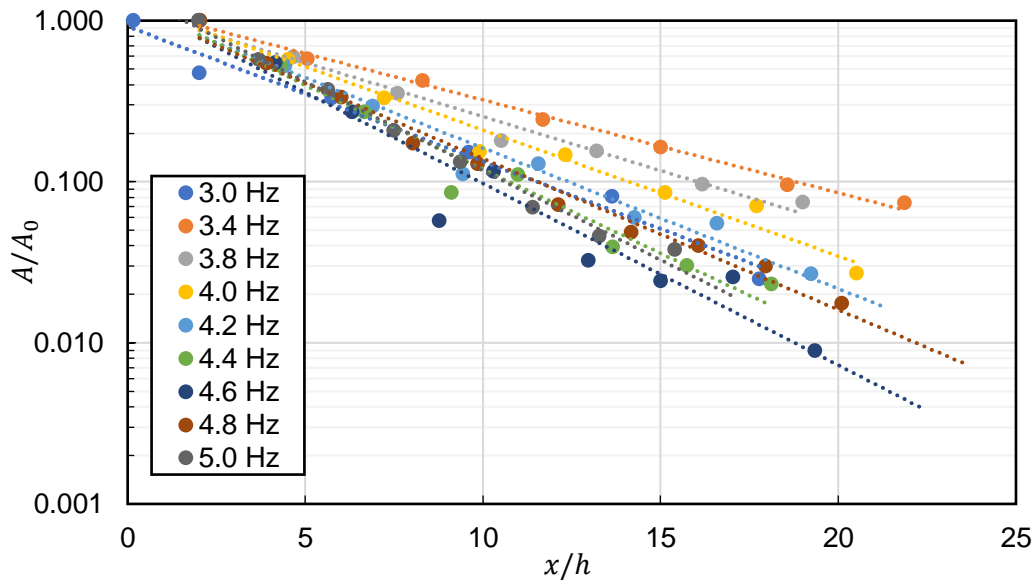


Figura A 9.51: Variación de la amplitud en función de la posición para campaña 1 en goma xanthan.

Tabla A 9.9: Valor A_0 por experimento para campaña 1 en goma xanthan en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).

Valor A_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta			
	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	1,103 ± 0,005	1,278 ± 0,005	1,278 ± 0,005	1,363 ± 0,006
3.4 Hz	1,016 ± 0,004	1,092 ± 0,005	1,130 ± 0,008	1,166 ± 0,005
3.8 Hz	0,357 ± 0,004	0,357 ± 0,006	0,348 ± 0,009	0,335 ± 0,007
4.0 Hz	0,272 ± 0,004	0,262 ± 0,007	0,260 ± 0,006	0,276 ± 0,008
4.2 Hz	0,203 ± 0,004	0,190 ± 0,006	0,186 ± 0,007	0,251 ± 0,008
4.4 Hz	0,145 ± 0,004	0,140 ± 0,007	0,132 ± 0,009	0,224 ± 0,009
4.6 Hz	0,103 ± 0,004	0,097 ± 0,005	0,109 ± 0,009	0,162 ± 0,01
4.8 Hz	0,080 ± 0,007	0,088 ± 0,008	0,090 ± 0,009	0,110 ± 0,01
5.0 Hz	0,070 ± 0,008	0,081 ± 0,006	0,081 ± 0,006	

Tabla A 9.10: Valor A/A_0 para campaña 1 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz		3.4 Hz		3.8 Hz		4.0 Hz		4.2 Hz		4.4 Hz		4.6 Hz		4.8 Hz		5.0 Hz	
1	± 0,005	1	± 0,006	1	± 0,006	1	± 0,006	1	± 0,006	1	± 0,007	1	± 0,007	1	± 0,009	1	± 0,007
0,47	± 0,02	0,58	± 0,04	0,6	± 0,1	0,6	± 0,1	0,5	± 0,1	0,5	± 0,2	0,5	± 0,1	0,54	± 0,04	0,571	± 0,002
0,33	± 0,01	0,42	± 0,01	0,354	± 0,009	0,331	± 0,006	0,29	± 0,01	0,27	± 0,03	0,27	± 0,04	0,33	± 0,05	0,374	± 0,005
0,152	± 0,005	0,24	± 0,01	0,18	± 0,03	0,15	± 0,03	0,11	± 0,02	0,09	± 0,04	0,06	± 0,03	0,17	± 0,04	0,207	± 0,005
0,081	± 0,005	0,163	± 0,009	0,15	± 0,02	0,146	± 0,007	0,13	± 0,01	0,111	± 0,008	0,116	± 0,008	0,129	± 0,001	0,132	± 0,005
0,025	± 0,003	0,095	± 0,002	0,096	± 0,009	0,086	± 0,008	0,06	± 0,01	0,04	± 0,01	0,032	± 0,008	0,072	± 0,003	0,069	± 0,005
		0,074	± 0,008	0,07	± 0,01	0,07	± 0,01	0,05	± 0,01	0,03	± 0,008	0,02	± 0,02	0,048	± 0,003	0,046	± 0,003
				0,02	± 0,00	0,027	± 0,002	0,027	± 0,005	0,023	± 0,006	0,03	± 0,01	0,04	± 0,002	0,038	± 0,003
												0,01	± 0,02	0,03	± 0,003		
														0,02	± 0,03		

Tabla A 9.11: Valor x/h para campaña 1 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz		3.4 Hz		3.8 Hz		4.0 Hz		4.2 Hz		4.4 Hz		4.6 Hz		4.8 Hz		5.0 Hz	
2,020	± 0,005	2,021	± 0,004	2,019	± 0,008	2,023	± 0,005	2,03	± 0,01	2,01	± 0,01	2,02	± 0,01	2,024	± 0,004	1,99	± 0,01
5,75	± 0,03	5,06	± 0,08	4,7	± 0,1	4,52	± 0,09	4,43	± 0,08	4,3	± 0,1	4,2	± 0,2	3,9	± 0,1	3,69	± 0,03
9,59	± 0,04	8,30	± 0,03	7,60	± 0,02	7,21	± 0,04	6,89	± 0,03	6,66	± 0,06	6,3	± 0,2	6,0	± 0,2	5,63	± 0,02
13,63	± 0,04	11,69	± 0,05	10,51	± 0,09	9,90	± 0,08	9,44	± 0,07	9,1	± 0,2	8,8	± 0,5	8,0	± 0,3	7,48	± 0,02
17,78	± 0,06	15,00	± 0,04	13,21	± 0,04	12,31	± 0,02	11,57	± 0,03	10,98	± 0,04	10,3	± 0,2	9,85	± 0,02	9,36	± 0,02
21,95	± 0,04	18,56	± 0,01	16,17	± 0,03	15,12	± 0,06	14,27	± 0,06	13,6	± 0,1	13,0	± 0,5	12,12	± 0,09	11,40	± 0,06
		21,87	± 0,03	18,99	± 0,06	17,70	± 0,05	16,6	± 0,1	15,74	± 0,04	15,0	± 0,5	14,17	± 0,08	13,27	± 0,05
				22,08	± 0,02	20,50	± 0,04	19,2	± 0,1	18,1	± 0,1	17,0	± 0,6	16,07	± 0,04	15,40	± 0,04
												19,3	± 0,4	17,96	± 0,03		
														20,10	± 0,04		

A.4.3 CAMPAÑA 2 EN GOMA XANTHAN

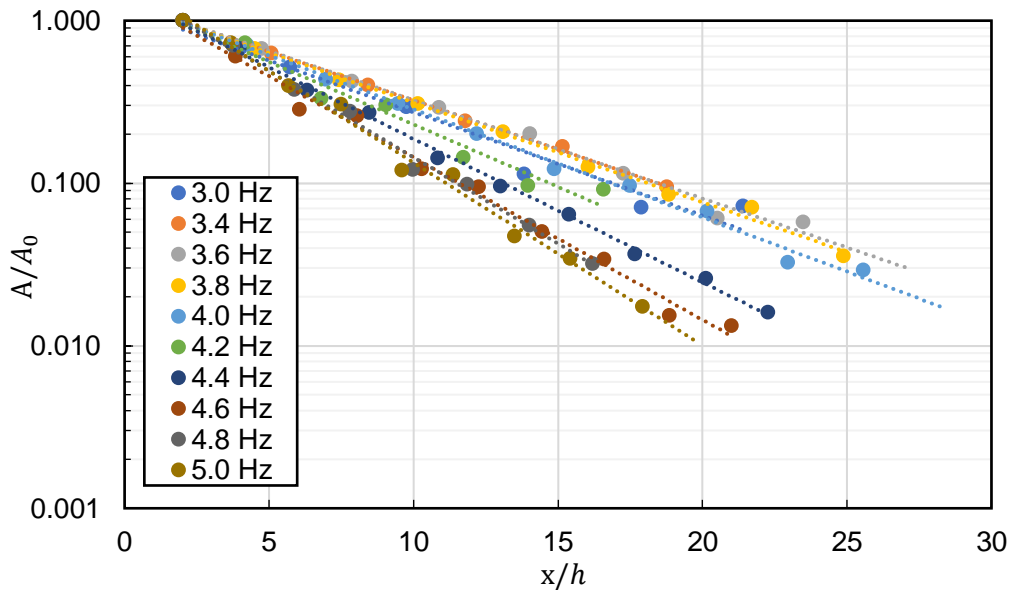


Figura A 9.52: Variación de la amplitud en función de la posición para campaña 1 en goma xanthan.

Tabla A 9.12: Valor A_0 por experimento para campaña 2 en goma xanthan en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).

Valor A_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	0,739 ± 0,005	1,038 ± 0,006	1,265 ± 0,006	1,390 ± 0,008	1,484 ± 0,007
3.4 Hz	0,798 ± 0,007	1,046 ± 0,008	1,198 ± 0,007	1,291 ± 0,008	1,363 ± 0,006
3.6 Hz	0,791 ± 0,006	1,018 ± 0,006	1,120 ± 0,005	1,198 ± 0,009	1,272 ± 0,006
3.8 Hz	0,758 ± 0,004	0,977 ± 0,004	1,051 ± 0,007	1,156 ± 0,006	1,223 ± 0,006
4.0 Hz	0,698 ± 0,004	0,881 ± 0,006	0,943 ± 0,007	1,065 ± 0,005	1,002 ± 0,007
4.2 Hz	0,650 ± 0,004	0,730 ± 0,009	0,82 ± 0,01	0,920 ± 0,008	0,94 ± 0,02
4.4 Hz	0,528 ± 0,006	0,628 ± 0,005	0,739 ± 0,005	0,872 ± 0,006	0,851 ± 0,008
4.6 Hz	0,470 ± 0,007	0,554 ± 0,006	0,667 ± 0,006	0,789 ± 0,007	0,725 ± 0,008
4.8 Hz	0,413 ± 0,005	0,468 ± 0,005	0,605 ± 0,006	0,703 ± 0,007	0,63 ± 0,01
5.0 Hz	0,363 ± 0,005	0,409 ± 0,005	0,536 ± 0,005	0,573 ± 0,009	0,530 ± 0,009

Tabla A 9.13: Valor A/A_0 para campaña 2 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,000 ± 0,006	1,000 ± 0,007	1,000 ± 0,007	1,000 ± 0,005	1,000 ± 0,006	1,00 ± 0,01	1,000 ± 0,006	1,000 ± 0,007	1,000 ± 0,008	1,000 ± 0,007
0,52 ± 0,01	0,63 ± 0,02	0,67 ± 0,01	0,674 ± 0,009	0,71 ± 0,05	0,73 ± 0,01	0,67 ± 0,03	0,6 ± 0,1	0,70 ± 0,05	0,73 ± 0,05
0,29 ± 0,02	0,40 ± 0,02	0,42 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,44 ± 0,02	0,33 ± 0,02	0,37 ± 0,01	0,3 ± 0,1	0,38 ± 0,02	0,40 ± 0,02
0,11 ± 0,03	0,241 ± 0,009	0,292 ± 0,005	0,309 ± 0,004	0,309 ± 0,003	0,303 ± 0,009	0,27 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,28 ± 0,02	0,31 ± 0,02
0,07 ± 0,01	0,17 ± 0,02	0,20 ± 0,02	0,21 ± 0,02	0,20 ± 0,02	0,14 ± 0,02	0,143 ± 0,009	0,122 ± 0,007	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01
0,07 ± 0,04	0,094 ± 0,002	0,115 ± 0,006	0,126 ± 0,008	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,03	0,10 ± 0,01	0,095 ± 0,005	0,099 ± 0,009	0,11 ± 0,01
	0,040 ± 0,006	0,061 ± 0,006	0,085 ± 0,006	0,096 ± 0,009	0,09 ± 0,02	0,064 ± 0,003	0,050 ± 0,002	0,05 ± 0,02	0,047 ± 0,005
	0,05 ± 0,01	0,058 ± 0,003	0,071 ± 0,007	0,067 ± 0,001	0,17 ± 0,09	0,037 ± 0,003	0,034 ± 0,003	0,032 ± 0,003	0,034 ± 0,002
			0,036 ± 0,003	0,033 ± 0,004			0,015 ± 0,001	0,022 ± 0,005	0,017 ± 0,006
				0,03 ± 0,02					

