



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN EN 2D DE LA
SUPERFICIE DEL AGUA AL VARIAR SU
TENSIÓN SUPERFICIAL DURANTE LA CAÍDA
DE UN DISCO SÓLIDO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

Ing. Cristian Cáliz Reyes

ASESOR:

Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes

COASESOR:

Dr. Gonzalo Viramontes Gamboa

Morelia, Michoacán, Abril, 2019



DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi querida familia que sin su constante apoyo este trabajo no sería posible.

Primero a mis padres Andrés y Elsa que siempre han estado ahí para mí, apoyándome impulsándome a seguir con mis estudios y los que me han enseñado que nada es más importante que estar preparado para enfrentar la vida. A mi hermana Estefanía que con su ayuda incondicional me permitió centrarme en mis estudios y carrera y que me enseñó lo importante que es contar con tus personas más cercanas. A mi hermana Andrea que siempre estuvo presente en los momentos difíciles y complicados haciéndolos más pasajeros y sencillos y que sin su ayuda hubiera sido más complicado realizar este trabajo. Por todo esto y más estoy muy agradecido y doy todo de mí incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi querida familia siempre.

Agradezco profundamente a la Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes que con todo su apoyo, dedicación, confianza y comprensión se logró realizar este trabajo y que además me ha mostrado el tipo de investigador que quiero llegar a ser y que