Tabla A 9.14: Valor x/h para campaña 2 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
2,02 ± 0,01	2,021 ± 0,003	2,00 ± 0,03	2,018 ± 0,009	2,019 ± 0,005	2,023 ± 0,005	2,021 ± 0,002	2,019 ± 0,006	2,018 ± 0,007	2,03 ± 0,02
5,72 ± 0,03	5,08 ± 0,03	4,74 ± 0,05	4,49 ± 0,04	4,24 ± 0,06	4,18 ± 0,03	3,96 ± 0,03	3,84 ± 0,03	3,75 ± 0,02	3,67 ± 0,04
9,75 ± 0,09	8,41 ± 0,03	7,87 ± 0,05	7,41 ± 0,03	6,95 ± 0,04	6,80 ± 0,03	6,32 ± 0,03	6,06 ± 0,08	5,87 ± 0,01	5,68 ± 0,04
13,8 ± 0,3	11,80 ± 0,05	10,89 ± 0,06	10,15 ± 0,04	9,47 ± 0,04	9,04 ± 0,04	8,47 ± 0,03	8,0 ± 0,1	7,80 ± 0,02	7,49 ± 0,05
17,88 ± 0,02	15,16 ± 0,07	14,02 ± 0,09	13,09 ± 0,03	12,18 ± 0,06	11,72 ± 0,03	10,84 ± 0,04	10,3 ± 0,1	9,97 ± 0,04	9,60 ± 0,07
21,4 ± 0,2	18,8 ± 0,1	17,26 ± 0,06	16,04 ± 0,08	14,86 ± 0,09	13,96 ± 0,04	13,00 ± 0,02	12,3 ± 0,2	11,85 ± 0,03	11,36 ± 0,04
		20,51 ± 0,07	18,84 ± 0,06	17,48 ± 0,06	16,560 ± 0,001	15,38 ± 0,06	14,4 ± 0,2	14,00 ± 0,03	13,5 ± 0,1
		23,5 ± 0,1	21,72 ± 0,03	20,16 ± 0,06		17,66 ± 0,07	16,6 ± 0,1	16,2 ± 0,1	15,42 ± 0,04
		27,081 ± 0,005	24,88 ± 0,05	22,95 ± 0,07		20,12 ± 0,06	18,8 ± 0,2		17,9 ± 0,3
				25,57 ± 0,09			21,00 ± 0,07		

A.4.4 CAMPAÑA 3 EN GOMA XANTHAN

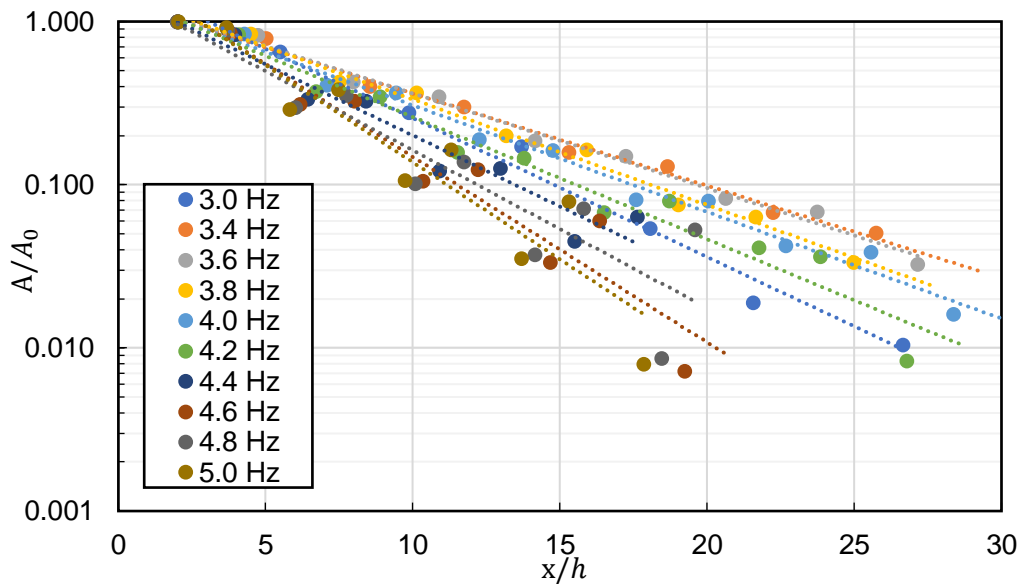


Figura A 9.53: Variación de la amplitud en función de la posición para campaña 3 en goma xanthan.

Tabla A 9.15: Valor A_0 por experimento para campaña 3 en goma xanthan en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).

Valor A_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	0,685 ± 0,003	0,927 ± 0,005	1,186 ± 0,004	1,299 ± 0,005	1,422 ± 0,006
3.4 Hz	0,735 ± 0,004	0,956 ± 0,004	1,163 ± 0,004	1,208 ± 0,006	1,279 ± 0,007
3.6 Hz	0,746 ± 0,004	0,968 ± 0,003	1,111 ± 0,004	1,152 ± 0,003	1,201 ± 0,004
3.8 Hz	0,748 ± 0,004	0,935 ± 0,004	1,041 ± 0,004	1,114 ± 0,006	1,190 ± 0,004
4.0 Hz	0,690 ± 0,004	0,863 ± 0,003	0,955 ± 0,005	1,053 ± 0,005	1,156 ± 0,005
4.2 Hz	0,633 ± 0,004	0,777 ± 0,004	0,855 ± 0,004	0,986 ± 0,005	1,070 ± 0,005
4.4 Hz	0,558 ± 0,004	0,674 ± 0,004	0,768 ± 0,004	0,902 ± 0,004	0,942 ± 0,005
4.6 Hz	0,501 ± 0,003	0,587 ± 0,003	0,700 ± 0,004	0,825 ± 0,006	0,786 ± 0,007
4.8 Hz	0,448 ± 0,003	0,496 ± 0,003	0,631 ± 0,004	0,727 ± 0,007	0,61 ± 0,01
5.0 Hz	0,391 ± 0,003	0,429 ± 0,003	0,568 ± 0,004	0,64 ± 0,01	

Tabla A 9.16: Valor A/A_0 para campaña 3 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz		3.4 Hz		3.6 Hz		3.8 Hz		4.0 Hz		4.2 Hz		4.4 Hz		4.6 Hz		4.8 Hz		5.0 Hz	
1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	1,00	± 0,01	1,00	± 0,01
0,65	± 0,04	0,79	± 0,03	0,83	± 0,02	0,84	± 0,01	0,84	± 0,02	0,83	± 0,03	0,83	± 0,04	0,85	± 0,05	0,89	± 0,05	0,92	± 0,07
0,28	± 0,01	0,40	± 0,01	0,43	± 0,01	0,43	± 0,01	0,41	± 0,01	0,37	± 0,02	0,34	± 0,01	0,31	± 0,01	0,30	± 0,01	0,29	± 0,01
0,17	± 0,01	0,30	± 0,01	0,35	± 0,01	0,36	± 0,01	0,37	± 0,01	0,35	± 0,01	0,33	± 0,02	0,33	± 0,02	0,35	± 0,02	0,38	± 0,04
0,05	± 0,01	0,16	± 0,01	0,19	± 0,01	0,20	± 0,01	0,19	± 0,02	0,16	± 0,02	0,12	± 0,00	0,11	± 0,01	0,10	± 0,02	0,11	± 0,01
0,02	± 0,01	0,13	± 0,01	0,15	± 0,00	0,16	± 0,02	0,16	± 0,02	0,15	± 0,02	0,13	± 0,01	0,12	± 0,01	0,14	± 0,01	0,16	± 0,02
0,01	± 0,01	0,07	± 0,01	0,08	± 0,01	0,08	± 0,02	0,08	± 0,02	0,07	± 0,02	0,05	± 0,01	0,03	± 0,02	0,04	± 0,00	0,04	± 0,02
0,03	± 0,01	0,05	± 0,02	0,07	± 0,02	0,06	± 0,02	0,08	± 0,02	0,08	± 0,02	0,06	± 0,02	0,06	± 0,02	0,07	± 0,01	0,08	± 0,02
0,02	± 0,01			0,03	± 0,02	0,03	± 0,01	0,04	± 0,02	0,04	± 0,02	0,01	± 0,02	0,01	± 0,02	0,01	± 0,02	0,01	± 0,01
0,06	± 0,03							0,04	± 0,02	0,04	± 0,02					0,05	± 0,02		
0,06	± 0,02							0,02	± 0,02	0,01	± 0,02					0,02	± 0,02		
0,03	± 0,01																		

Tabla A 9.17: Valor x/h para campaña 3 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz		3.4 Hz		3.6 Hz		3.8 Hz		4.0 Hz		4.2 Hz		4.4 Hz		4.6 Hz		4.8 Hz		5.0 Hz	
2,03	± 0,01	2,02	± 0,02	2,02	± 0,05	2,02	± 0,02	2,01	± 0,01	2,02	± 0,02	2,02	± 0,01	2,01	± 0,01	2,01	± 0,01	2,04	± 0,02
5,50	± 0,04	5,02	± 0,02	4,74	± 0,05	4,50	± 0,01	4,28	± 0,02	4,10	± 0,02	3,95	± 0,01	3,81	± 0,03	3,73	± 0,01	3,67	± 0,02
9,87	± 0,06	8,55	± 0,04	7,97	± 0,04	7,50	± 0,01	7,08	± 0,01	6,72	± 0,01	6,44	± 0,02	6,17	± 0,07	6,04	± 0,05	5,84	± 0,02
13,69	± 0,06	11,73	± 0,03	10,90	± 0,05	10,13	± 0,01	9,44	± 0,02	8,89	± 0,01	8,42	± 0,02	8,0	± 0,1	7,74	± 0,02	7,48	± 0,03
18,08	± 0,05	15,31	± 0,04	14,15	± 0,04	13,17	± 0,02	12,26	± 0,01	11,52	± 0,02	10,91	± 0,04	10,4	± 0,1	10,09	± 0,03	9,75	± 0,02
21,6	± 0,2	18,66	± 0,05	17,24	± 0,03	15,91	± 0,03	14,77	± 0,02	13,80	± 0,01	12,98	± 0,02	12,2	± 0,2	11,75	± 0,03	11,31	± 0,01
26,7	± 0,6	22,24	± 0,06	20,65	± 0,09	19,03	± 0,06	17,59	± 0,04	16,51	± 0,05	15,50	± 0,06	14,7	± 0,2	14,16	± 0,07	13,70	± 0,03
		25,7	± 0,1	23,7	± 0,1	21,66	± 0,06	20,04	± 0,02	18,73	± 0,01	17,64	± 0,05	16,4	± 0,3	15,82	± 0,08	15,30	± 0,06
		29,3	± 0,2	27,2	± 0,1	25,0	± 0,1	22,67	± 0,06	21,76	± 0,08			19,2	± 0,6	18,5	± 0,2	17,86	± 0,13
						27,64	± 0,03	25,56	± 0,05	23,85	± 0,05			20,7	± 0,6	19,60	± 0,03		
								28,4	± 0,1	26,8	± 0,3								
								30,57	± 0,03	28,7	± 0,3								

A.4.5 CAMPAÑA EN GLICERINA 70%

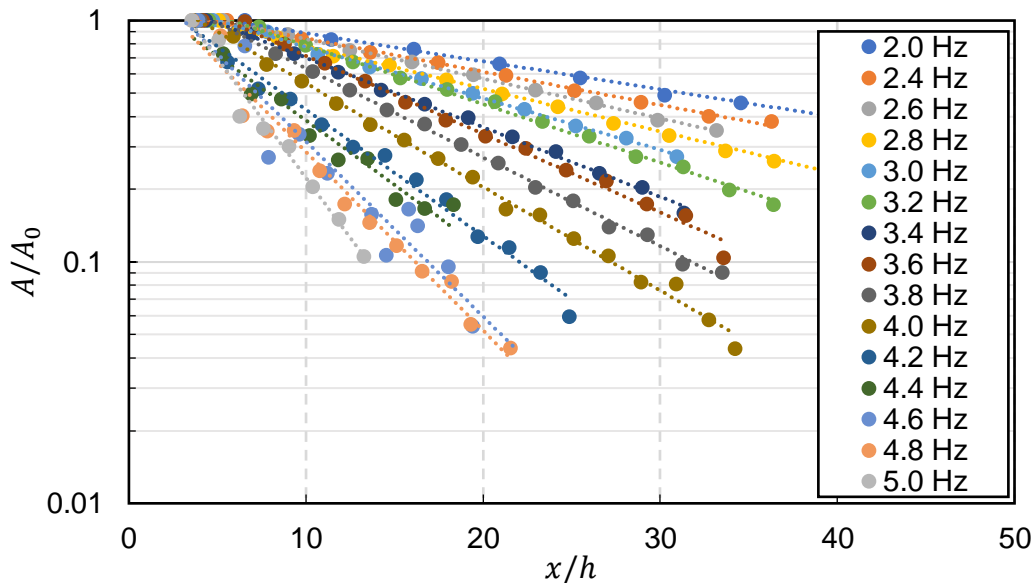


Figura A 9.54: Variación de la amplitud en función de la posición para experimentos en glicerina 70%.

Tabla A 9.18: Valor A_0 por experimento para campaña en Glicerina 70% en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).

Valor A_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta			
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm
2.0 Hz	0,76 ± 0,04	1,14 ± 0,04	1,49 ± 0,04	1,74 ± 0,04
2.4 Hz	0,84 ± 0,04	1,28 ± 0,04	1,45 ± 0,04	1,31 ± 0,03
2.6 Hz	0,81 ± 0,01	1,20 ± 0,02	1,21 ± 0,02	1,02 ± 0,02
2.8 Hz	0,80 ± 0,04	1,14 ± 0,04	0,97 ± 0,03	0,91 ± 0,03
3.0 Hz	0,74 ± 0,04	0,94 ± 0,04	0,77 ± 0,03	0,79 ± 0,04
3.2 Hz	0,68 ± 0,04	0,70 ± 0,06	0,61 ± 0,04	0,54 ± 0,03
3.4 Hz	0,60 ± 0,03	0,70 ± 0,03	0,49 ± 0,04	0,44 ± 0,04
3.6 Hz	0,50 ± 0,01	0,47 ± 0,01	0,26 ± 0,03	0,31 ± 0,03
3.8 Hz	0,39 ± 0,03	0,40 ± 0,03	0,21 ± 0,04	0,24 ± 0,03
4.0 Hz	0,28 ± 0,03	0,30 ± 0,03	0,15 ± 0,03	0,22 ± 0,03
4.2 Hz	0,18 ± 0,04	0,20 ± 0,04	0,16 ± 0,02	0,18 ± 0,03
4.4 Hz	0,11 ± 0,03	0,14 ± 0,04	0,08 ± 0,03	0,16 ± 0,03
4.6 Hz	0,05 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,18 ± 0,03	
4.8 Hz	0,20 ± 0,03	0,19 ± 0,02	0,27 ± 0,03	
5.0 Hz	0,15 ± 0,02	0,16 ± 0,03	0,17 ± 0,02	

Tabla A 9.19: Valor A/A_0 para campaña de experimentos glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.

2.0 hz			2.4 hz			2.6 hz			2.8 hz			3.0 hz			3.2 hz			3.4 hz		
1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,02	1,00	±	0,03
0,835	±	0,004	0,84	±	0,01	0,87	±	0,04	0,85	±	0,02	0,89	±	0,03	0,94	±	0,06	0,9	±	0,1
0,76	±	0,01	0,74	±	0,01	0,75	±	0,03	0,71	±	0,01	0,73	±	0,03	0,79	±	0,05	0,73	±	0,07
0,659	±	0,007	0,67	±	0,01	0,67	±	0,03	0,65	±	0,02	0,64	±	0,02	0,67	±	0,04	0,61	±	0,04
0,580	±	0,008	0,59	±	0,01	0,59	±	0,03	0,57	±	0,02	0,58	±	0,02	0,58	±	0,03	0,51	±	0,04
0,491	±	0,005	0,51	±	0,01	0,52	±	0,02	0,50	±	0,01	0,50	±	0,02	0,52	±	0,03	0,45	±	0,03
0,455	±	0,008	0,46	±	0,01	0,46	±	0,02	0,44	±	0,02	0,43	±	0,02	0,46	±	0,03	0,39	±	0,03
0,425	±	0,005	0,40	±	0,02	0,39	±	0,01	0,38	±	0,01	0,37	±	0,01	0,38	±	0,02	0,33	±	0,03
			0,38	±	0,02	0,349	±	0,004	0,334	±	0,007	0,32	±	0,01	0,33	±	0,02	0,29	±	0,03
									0,29	±	0,01	0,27	±	0,01	0,27	±	0,01	0,23	±	0,01
															0,25	±	0,01	0,20	±	0,02
															0,199	±	0,009	0,16	±	0,02

3.6 hz			3.8 hz			4.0 hz			4.2 hz			4.4 hz			4.6 hz			4.8 hz			5.0 hz		
1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,02
1,0	±	0,2	0,9	±	0,2	0,9	±	0,2	0,68	±	0,07	0,7	±	0,3	0,8	±	0,2	0,9	±	0,2	0,83	±	0,09
0,8	±	0,1	0,7	±	0,1	0,66	±	0,09	0,520	±	0,04	0,50	±	0,04	0,3	±	0,2	0,4	±	0,1	0,40	±	0,06
0,67	±	0,09	0,62	±	0,09	0,56	±	0,07	0,47	±	0,02	0,472	±	0,103	0,3	±	0,1	0,3	±	0,1	0,36	±	0,05
0,56	±	0,07	0,51	±	0,07	0,45	±	0,05	0,37	±	0,02	0,33	±	0,06	0,2	±	0,1	0,35	±	0,05	0,30	±	0,04
0,46	±	0,05	0,43	±	0,06	0,37	±	0,05	0,30	±	0,02	0,26	±	0,05	0,16	±	0,06	0,24	±	0,05	0,20	±	0,03
0,39	±	0,05	0,37	±	0,05	0,32	±	0,04	0,28	±	0,01	0,27	±	0,05	0,17	±	0,05	0,17	±	0,05	0,15	±	0,02
0,33	±	0,05	0,31	±	0,04	0,27	±	0,04	0,22	±	0,02	0,18	±	0,03	0,11	±	0,04	0,15	±	0,02	0,11	±	0,02
0,30	±	0,05	0,26	±	0,04	0,22	±	0,03	0,18	±	0,02	0,17	±	0,02	0,14	±	0,04	0,12	±	0,03			
0,24	±	0,04	0,20	±	0,02	0,17	±	0,02	0,127	±	0,005	0,17	±	0,05	0,10	±	0,03	0,09	±	0,02			
0,22	±	0,04	0,18	±	0,03	0,16	±	0,03	0,115	±	0,000				0,054	±	0,005	0,08	±	0,01			
0,17	±	0,02	0,14	±	0,02	0,125	±	0,009	0,091	±	0,000							0,055	±	0,009			
0,156	±	0,002	0,13	±	0,02	0,11	±	0,02	0,059	±	0,000												
			0,10	±	0,02	0,08	±	0,01															
						0,08	±	0,02															

Tabla A 9.20: Valor x/h para campaña 3 de experimentos en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

2.0 hz			2.4 hz			2.6 hz			2.8 hz			3.0 hz			3.2 hz			3.4 hz		
6,5	±	0,1	5,6	±	0,2	5,30	±	0,05	5,05	±	0,07	4,73	±	0,04	4,51	±	0,04	4,331	±	0,007
11,44	±	0,04	9,78	±	0,05	8,97	±	0,05	8,38	±	0,06	7,82	±	0,01	7,33	±	0,02	6,91	±	0,05
16,08	±	0,08	13,63	±	0,09	12,47	±	0,05	11,55	±	0,04	10,686	±	0,004	9,97	±	0,02	9,34	±	0,06
20,9	±	0,1	17,46	±	0,07	15,97	±	0,05	14,70	±	0,06	13,585	±	0,002	12,65	±	0,02	11,81	±	0,06
25,47	±	0,05	21,28	±	0,08	19,47	±	0,04	17,91	±	0,05	16,53	±	0,01	15,32	±	0,02	14,26	±	0,07
30,3	±	0,1	25,15	±	0,10	22,96	±	0,04	21,06	±	0,05	19,43	±	0,02	17,98	±	0,01	16,70	±	0,05
34,55	±	0,07	28,90	±	0,09	26,39	±	0,04	24,22	±	0,06	22,32	±	0,01	20,69	±	0,03	19,17	±	0,06
39,29	±	0,08	32,7	±	0,1	29,87	±	0,06	27,38	±	0,06	25,21	±	0,01	23,34	±	0,02	21,6	±	0,1
			36,28	±	0,05	33,170	±	0,006	30,49	±	0,08	28,09	±	0,02	25,99	±	0,02	24,1	±	0,1
									33,69	±	0,08	30,95	±	0,02	28,63	±	0,02	26,6	±	0,1
															31,294	±	0,005	29,0	±	0,1
															33,89	±	0,02	31,3	±	0,1

3.6 hz			3.8 hz			4.0 hz			4.2 hz			4.4 hz			4.6 hz			4.8 hz			5.0 hz		
4,15	±	0,07	4,03	±	0,04	3,89	±	0,03	3,80	±	0,03	3,7	±	0,1	3,9	±	0,3	3,6	±	0,1	3,5	±	0,1
6,55	±	0,06	6,189	±	0,004	5,91	±	0,02	5,57	±	0,03	5,32	±	0,05	7	±	1	5,2	±	0,2	5,1	±	0,3
8,79	±	0,07	8,27	±	0,03	7,80	±	0,03	7,30	±	0,06	6,91	±	0,07	8	±	1	6,4	±	0,1	6,3	±	0,2
11,08	±	0,06	10,39	±	0,03	9,76	±	0,02	9,13	±	0,05	8,61	±	0,01	10	±	1	7,8	±	0,1	7,6	±	0,2
13,35	±	0,06	12,49	±	0,03	11,70	±	0,01	10,88	±	0,07	10,21	±	0,03	11	±	1	9,3	±	0,2	9,1	±	0,3
15,6	±	0,1	14,58	±	0,04	13,62	±	0,03	12,64	±	0,06	11,834	±	0,006	14	±	2	10,8	±	0,2	10,4	±	0,3
17,9	±	0,1	16,69	±	0,05	15,53	±	0,04	14,48	±	0,06	13,48	±	0,07	16	±	3	12,2	±	0,2	11,9	±	0,4
20,15	±	0,10	18,78	±	0,05	17,47	±	0,06	16,24	±	0,03	15,09	±	0,02	14,5	±	0,3	13,6	±	0,2	13,3	±	0,5
22,42	±	0,09	20,87	±	0,08	19,41	±	0,08	17,9	±	0,1	16,70	±	0,06	16,3	±	0,3	15,1	±	0,3			
24,67	±	0,09	23,0	±	0,1	21,29	±	0,08	19,691	±	0,002	18,34	±	0,08	18,0	±	0,3	16,6	±	0,3			
27,0	±	0,1	25,1	±	0,2	23,2	±	0,1	21,479	±	0,000				19,4	±	0,4	18,2	±	0,4			
29,2	±	0,1	27,1	±	0,1	25,1	±	0,1	23,242	±	0,000							19,3	±	0,2			
31,5	±	0,0	29,3	±	0,2	27,1	±	0,2	24,863	±	0,000												
			31,3	±	0,3	28,9	±	0,1															

A.4.6 CAMPAÑA EN AGUA DESTILADA

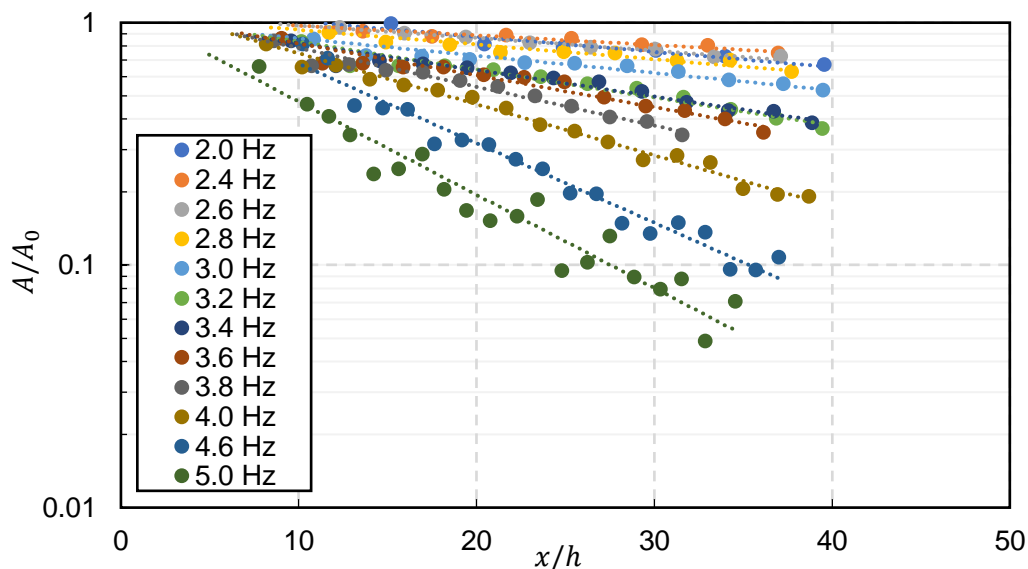


Figura A 9.55: Variación de la amplitud en función de la posición para experimentos en agua

Tabla A 9.21: Valor A_0 por experimento para campaña en agua destilada en función de la frecuencia (Hz) y amplitud de carrera de paleta aplicada (cm).

Valor A_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de la paleta			
	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm
2.0 Hz	0,53 ± 0,01	0,89 ± 0,01	1,27 ± 0,03	1,64 ± 0,01
2.4 Hz	0,52 ± 0,01	1,11 ± 0,01	1,68 ± 0,03	2,08 ± 0,02
2.6 Hz	0,55 ± 0,01	1,06 ± 0,01	1,71 ± 0,01	2,26 ± 0,02
2.8 Hz	0,67 ± 0,01	1,19 ± 0,01	1,65 ± 0,01	2,15 ± 0,01
3.0 Hz	0,69 ± 0,01	1,53 ± 0,01	1,96 ± 0,02	2,22 ± 0,02
3.2 Hz	0,61 ± 0,01	1,29 ± 0,01	1,71 ± 0,02	2,01 ± 0,02
3.4 Hz	0,62 ± 0,01	1,17 ± 0,01	1,49 ± 0,02	1,68 ± 0,03
3.6 Hz	0,62 ± 0,00	1,07 ± 0,01	1,33 ± 0,02	1,50 ± 0,02
3.8 Hz	0,55 ± 0,01	0,93 ± 0,01	1,07 ± 0,02	1,22 ± 0,02
4.0 Hz	0,54 ± 0,01	0,76 ± 0,01	0,91 ± 0,02	1,26 ± 0,04
4.6 Hz	0,28 ± 0,02	0,47 ± 0,05	0,58 ± 0,01	0,52 ± 0,01
5.0 Hz	0,19 ± 0,03	0,32 ± 0,01	0,38 ± 0,01	

Tabla A 9.22: Valor A/A_0 para campaña de experimentos glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.

2.0 hz			2.4 hz			2.6 hz			2.8 hz			3.0 hz			3.2 hz		
1,00	±	0,02	1,00	±	0,02	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01
0,98	±	0,02	0,92	±	0,03	0,95	±	0,05	0,88	±	0,07	0,85	±	0,07	0,82	±	0,09
0,81	±	0,02	0,87	±	0,08	0,9	±	0,1	0,81	±	0,09	0,7	±	0,1	0,7	±	0,2
0,77	±	0,01	0,9	±	0,1	0,87	±	0,10	0,79	±	0,10	0,7	±	0,1	0,7	±	0,1
0,75	±	0,02	0,9	±	0,1	0,82	±	0,09	0,7	±	0,1	0,7	±	0,2	0,7	±	0,1
0,71	±	0,02	0,8	±	0,1	0,79	±	0,09	0,7	±	0,1	0,7	±	0,1	0,6	±	0,1
0,66	±	0,02	0,8	±	0,1	0,77	±	0,10	0,7	±	0,1	0,7	±	0,1	0,6	±	0,1
0,90	±	0,03	0,7	±	0,1	0,72	±	0,07	0,7	±	0,1	0,7	±	0,1	0,6	±	0,1
			0,7	±	0,1	0,72	±	0,09	0,7	±	0,2	0,6	±	0,1	0,5	±	0,1
						0,72	±	0,09	0,6	±	0,2	0,6	±	0,1	0,5	±	0,1
									0,6	±	0,2	0,6	±	0,1	0,4	±	0,1
												0,5	±	0,2	0,4	±	0,1
															0,36	±	0,09

3.4 hz			3.6 hz			3.8 hz			4.0 hz			4.6 hz			5.0 hz		
1,000	±	0,009	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01	1,00	±	0,01
0,84	±	0,07	0,84	±	0,09	0,84	±	0,05	0,81	±	0,06	0,889	±	0,001	0,8	±	0,2
0,7	±	0,2	0,7	±	0,2	0,7	±	0,1	0,7	±	0,1	0,6	±	0,4	0,6	±	0,2
0,7	±	0,1	0,7	±	0,1	0,7	±	0,1	0,7	±	0,2	0,7	±	0,1	0,8	±	0,1
0,7	±	0,1	0,6	±	0,1	0,6	±	0,1	0,6	±	0,1	0,7	±	0,1	0,5	±	0,1
0,7	±	0,1	0,6	±	0,1	0,6	±	0,1	0,6	±	0,1	0,4	±	0,2	0,4	±	0,1
0,6	±	0,1	0,6	±	0,1	0,6	±	0,1	0,5	±	0,2	0,4	±	0,1	0,3	±	0,1
0,6	±	0,2	0,6	±	0,2	0,5	±	0,1	0,5	±	0,1	0,4	±	0,1	0,23	±	0,05
0,6	±	0,2	0,6	±	0,2	0,5	±	0,1	0,4	±	0,1	0,3	±	0,1	0,27	±	0,08
0,5	±	0,1	0,5	±	0,1	0,5	±	0,1	0,4	±	0,1	0,3	±	0,1	0,308	±	0,115
0,5	±	0,1	0,4	±	0,1	0,4	±	0,1	0,4	±	0,1	0,29	±	0,08	0,20	±	0,06
0,4	±	0,1	0,4	±	0,1	0,4	±	0,1	0,3	±	0,1	0,26	±	0,10	0,16	±	0,05
0,4	±	0,1	0,4	±	0,1	0,34	±	0,09	0,27	±	0,09	0,2	±	0,1	0,15	±	0,03
0,39	±	0,08	0,3	±	0,1				0,29	±	0,09	0,19	±	0,07	0,18	±	0,10
									0,3	±	0,1	0,2	±	0,1	0,2	±	0,1
									0,21	±	0,08	0,14	±	0,07	0,09	±	0,02
									0,19	±	0,08	0,13	±	0,07	0,10	±	0,03
									0,19	±	0,08	0,15	±	0,07	0,14	±	0,08
												0,13	±	0,05	0,10	±	0,05
												0,09	±	0,06	0,08	±	0,04
												0,10	±	0,09			
												0,10	±	0,03			

Tabla A 9.23: Valor x/h para campaña de experimentos en agua destilada en función de la frecuencia aplicada.

2.0 hz			2.4 hz			2.6 hz			2.8 hz			3.0 hz			3.2 hz		
11,5	±	0,2	9,68	±	0,09	8,96	±	0,10	8,4	±	0,1	8,0	±	0,2	7,5	±	0,2
15,2	±	0,2	13,6	±	0,3	12,32	±	0,09	11,7	±	0,2	10,8	±	0,2	10,2	±	0,2
20,5	±	0,2	17,5	±	0,2	15,9	±	0,2	14,9	±	0,3	13,8	±	0,3	12,9	±	0,3
24,9	±	0,1	21,7	±	0,3	19,4	±	0,2	18,5	±	0,4	16,9	±	0,3	15,6	±	0,3
30,1	±	0,3	25,4	±	0,3	23,0	±	0,2	21,4	±	0,3	19,6	±	0,3	18,2	±	0,3
34,0	±	0,2	29,3	±	0,2	26,4	±	0,1	24,9	±	0,3	22,7	±	0,3	21,0	±	0,3
39,6	±	0,5	33,0	±	0,1	30,1	±	0,2	27,8	±	0,3	25,5	±	0,3	23,6	±	0,3
			37,0	±	0,1	33,4	±	0,2	31,3	±	0,2	28,5	±	0,2	26,3	±	0,4
						37,1	±	0,2	34,3	±	0,3	31,4	±	0,2	29,0	±	0,4
									37,7	±	0,3	34,2	±	0,2	31,7	±	0,4
												37,3	±	0,4	34,3	±	0,3
												39,5	±	0,100	36,9	±	0,3
															39,47	±	0,06
3.4 hz			3.6 hz			3.8 hz			4.0 hz			4.6 hz			5.0 hz		
7,1	±	0,2	6,8	±	0,3	6,5	±	0,3	6,3	±	0,3	5,6	±	0,3	4,96	±	0,08
9,6	±	0,2	9,0	±	0,3	8,6	±	0,3	8,2	±	0,4	6,9	±	0,1	6,2	±	0,1
12,1	±	0,3	11,3	±	0,3	10,7	±	0,3	10,2	±	0,4	8,6	±	0,2	7,8	±	0,2
14,5	±	0,3	13,6	±	0,3	12,8	±	0,3	12,1	±	0,4	10,2	±	0,3	9,1	±	0,3
17,0	±	0,3	15,9	±	0,3	14,9	±	0,3	14,0	±	0,3	11,6	±	0,2	10,5	±	0,3
19,5	±	0,3	18,1	±	0,3	17,0	±	0,3	15,9	±	0,3	13,1	±	0,2	11,72	±	0,09
21,9	±	0,3	20,4	±	0,3	19,1	±	0,3	17,8	±	0,3	14,7	±	0,2	12,9	±	0,1
24,4	±	0,3	22,7	±	0,3	21,2	±	0,3	19,8	±	0,3	16,1	±	0,2	14,21	±	0,09
26,9	±	0,2	24,9	±	0,3	23,3	±	0,3	21,7	±	0,3	17,6	±	0,2	15,6	±	0,2
29,3	±	0,2	27,2	±	0,2	25,3	±	0,3	23,6	±	0,3	19,2	±	0,2	17,0	±	0,1
31,8	±	0,2	29,5	±	0,2	27,5	±	0,3	25,5	±	0,3	20,7	±	0,2	18,17	±	0,09
34,2	±	0,2	31,7	±	0,2	29,6	±	0,3	27,4	±	0,3	22,2	±	0,1	19,4	±	0,1
36,7	±	0,2	34,0	±	0,2	31,6	±	0,3	29,4	±	0,2	23,7	±	0,2	20,8	±	0,1
38,9	±	0,2	36,2	±	0,2				31,3	±	0,2	25,3	±	0,2	22,3	±	0,1
									33,2	±	0,2	26,8	±	0,2	23,4	±	0,1
									35,0	±	0,2	28,2	±	0,1	24,8	±	0,2
									36,9	±	0,2	29,77	±	0,09	26,2	±	0,1
									38,7	±	0,20	31,4	±	0,1	27,5	±	0,2
												32,9	±	0,2	28,9	±	0,2
												34,3	±	0,2	30,4	±	0,3
												35,7	±	0,1			
												37,00	±	0,02			

A.5 VARIACIÓN EN LA LONGITUD DE ONDA

A.5.1 PROMEDIO ENTRE CAMPAÑAS GOMA XANTHAN

Tabla A 9.24: Valor λ_0 (cm) promedio entre campaña de experimentos en goma xanthan.

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	19,752 ± 0,006	19,5 ± 0,3	19,3 ± 0,2	19,2 ± 0,2	19,1 ± 0,2
3.4 Hz	16,2 ± 0,1	16,1 ± 0,3	16,0 ± 0,2	16,0 ± 0,2	15,9 ± 0,2
3.6 Hz	14,8 ± 0,1	14,9 ± 0,1	14,8 ± 0,1	14,8 ± 0,1	14,7 ± 0,1
3.8 Hz	13,6 ± 0,1	13,7 ± 0,1	13,7 ± 0,1	13,7 ± 0,2	13,7 ± 0,2
4.0 Hz	12,5 ± 0,1	12,6 ± 0,1	12,7 ± 0,2	12,7 ± 0,3	12,6 ± 0,3
4.2 Hz	11,9 ± 0,1	12,0 ± 0,1	12,0 ± 0,1	11,9 ± 0,2	12,0 ± 0,2
4.4 Hz	10,9 ± 0,2	11,1 ± 0,2	11,2 ± 0,3	11,1 ± 0,3	11,2 ± 0,4
4.6 Hz	10,4 ± 0,2	10,5 ± 0,2	10,5 ± 0,3	10,5 ± 0,3	10,8 ± 0,5
4.8 Hz	9,8 ± 0,2	9,8 ± 0,2	9,8 ± 0,2	9,7 ± 0,2	10,0 ± 0,4
5.0 Hz	9,3 ± 0,2	9,3 ± 0,2	9,2 ± 0,2	9,2 ± 0,1	9,1 ± 0,2

Tabla A 9.25: λ/λ_0 promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,02
1,03 ± 0,02	1,04 ± 0,01	1,04 ± 0,02	1,04 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,02 ± 0,01	1,03 ± 0,02	1,05 ± 0,02	1,03 ± 0,01	1,03 ± 0,01
1,05 ± 0,02	1,05 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,02 ± 0,02	1,05 ± 0,05	1,00 ± 0,01	1,03 ± 0,06	1,04 ± 0,01	1,04 ± 0,01
1,02 ± 0,09	1,09 ± 0,02	1,07 ± 0,02	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,04	1,02 ± 0,01	1,03 ± 0,04	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,01
1,1 ± 0,1	1,10 ± 0,03	1,10 ± 0,01	1,06 ± 0,01	1,06 ± 0,01	1,04 ± 0,03	1,04 ± 0,01	1,06 ± 0,01	1,06 ± 0,02	1,06 ± 0,01
1,06 ± 0,04	1,12 ± 0,03	1,09 ± 0,02	1,05 ± 0,03	1,06 ± 0,01	1,06 ± 0,01	1,05 ± 0,01	1,08 ± 0,08	1,07 ± 0,02	1,09 ± 0,02
	1,16 ± 0,05	1,11 ± 0,01	1,11 ± 0,02	1,14 ± 0,04	1,11 ± 0,01	1,05 ± 0,02	1,15 ± 0,03	1,10 ± 0,04	1,13 ± 0,04
	1,15 ± 0,03	1,22 ± 0,01	1,10 ± 0,01	1,11 ± 0,02	1,09 ± 0,01	1,07 ± 0,05	1,07 ± 0,02	1,07 ± 0,02	1,18 ± 0,03
			1,08 ± 0,01	1,12 ± 0,02		1,13 ± 0,05	1,08 ± 0,03	1,15 ± 0,03	1,19 ± 0,01
			1,17 ± 0,07	1,13 ± 0,01			1,21 ± 0,01	1,11 ± 0,01	1,22 ± 0,01

Tabla A 9.26: x/h promedio entre campañas de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
8,47 ± 0,05	8,42 ± 0,03	7,92 ± 0,05	7,50 ± 0,02	7,08 ± 0,02	6,81 ± 0,03	6,48 ± 0,03	6,25 ± 0,05	5,97 ± 0,09	5,72 ± 0,02
12,4 ± 0,1	11,74 ± 0,04	10,90 ± 0,05	10,14 ± 0,04	9,46 ± 0,04	9,15 ± 0,03	8,67 ± 0,03	8,4 ± 0,1	7,9 ± 0,1	7,49 ± 0,03
16,54 ± 0,05	15,16 ± 0,05	14,09 ± 0,06	13,16 ± 0,03	12,25 ± 0,03	12,7 ± 1,0	10,88 ± 0,04	10,41 ± 0,05	10,07 ± 0,18	9,57 ± 0,03
19,7 ± 0,2	18,7 ± 0,1	17,25 ± 0,05	16,04 ± 0,05	14,92 ± 0,05	13,93 ± 0,08	13,01 ± 0,04	12,4 ± 0,1	11,91 ± 0,05	11,35 ± 0,04
26,5 ± 0,4	22,2 ± 0,1	20,58 ± 0,09	18,95 ± 0,06	17,59 ± 0,05	16,5 ± 0,1	15,44 ± 0,06	14,9 ± 0,1	14,11 ± 0,06	13,50 ± 0,06
28,6 ± 0,5	25,8 ± 0,1	23,68 ± 0,07	21,9 ± 0,1	20,24 ± 0,05	18,92 ± 0,09	17,65 ± 0,07	16,8 ± 0,2	16,0 ± 0,1	15,38 ± 0,06
35,1 ± 0,2	29,9 ± 0,1	27,10 ± 0,09	24,97 ± 0,09	22,9 ± 0,1	21,8 ± 0,1	20,2 ± 0,1	19,7 ± 0,1	18,5 ± 0,1	17,67 ± 0,09
	33,3 ± 0,2	30,3 ± 0,1	27,69 ± 0,08	25,6 ± 0,1	23,88 ± 0,01	21,2 ± 0,1	21,17 ± 0,02	20,28 ± 0,02	19,78 ± 0,07
			30,0 ± 0,2	28,4 ± 0,3	27,1 ± 0,2	24,8 ± 0,2	23,54 ± 0,01	22,81 ± 0,01	22,6 ± 0,5
			33,50 ± 0,03		29,4 ± 0,2	26,9 ± 0,1	26,20 ± 0,02	24,25 ± 0,02	24,4 ± 0,3
						30,8 ± 0,2			26,62 ± 0,02

A.5.2 CAMPAÑA 1 DE EXPERIMENTOS EN GOMA XANTHAN

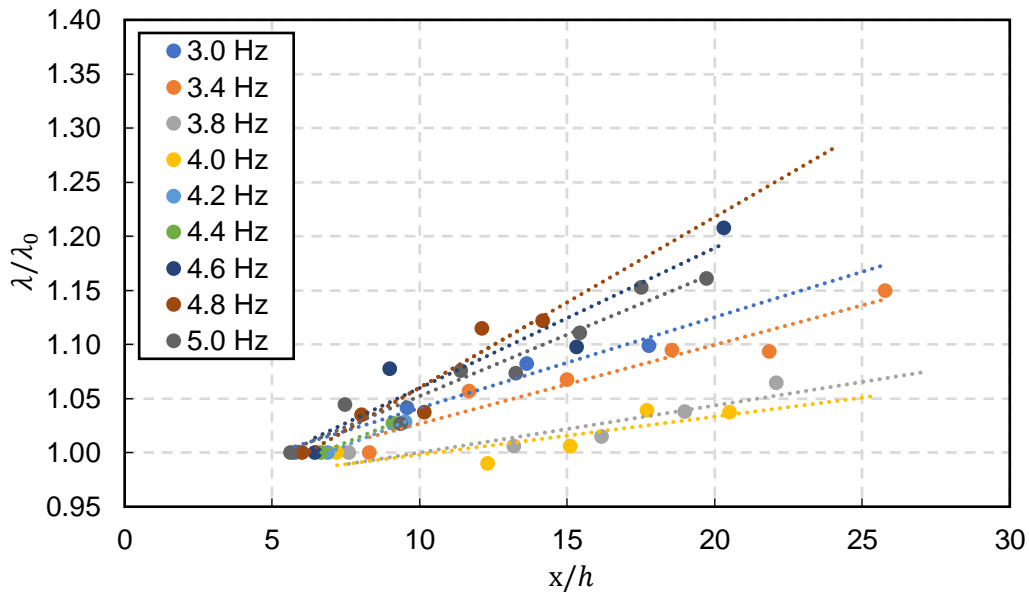


Figura A 9.56: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña 1 de experimentos en goma xanthan.

Tabla A 9.27: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña 1 en goma xanthan.

Frecuencia	Valor λ_0 por experimento (cm)			
	Amplitud de carrera de paleta			
	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	19,08 ± 0,03	18,98 ± 0,04	18,85 ± 0,03	18,79 ± 0,04
3.4 Hz	15,81 ± 0,03	15,70 ± 0,04	15,69 ± 0,03	15,59 ± 0,04
3.8 Hz	13,90 ± 0,03	13,89 ± 0,03	14,00 ± 0,04	13,99 ± 0,03
4.0 Hz	12,81 ± 0,03	12,95 ± 0,04	13,12 ± 0,04	13,04 ± 0,04
4.2 Hz	12,01 ± 0,03	12,16 ± 0,03	12,23 ± 0,04	12,29 ± 0,04
4.4 Hz	11,36 ± 0,04	11,61 ± 0,04	11,63 ± 0,03	11,91 ± 0,03
4.6 Hz	10,79 ± 0,03	11,04 ± 0,03	11,03 ± 0,03	11,44 ± 0,03
4.8 Hz	9,67 ± 0,03	9,63 ± 0,03	9,55 ± 0,03	
5.0 Hz	9,11 ± 0,02	9,11 ± 0,01	9,05 ± 0,01	

Tabla A 9.28: λ/λ_0 campaña 1 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,02
1,04 ± 0,04	1,056 ± 0,009	1,049 ± 0,002	1,039 ± 0,005	1,028 ± 0,009	1,04 ± 0,04	1,03 ± 0,01	1,044 ± 0,003
1,06 ± 0,02	1,067 ± 0,003	1,01 ± 0,01	0,990 ± 0,007	1,06 ± 0,07	1,1 ± 0,2	1,037 ± 0,004	1,027 ± 0,002
0,98 ± 0,08	1,09 ± 0,01	1,015 ± 0,007	1,005 ± 0,003	1,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,11 ± 0,02	1,075 ± 0,006
1,2 ± 0,2	1,093 ± 0,006	1,04 ± 0,01	1,04 ± 0,02	1,10 ± 0,07	1,10 ± 0,02	1,12 ± 0,01	1,07 ± 0,01
	1,15 ± 0,03	1,06 ± 0,01	1,037 ± 0,007		1,2 ± 0,1		1,11 ± 0,02
					1,21 ± 0,05		1,15 ± 0,02
							1,16 ± 0,01

Tabla A 9.29: x/h campaña 1 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
9,627 ± 0,009	8,30 ± 0,03	7,60 ± 0,02	7,20 ± 0,03	6,89 ± 0,03	6,45 ± 0,09	6,0 ± 0,2	5,63 ± 0,02
13,63 ± 0,04	11,69 ± 0,05	10,52 ± 0,06	9,94 ± 0,06	9,51 ± 0,04	9,0 ± 0,3	8,0 ± 0,3	7,48 ± 0,02
17,78 ± 0,06	15,00 ± 0,04	13,21 ± 0,04	12,32 ± 0,02	11,58 ± 0,02	10,46 ± 0,06	10,2 ± 0,5	9,36 ± 0,02
21,95 ± 0,04	18,56 ± 0,01	16,17 ± 0,03	15,12 ± 0,06	14,27 ± 0,06	13,3 ± 0,3	12,12 ± 0,09	11,40 ± 0,06
31,3 ± 0,5	21,87 ± 0,03	18,99 ± 0,06	17,70 ± 0,05	16,6 ± 0,1	15,3 ± 0,2	14,17 ± 0,08	13,27 ± 0,05
	25,8 ± 0,2	22,11 ± 0,05	20,50 ± 0,04		17,5 ± 0,5		15,43 ± 0,05
					20,3 ± 0,1		17,51 ± 0,06
							19,73 ± 0,03

A.5.3 CAMPAÑA 2 DE EXPERIMENTOS EN GOMA XANTHAN

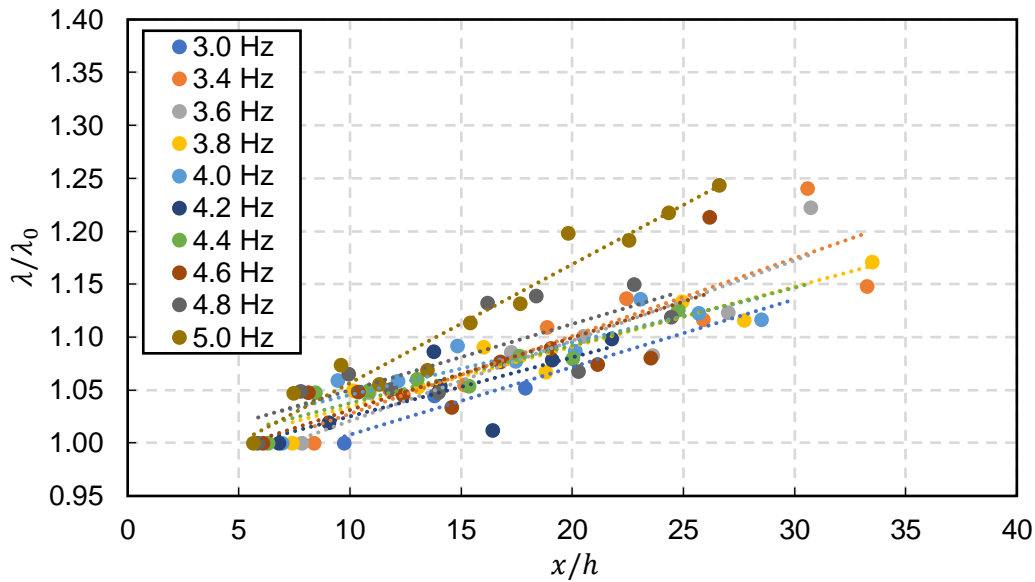


Figura A 9.57: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña 2 de experimentos en goma xanthan.

Tabla A 9.30: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña 2 en goma xanthan.

Valor λ_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	19,76 ± 0,03	19,44 ± 0,04	19,34 ± 0,04	19,15 ± 0,03	19,04 ± 0,04
3.4 Hz	16,04 ± 0,03	16,06 ± 0,04	16,02 ± 0,04	15,96 ± 0,03	15,84 ± 0,03
3.6 Hz	14,68 ± 0,03	14,76 ± 0,04	14,66 ± 0,01	14,69 ± 0,02	14,527 ± 0,008
3.8 Hz	13,51 ± 0,03	13,54 ± 0,02	13,53 ± 0,04	13,48 ± 0,03	13,37 ± 0,03
4.0 Hz	12,37 ± 0,03	12,43 ± 0,03	12,43 ± 0,03	12,33 ± 0,03	12,13 ± 0,03
4.2 Hz	11,90 ± 0,04	12,06 ± 0,04	12,01 ± 0,05	11,80 ± 0,03	12,10 ± 0,04
4.4 Hz	10,73 ± 0,03	10,80 ± 0,03	10,74 ± 0,03	10,64 ± 0,02	10,88 ± 0,02
4.6 Hz	10,19 ± 0,03	10,21 ± 0,03	10,16 ± 0,03	10,11 ± 0,03	10,36 ± 0,03
4.8 Hz	9,64 ± 0,03	9,66 ± 0,03	9,63 ± 0,03	9,59 ± 0,03	9,60 ± 0,04
5.0 Hz	9,14 ± 0,02	9,19 ± 0,01	9,16 ± 0,03	9,10 ± 0,02	9,07 ± 0,02

Tabla A 9.31: λ/λ_0 campaña 2 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,02
1,04 ± 0,02	1,05 ± 0,03	1,05 ± 0,00	1,05 ± 0,02	1,06 ± 0,01	1,02 ± 0,01	1,05 ± 0,03	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,03
1,05 ± 0,02	1,05 ± 0,02	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,02	1,06 ± 0,04	1,09 ± 0,09	1,05 ± 0,02	1,05 ± 0,02	1,07 ± 0,01	1,07 ± 0,01
1,1 ± 0,1	1,11 ± 0,03	1,09 ± 0,03	1,09 ± 0,01	1,09 ± 0,02	1,05 ± 0,03	1,06 ± 0,02	1,05 ± 0,01	1,05 ± 0,01	1,06 ± 0,01
1,21 ± 0,02	1,14 ± 0,05	1,10 ± 0,01	1,07 ± 0,02	1,08 ± 0,01	1,01 ± 0,02	1,05 ± 0,01	1,03 ± 0,02	1,05 ± 0,02	1,07 ± 0,01
	1,12 ± 0,03	1,08 ± 0,03	1,04 ± 0,04	1,09 ± 0,01	1,08 ± 0,02	1,08 ± 0,02	1,08 ± 0,03	1,13 ± 0,03	1,11 ± 0,01
	1,24 ± 0,07	1,12 ± 0,01	1,13 ± 0,02	1,14 ± 0,02	1,10 ± 0,01	1,08 ± 0,02	1,09 ± 0,03	1,14 ± 0,02	1,13 ± 0,06
	1,15 ± 0,03	1,22 ± 0,01	1,12 ± 0,02	1,12 ± 0,04		1,10 ± 0,05	1,07 ± 0,02	1,07 ± 0,02	1,20 ± 0,05
			1,08 ± 0,01	1,12 ± 0,02		1,13 ± 0,05	1,08 ± 0,03	1,15 ± 0,03	1,19 ± 0,01
			1,17 ± 0,07	1,13 ± 0,01			1,21 ± 0,01	1,12 ± 0,01	1,22 ± 0,01
									1,24 ± 0,03

Tabla A 9.32: x/h campaña 2 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
9,75 ± 0,09	8,41 ± 0,03	7,87 ± 0,05	7,41 ± 0,03	6,95 ± 0,04	6,81 ± 0,04	6,32 ± 0,03	6,10 ± 0,03	5,87 ± 0,01	5,68 ± 0,04
13,8 ± 0,3	11,80 ± 0,05	10,89 ± 0,06	10,15 ± 0,04	9,47 ± 0,04	9,05 ± 0,05	8,47 ± 0,03	8,13 ± 0,03	7,80 ± 0,02	7,49 ± 0,05
17,89 ± 0,03	15,16 ± 0,07	14,02 ± 0,09	13,09 ± 0,03	12,18 ± 0,06	13,79 ± 2,81	10,84 ± 0,04	10,38 ± 0,03	9,97 ± 0,04	9,60 ± 0,07
21,5 ± 0,4	18,89 ± 0,25	17,26 ± 0,07	16,04 ± 0,08	14,86 ± 0,09	14,1 ± 0,2	13,03 ± 0,06	12,40 ± 0,06	11,85 ± 0,03	11,35 ± 0,05
27,38 ± 0,03	22,45 ± 0,32	20,51 ± 0,09	18,83 ± 0,07	17,48 ± 0,07	16,4 ± 0,2	15,38 ± 0,07	14,60 ± 0,07	14,00 ± 0,03	13,5 ± 0,1
29,9 ± 1,0	25,90 ± 0,06	23,63 ± 0,03	21,9 ± 0,2	20,16 ± 0,08	19,1 ± 0,2	17,66 ± 0,09	16,8 ± 0,1	16,2 ± 0,1	15,42 ± 0,04
	30,61 ± 0,02	27,04 ± 0,06	24,95 ± 0,05	23,1 ± 0,2	21,8 ± 0,1	20,0 ± 0,1	19,06 ± 0,02	18,39 ± 0,08	17,7 ± 0,1
	33,27 ± 0,17	30,76 ± 0,10	27,7 ± 0,1	25,7 ± 0,2		22,1 ± 0,1	21,17 ± 0,02	20,28 ± 0,02	19,8 ± 0,1
			30,7 ± 0,2	28,51 ± 0,40		24,8 ± 0,2	23,54 ± 0,01	22,81 ± 0,01	22,6 ± 0,5
			33,50 ± 0,03			26,9 ± 0,1	26,20 ± 0,02	24,47 ± 0,02	24,4 ± 0,3
									26,62 ± 0,02

A.5.4 CAMPAÑA 3 DE EXPERIMENTOS EN GOMA XANTHAN

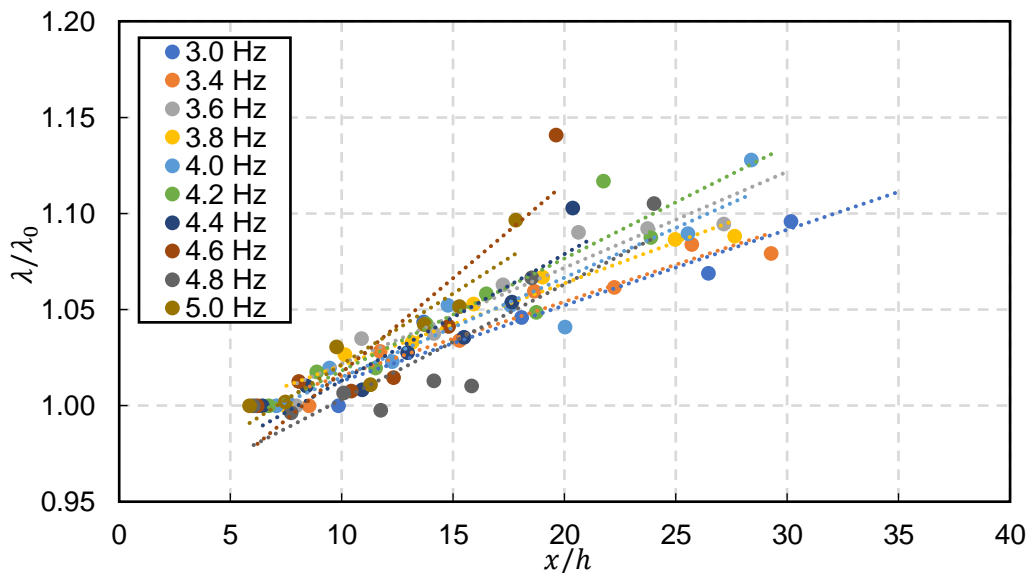


Figura A 9.58: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña 3 de experimentos en goma xanthan.

Tabla A 9.33: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña 3 en goma xanthan.

Valor λ_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta				
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
3.0 Hz	19,75 ± 0,04	19,88 ± 0,05	19,65 ± 0,03	19,47 ± 0,04	19,35 ± 0,04
3.4 Hz	16,34 ± 0,05	16,57 ± 0,04	16,26 ± 0,04	16,28 ± 0,04	16,20 ± 0,03
3.6 Hz	14,91 ± 0,01	14,956 ± 0,005	14,90 ± 0,01	14,875 ± 0,007	14,817 ± 0,007
3.8 Hz	13,73 ± 0,04	13,72 ± 0,04	13,72 ± 0,04	13,74 ± 0,03	13,69 ± 0,04
4.0 Hz	12,66 ± 0,04	12,67 ± 0,03	12,70 ± 0,03	12,64 ± 0,04	12,64 ± 0,04
4.2 Hz	11,80 ± 0,04	11,79 ± 0,03	11,75 ± 0,05	11,78 ± 0,03	11,73 ± 0,04
4.4 Hz	11,16 ± 0,04	11,08 ± 0,03	11,09 ± 0,03	11,09 ± 0,03	10,95 ± 0,04
4.6 Hz	10,55 ± 0,03	10,57 ± 0,04	10,39 ± 0,03	10,46 ± 0,03	10,47 ± 0,04
4.8 Hz	10,02 ± 0,03	10,01 ± 0,04	9,99 ± 0,03	9,94 ± 0,04	10,34 ± 0,04
5.0 Hz	9,51 ± 0,02	9,56 ± 0,02	9,48 ± 0,02	9,39 ± 0,02	

Tabla A 9.34: λ/λ_0 campaña 3 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,02
1,043 ± 0,005	1,03 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,027 ± 0,004	1,019 ± 0,002	1,017 ± 0,005	1,010 ± 0,004	1,012 ± 0,004	1,00 ± 0,02	1,002 ± 0,004
1,05 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,037 ± 0,004	1,03 ± 0,01	1,023 ± 0,001	1,020 ± 0,002	1,01 ± 0,01	1,01 ± 0,01	1,01 ± 0,03	1,03 ± 0,01
1,06 ± 0,06	1,06 ± 0,02	1,06 ± 0,01	1,053 ± 0,005	1,05 ± 0,01	1,043 ± 0,003	1,03 ± 0,01	1,015 ± 0,005	1,00 ± 0,01	1,01 ± 0,01
1,07 ± 0,08	1,06 ± 0,02	1,09 ± 0,02	1,07 ± 0,01	1,05 ± 0,01	1,06 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,01 ± 0,02	1,04 ± 0,01
1,10 ± 0,04	1,08 ± 0,02	1,09 ± 0,02	1,08 ± 0,03	1,041 ± 0,002	1,048 ± 0,003	1,05 ± 0,01	1,07 ± 0,08	1,01 ± 0,02	1,05 ± 0,02
		1,09 ± 0,01	1,09 ± 0,01	1,07 ± 0,07	1,12 ± 0,01				
				1,09 ± 0,01	1,09 ± 0,01				

Tabla A 9.35: x/h campaña 3 de experimentos realizadas en goma xanthan en función de la frecuencia aplicada.

3.0 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz	3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
9,87 ± 0,06	8,55 ± 0,04	7,97 ± 0,04	7,50 ± 0,01	7,08 ± 0,01	6,72 ± 0,01	6,44 ± 0,02	6,21 ± 0,02	6,04 ± 0,05	5,85 ± 0,01
13,69 ± 0,06	11,73 ± 0,03	10,90 ± 0,05	10,13 ± 0,01	9,44 ± 0,02	8,89 ± 0,01	8,42 ± 0,02	8,08 ± 0,03	7,74 ± 0,02	7,49 ± 0,03
18,08 ± 0,05	15,31 ± 0,04	14,15 ± 0,04	13,17 ± 0,02	12,26 ± 0,01	11,52 ± 0,02	10,91 ± 0,04	10,43 ± 0,05	10,09 ± 0,03	9,76 ± 0,01
21,5 ± 0,2	18,66 ± 0,05	17,24 ± 0,03	15,91 ± 0,03	14,77 ± 0,02	13,80 ± 0,01	12,98 ± 0,02	12,33 ± 0,04	11,75 ± 0,04	11,309 ± 0,004
26,5 ± 0,6	22,24 ± 0,06	20,65 ± 0,09	19,03 ± 0,06	17,59 ± 0,04	16,51 ± 0,05	15,50 ± 0,06	14,80 ± 0,08	14,15 ± 0,07	13,72 ± 0,02
30,17 ± 0,09	25,7 ± 0,1	23,7 ± 0,1	21,66 ± 0,06	20,04 ± 0,02	18,73 ± 0,01	17,64 ± 0,05	16,71 ± 0,02	15,82 ± 0,09	15,30 ± 0,07
35,10 ± 0,20	29,3 ± 0,2	27,2 ± 0,1	25,0 ± 0,1	22,67 ± 0,06	21,76 ± 0,08	20,38 ± 0,07	19,6 ± 0,2	18,5 ± 0,2	17,8 ± 0,1
		29,8 ± 0,1	27,64 ± 0,03	25,56 ± 0,05	23,88 ± 0,01				
				28,4 ± 0,1	27,1 ± 0,2				

A.5.5 CAMPAÑA EN GLICERINA 70%

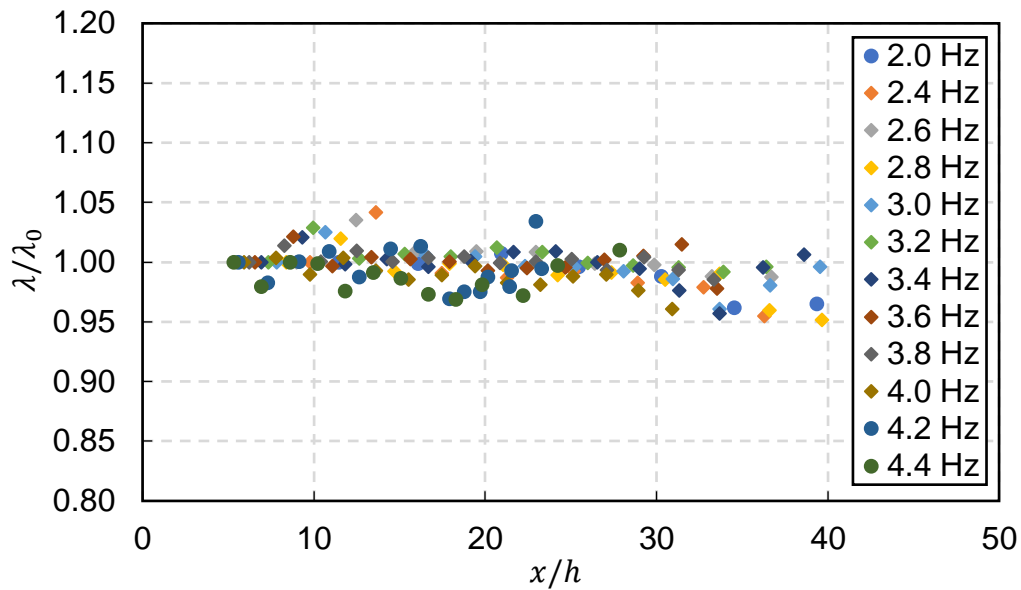


Figura A 9.59: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña de experimentos en glicerina 70%.

Tabla A 9.36: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña en glicerina 70%.

Valor λ_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de paleta			
	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm
2.0 Hz	23,42 ± 0,01	23,59 ± 0,01	23,61 ± 0,01	23,68 ±
2.4 Hz	19,25 ± 0,01	19,23 ± 0,01	19,56 ± 0,01	19,46 ± 0,02
2.6 Hz	17,41 ± 0,01	17,23 ± 0,01	17,42 ± 0,02	17,22 ± 0,02
2.8 Hz	15,93 ± 0,01	15,64 ± 0,02	16,08 ± 0,01	16,05 ± 0,02
3.0 Hz	14,50 ± 0,01	14,55 ± 0,02	14,47 ± 0,01	14,61 ± 0,01
3.2 Hz	13,24 ± 0,01	13,37 ± 0,03	13,21 ± 0,01	13,23 ± 0,02
3.4 Hz	12,22 ± 0,01	12,08 ± 0,08	12,40 ± 0,01	12,35 ± 0,04
3.6 Hz	11,24 ± 0,01	11,42 ± 0,01	11,30 ± 0,03	11,47 ± 0,02
3.8 Hz	10,41 ± 0,01	10,37 ± 0,02	10,59 ± 0,02	10,47 ± 0,03
4.0 Hz	9,61 ± 0,01	9,79 ± 0,01	9,77 ± 0,02	9,72 ± 0,03
4.2 Hz	8,89 ± 0,01	9,00 ± 0,01	8,93 ± 0,02	8,73 ± 0,05
4.4 Hz	8,23 ± 0,01	8,13 ± 0,01	8,47 ± 0,02	8,17 ± 0,05
4.6 Hz	7,48 ± 0,01	8,39 ± 0,02		
4.8 Hz	6,81 ± 0,01	8,37 ± 0,01		
5.0 Hz	6,45 ± 0,01	8,58 ± 0,02	8,06 ± 0,02	

Tabla A 9.37: λ/λ_0 campaña de experimentos realizadas en glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.

2.0 Hz	2.4 Hz	2.6 Hz	2.8 Hz	3.0 Hz	3.2 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz
1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,02	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,04	1,00 ± 0,02
1,00 ± 0,02	1,04 ± 0,03	1,04 ± 0,01	1,02 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,02 ± 0,02	1,02 ± 0,01
1,01 ± 0,03	0,99 ± 0,03	1,01 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,99 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
1,00 ± 0,01	0,99 ± 0,01	1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,01 ± 0,02	1,01 ± 0,03	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,02	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
0,96 ± 0,01	0,98 ± 0,01	1,00 ± 0,03	0,99 ± 0,01	1,00 ± 0,02	1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
0,97 ± 0,03	0,98 ± 0,01	1,00 ± 0,03	0,99 ± 0,01	1,00 ± 0,02	1,01 ± 0,02	1,01 ± 0,01	0,99 ± 0,01
	0,96 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,99 ± 0,02	1,00 ± 0,01	1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01
		0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,01	0,99 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
			0,96 ± 0,01	0,96 ± 0,01	1,00 ± 0,01	0,99 ± 0,01	1,00 ± 0,01
			0,95 ± 0,03	0,98 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,98 ± 0,01	1,01 ± 0,01
				1,00 ± 0,01		0,7 ± 0,4	1,02 ± 0,01
						0,7 ± 0,4	0,98 ± 0,03
						0,8 ± 0,4	

3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,02
1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01	0,98 ± 0,01	0,98 ± 0,01	0,93 ± 0,05	0,96 ± 0,03	0,93 ± 0,04
1,00 ± 0,01	0,99 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,03	0,96 ± 0,02	0,90 ± 0,08	0,8 ± 0,1
1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,01 ± 0,01	1,00 ± 0,02	1,04 ± 0,01	0,94 ± 0,04	0,88 ± 0,08
1,00 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,98 ± 0,01	1,02 ± 0,02	0,97 ± 0,02	0,91 ± 0,06
1,00 ± 0,01	0,99 ± 0,01	1,01 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,91 ± 0,04	0,95 ± 0,05	0,92 ± 0,06
1,01 ± 0,02	0,99 ± 0,01	1,01 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,96 ± 0,01	0,93 ± 0,05	0,94 ± 0,07
1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	0,97 ± 0,03	0,97 ± 0,04	1,04 ± 0,03	0,96 ± 0,03	0,97 ± 0,02
1,00 ± 0,01	0,98 ± 0,03	0,98 ± 0,02	0,97 ± 0,05	0,97 ± 0,03	0,98 ± 0,03	
1,00 ± 0,02	0,98 ± 0,02	0,99 ± 0,01	0,98 ± 0,02		0,97 ± 0,04	
0,99 ± 0,01	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,01	0,97 ± 0,02			
1,00 ± 0,01	0,99 ± 0,01	0,98 ± 0,02	1,00 ± 0,04			
0,99 ± 0,03	0,98 ± 0,01	0,99 ± 0,02	1,01 ± 0,01			
0,99 ± 0,01	0,96 ± 0,02	0,98 ± 0,02				

Tabla A 9.38: x/h campaña de experimentos realizadas en glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.

2.0 Hz	2.4 Hz	2.6 Hz	2.8 Hz	3.0 Hz	3.2 Hz	3.4 Hz	3.6 Hz
11,44 ± 0,04	9,78 ± 0,05	8,97 ± 0,05	8,38 ± 0,06	7,82 ± 0,01	7,33 ± 0,02	6,91 ± 0,05	6,55 ± 0,06
16,08 ± 0,08	13,63 ± 0,09	12,47 ± 0,05	11,55 ± 0,04	10,686 ± 0,004	9,97 ± 0,02	9,34 ± 0,06	8,79 ± 0,07
20,95 ± 0,10	17,46 ± 0,07	15,97 ± 0,05	14,70 ± 0,06	13,585 ± 0,002	12,65 ± 0,02	11,81 ± 0,06	11,08 ± 0,06
25,47 ± 0,05	21,28 ± 0,08	19,47 ± 0,04	17,91 ± 0,05	16,53 ± 0,01	15,32 ± 0,02	14,26 ± 0,07	13,35 ± 0,06
30,27 ± 0,13	25,15 ± 0,10	22,96 ± 0,04	21,06 ± 0,05	19,43 ± 0,02	17,98 ± 0,01	16,70 ± 0,05	15,6 ± 0,1
34,55 ± 0,07	28,90 ± 0,09	26,39 ± 0,04	24,22 ± 0,06	22,32 ± 0,01	20,69 ± 0,03	19,17 ± 0,06	17,9 ± 0,1
39,37 ± 0,15	32,74 ± 0,10	29,87 ± 0,06	27,38 ± 0,06	25,21 ± 0,01	23,34 ± 0,02	21,6 ± 0,1	20,1 ± 0,1
	36,30 ± 0,06	33,23 ± 0,09	30,49 ± 0,08	28,09 ± 0,02	25,99 ± 0,02	24,1 ± 0,1	22,42 ± 0,09
		36,71 ± 0,06	33,69 ± 0,08	30,95 ± 0,02	28,63 ± 0,02	26,6 ± 0,1	24,67 ± 0,09
			36,61 ± 0,09	33,68 ± 0,04	31,28 ± 0,03	29,0 ± 0,1	27,0 ± 0,1
			39,66 ± 0,09	36,64 ± 0,04	33,89 ± 0,02	31,3 ± 0,1	29,2 ± 0,1
				39,47 ± 0,07		33,74 ± 0,07	31,49 ± 0,06
						36,28 ± 0,05	33,53 ± 0,06
						38,71 ± 0,08	

3.8 Hz	4.0 Hz	4.2 Hz	4.4 Hz	4.6 Hz	4.8 Hz	5.0 Hz
6,20 ± 0,02	5,91 ± 0,02	5,57 ± 0,03	5,32 ± 0,05	7 ± 1	5,1 ± 0,2	5,1 ± 0,3
8,27 ± 0,03	7,80 ± 0,03	7,30 ± 0,06	6,91 ± 0,07	8 ± 1	6,4 ± 0,1	6,4 ± 0,3
10,39 ± 0,03	9,76 ± 0,02	9,13 ± 0,05	8,61 ± 0,01	10 ± 1	7,73 ± 0,06	7,6 ± 0,2
12,49 ± 0,03	11,70 ± 0,01	10,88 ± 0,07	10,21 ± 0,03	11 ± 1	9,2 ± 0,1	9,1 ± 0,3
14,58 ± 0,04	13,62 ± 0,03	12,64 ± 0,06	11,83 ± 0,01	14 ± 2	10,7 ± 0,1	10,4 ± 0,3
16,69 ± 0,05	15,53 ± 0,04	14,48 ± 0,06	13,48 ± 0,07	16 ± 3	12,1 ± 0,1	11,9 ± 0,4
18,78 ± 0,05	17,47 ± 0,06	16,24 ± 0,03	15,09 ± 0,02	18 ± 3	13,5 ± 0,1	13,3 ± 0,5
20,87 ± 0,08	19,41 ± 0,08	17,9 ± 0,1	16,69 ± 0,07	21 ± 4	15,0 ± 0,2	
23,0 ± 0,1	21,29 ± 0,08	19,7 ± 0,1	18,3 ± 0,1	25 ± 3	16,4 ± 0,2	
25,1 ± 0,2	23,2 ± 0,1	21,57 ± 0,05	19,95 ± 0,05		17,9 ± 0,2	
27,1 ± 0,1	25,1 ± 0,1	23,32 ± 0,05	21,6 ± 0,1			
29,3 ± 0,2	27,1 ± 0,2	25,1 ± 0,1	23,3 ± 0,1			
31,3 ± 0,3	28,93 ± 0,09	26,85 ± 0,07	24,98 ± 0,01			
33,3 ± 0,1	30,85 ± 0,16	28,56 ± 0,05				

A.5.6 CAMPAÑA EN AGUA DESTILADA

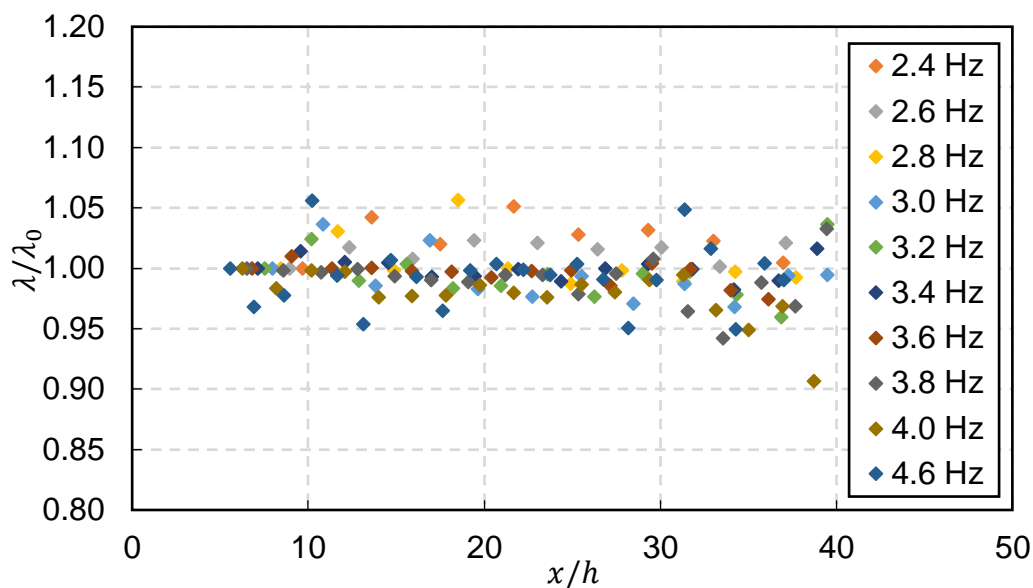


Figura A 9.60: Variación de la longitud de onda en función de la posición adimensional para campaña de experimentos en glicerina 70%.

Tabla A 9.39: Valor λ_0 (cm) por experimento en campaña en agua destilada.

Valor λ_0 por experimento (cm)

Frecuencia	Amplitud de carrera de la paleta			
	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm
2.0 Hz	22,90 ± 0,06	23,75 ± 0,06	24,25 ± 0,06	23,96 ± 0,04
2.4 Hz	18,71 ± 0,04	19,15 ± 0,04	19,42 ± 0,03	19,26 ± 0,06
2.6 Hz	16,81 ± 0,03	17,30 ± 0,01	17,72 ± 0,02	17,44 ± 0,03
2.8 Hz	15,51 ± 0,03	16,35 ± 0,05	16,37 ± 0,03	16,46 ± 0,03
3.0 Hz	14,19 ± 0,03	14,39 ± 0,03	15,58 ± 0,04	15,22 ± 0,02
3.2 Hz	13,06 ± 0,03	13,35 ± 0,03	13,72 ± 0,04	14,12 ± 0,03
3.4 Hz	11,99 ± 0,04	12,28 ± 0,03	12,51 ± 0,04	12,68 ± 0,04
3.6 Hz	11,08 ± 0,02	11,61 ± 0,03	11,46 ± 0,01	11,37 ± 0,03
3.8 Hz	10,21 ± 0,05	10,89 ± 0,03	10,56 ± 0,04	10,58 ± 0,03
4.0 Hz	9,49 ± 0,04	9,92 ± 0,04	9,82 ± 0,04	9,85 ± 0,03
4.6 Hz	7,97 ± 0,04	7,61 ± 0,05	7,65 ± 0,04	7,24 ± 0,09
5.0 Hz	6,97 ± 0,04	6,97 ± 0,06		6,71 ± 0,05

Tabla A 9.40: λ/λ_0 campaña de experimentos realizadas en glicerina 70% en función de la frecuencia aplicada.

2.0 Hz		2.4 Hz		2.6 Hz		2.8 Hz		3.0 Hz		3.2 Hz	
1,00	± 0,05	1,00	± 0,04	1,00	± 0,02	1,00	± 0,04	1,00	± 0,03	1,00	± 0,03
0,98	± 0,03	1,043	± 0,002	1,02	± 0,02	1,03	± 0,03	1,04	± 0,02	1,02	± 0,02
1,01	± 0,02	1,020	± 0,007	1,008	± 0,009	1,00	± 0,02	0,99	± 0,02	0,99	± 0,01
1,04	± 0,03	1,05	± 0,06	1,02	± 0,03	1,06	± 0,03	1,02	± 0,01	1,004	± 0,006
1,05	± 0,01	1,028	± 0,007	1,02	± 0,01	1,00	± 0,01	0,98	± 0,04	0,98	± 0,02
0,99	± 0,02	1,03	± 0,01	1,02	± 0,02	0,99	± 0,03	0,98	± 0,04	0,99	± 0,03
1,04	± 0,01	1,02	± 0,01	1,02	± 0,01	1,00	± 0,03	0,99	± 0,04	1,00	± 0,03
		1,00	± 0,01	1,00	± 0,02	0,99	± 0,04	0,97	± 0,04	0,98	± 0,03
				1,02	± 0,02	1,00	± 0,02	0,99	± 0,04	1,00	± 0,02
						0,99	± 0,01	0,97	± 0,04	1,00	± 0,03
								0,99	± 0,02	0,98	± 0,04
										0,96	± 0,04
										1,037	± 0,006

3.4 Hz		3.6 Hz		3.8 Hz		4.0 Hz		4.6 Hz		5.0 Hz	
1,00	± 0,04	1,00	± 0,02	1,00	± 0,04	1,00	± 0,03	1,00	± 0,06	1,00	± 0,05
1,015	± 0,009	1,010	± 0,007	0,998	± 0,001	0,984	± 0,000	0,968	± 0,000	0,948	± 0,001
1,005	± 0,006	1,000	± 0,006	0,997	± 0,003	0,998	± 0,001	0,98	± 0,02	1,00	± 0,05
1,00	± 0,01	1,001	± 0,005	1,000	± 0,008	1,00	± 0,01	1,06	± 0,04	0,99	± 0,02
0,99	± 0,03	1,00	± 0,02	0,99	± 0,02	0,976	± 0,009	0,99	± 0,02	1,02	± 0,05
0,99	± 0,02	1,00	± 0,01	0,99	± 0,02	0,98	± 0,01	0,95	± 0,02	0,93	± 0,05
1,00	± 0,02	0,99	± 0,01	0,99	± 0,02	0,98	± 0,02	1,01	± 0,04	0,83	± 0,06
0,99	± 0,02	1,00	± 0,02	0,99	± 0,02	0,99	± 0,02	0,99	± 0,04	0,91	± 0,02
1,00	± 0,02	1,00	± 0,02	0,99	± 0,02	0,98	± 0,02	0,97	± 0,03	1,05	± 0,04
1,00	± 0,03	0,99	± 0,02	0,98	± 0,02	0,98	± 0,02	1,00	± 0,03	1,02	± 0,02
1,00	± 0,03	1,00	± 0,02	1,00	± 0,04	0,99	± 0,02	1,00	± 0,03	0,88	± 0,01
0,98	± 0,02	1,00	± 0,02	1,01	± 0,04	0,98	± 0,02	1,00	± 0,02	0,859	± 0,005
0,99	± 0,02	0,98	± 0,01	0,96	± 0,03	0,99	± 0,02	0,99	± 0,02	0,97	± 0,02
1,02	± 0,01	0,975	± 0,007	0,94	± 0,04	0,99	± 0,02	1,00	± 0,03	1,102	± 0,007
				0,99	± 0,02	0,97	± 0,02	0,99	± 0,02	0,97	± 0,02
				0,97	± 0,03	0,95	± 0,02	0,951	± 0,008	0,87	± 0,04
						0,97	± 0,02	0,99	± 0,04	1,01	± 0,02
								1,05	± 0,04	1,030	± 0,005
								1,02	± 0,07	0,99	± 0,03
								0,95	± 0,03	1,00	± 0,07
								1,00	± 0,08	0,99	± 0,07
								0,991	± 0,001	0,97	± 0,02
										0,93	± 0,05
										0,801	± 0,006
										0,89	± 0,03
										1,00	± 0,06

Tabla A 9.41: x/h campaña de experimentos realizadas en agua destilada en función de la frecuencia aplicada.

2.0 Hz			2.4 Hz			2.6 Hz			2.8 Hz			3.0 Hz			3.2 Hz		
11,5	±	0,2	9,68	±	0,09	8,96	±	0,10	8,4	±	0,1	8,0	±	0,2	7,5	±	0,2
15,2	±	0,2	13,6	±	0,3	12,32	±	0,09	11,7	±	0,2	10,8	±	0,2	10,2	±	0,2
20,5	±	0,2	17,5	±	0,2	15,9	±	0,2	14,9	±	0,3	13,8	±	0,3	12,9	±	0,3
24,9	±	0,4	21,7	±	0,3	19,4	±	0,2	18,5	±	0,4	16,9	±	0,3	15,6	±	0,3
30,1	±	0,7	25,4	±	0,3	23,0	±	0,2	21,4	±	0,3	19,6	±	0,3	18,2	±	0,3
34,0	±	0,3	29,3	±	0,2	26,4	±	0,1	24,9	±	0,3	22,7	±	0,3	21,0	±	0,3
39,6	±	0,3	33,0	±	0,1	30,1	±	0,2	27,8	±	0,3	25,5	±	0,3	23,6	±	0,3
			37,0	±	0,1	33,4	±	0,2	31,3	±	0,2	28,5	±	0,2	26,3	±	0,4
						37,1	±	0,2	34,3	±	0,3	31,4	±	0,2	29,0	±	0,4
									37,7	±	0,3	34,2	±	0,2	31,7	±	0,4
												37,3	±	0,4	34,3	±	0,3
															36,9	±	0,3
															39,5	±	0,1

3.4 Hz			3.6 Hz			3.8 Hz			4.0 Hz			4.6 Hz			5.0 Hz		
7,1	±	0,2	6,8	±	0,3	6,5	±	0,3	6,3	±	0,3	5,6	±	0,3	4,96	±	0,08
9,6	±	0,2	9,0	±	0,3	8,6	±	0,3	8,2	±	0,4	6,9	±	0,1	6,22	±	0,10
12,1	±	0,3	11,3	±	0,3	10,7	±	0,3	10,2	±	0,4	8,6	±	0,2	7,8	±	0,2
14,5	±	0,3	13,6	±	0,3	12,8	±	0,3	12,1	±	0,4	10,2	±	0,3	9,1	±	0,3
17,0	±	0,3	15,9	±	0,3	14,9	±	0,3	14,0	±	0,3	11,6	±	0,2	10,5	±	0,3
19,5	±	0,3	18,1	±	0,3	17,0	±	0,3	15,9	±	0,3	13,1	±	0,2	11,72	±	0,09
21,9	±	0,3	20,4	±	0,3	19,1	±	0,3	17,8	±	0,3	14,7	±	0,2	12,9	±	0,1
24,4	±	0,3	22,7	±	0,3	21,2	±	0,3	19,8	±	0,3	16,1	±	0,2	14,21	±	0,09
26,9	±	0,2	24,9	±	0,3	23,3	±	0,3	21,7	±	0,3	17,6	±	0,2	15,6	±	0,2
29,3	±	0,2	27,2	±	0,2	25,3	±	0,3	23,6	±	0,3	19,2	±	0,2	17,0	±	0,1
31,8	±	0,2	29,5	±	0,2	27,5	±	0,3	25,5	±	0,3	20,7	±	0,2	18,17	±	0,09
34,2	±	0,2	31,7	±	0,2	29,6	±	0,3	27,4	±	0,3	22,2	±	0,1	19,4	±	0,1
36,7	±	0,2	34,0	±	0,2	31,6	±	0,3	29,4	±	0,2	23,7	±	0,2	20,8	±	0,1
38,9	±	0,2	36,2	±	0,2	33,6	±	0,3	31,3	±	0,2	25,3	±	0,2	22,3	±	0,1
						35,7	±	0,2	33,2	±	0,2	26,8	±	0,2	23,4	±	0,1
						37,7	±	0,2	35,0	±	0,2	28,2	±	0,1	24,8	±	0,2
									36,9	±	0,2	29,77	±	0,09	26,2	±	0,1
												31,4	±	0,1	27,5	±	0,2
												32,9	±	0,2	28,9	±	0,2
												34,3	±	0,2	30,4	±	0,3
												35,9	±	0,3	31,5	±	0,4
												37,00	±	0,02	32,9	±	0,4
															34,5	±	0,6
															35,3	±	0,2
															36,9	±	0,5
															37,5	±	0,1

A.6 LONGITUD DE ONDA ADIMENSIONAL EN FUNCIÓN DE AMPLITUD ADIMENSIONAL

Las figuras A 9.61, A 9.62 y A 9.63, corresponden al gráfico de los valores de λ/λ_0 y A/A_0 de las diferentes campañas de experimentos presentados anteriormente.

A.6.1 CAMPAÑA 1 DE EXPERIMENTOS EN GOMA XANTHAN

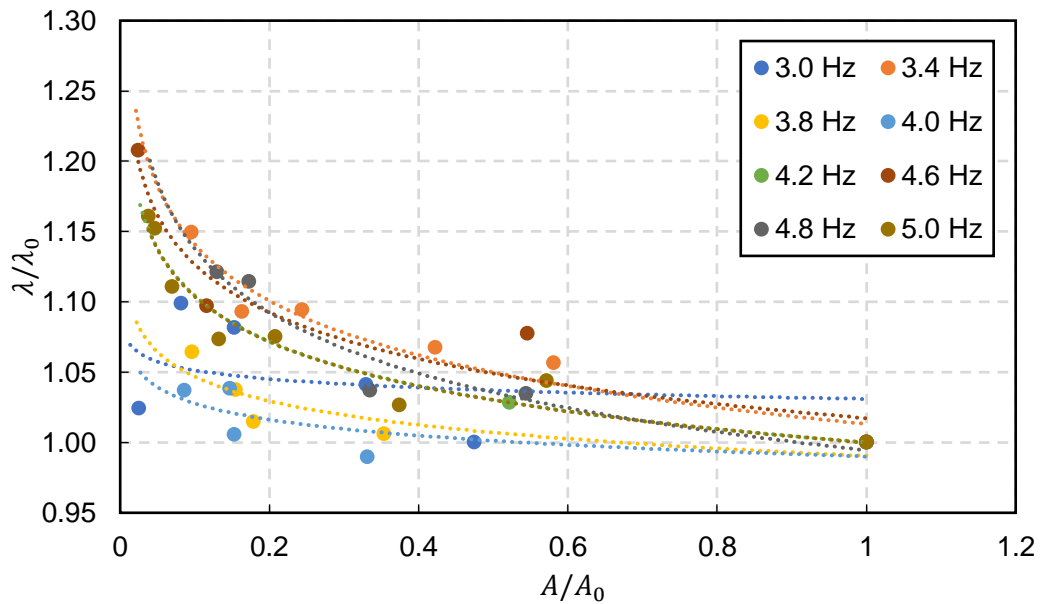


Figura A 9.61: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña 1 en goma xanthan.

A.6.2 CAMPAÑA 2 DE EXPERIMENTOS EN GOMA XANTHAN

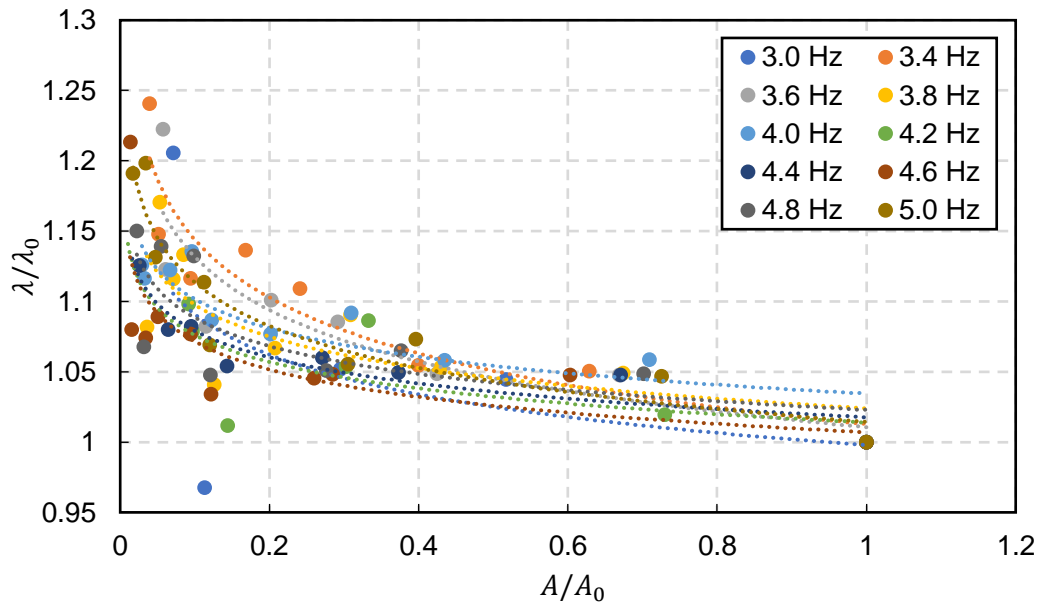


Figura A 9.62: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña 2 en goma xanthan.

A.6.3 CAMPAÑA 3 DE EXPERIMENTOS EN GOMA XANTHAN

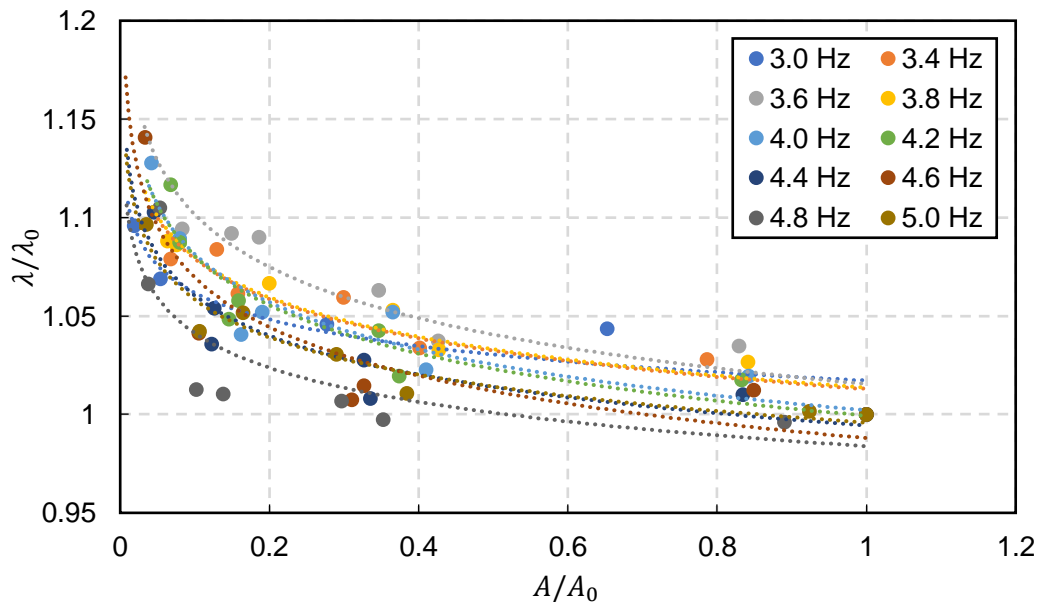


Figura A 9.63: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña 3 en goma xanthan.

A.6.4 CAMPAÑA EN GLICERINA 70%

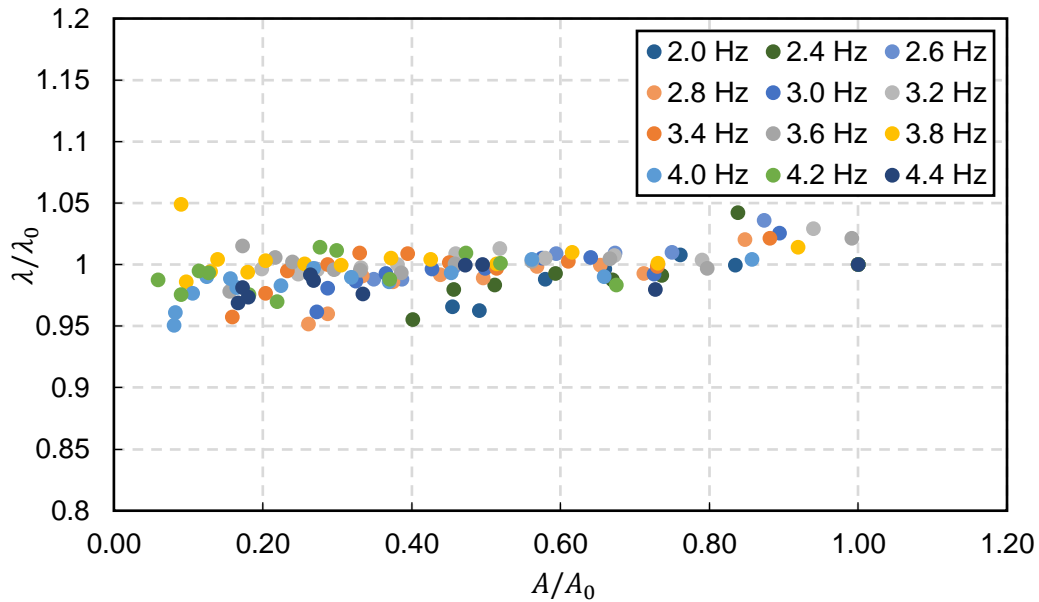


Figura A 9.64: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña en glicerina 70%.

A.6.5 CAMPAÑA EN AGUA DESTILADA

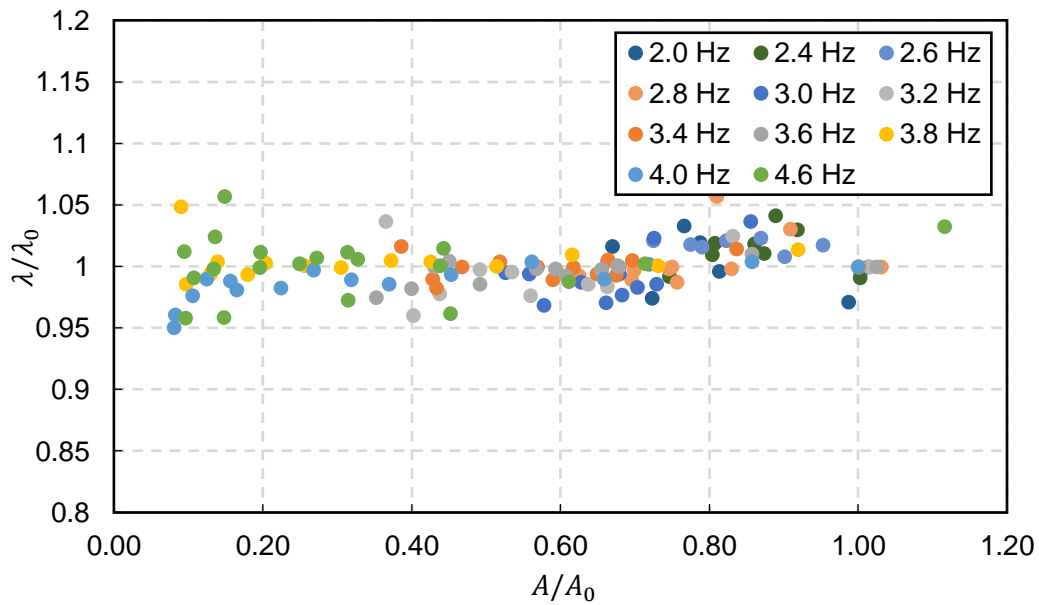


Figura A 9.65: Longitud de onda adimensional en función de la amplitud adimensional para campaña en agua destilada.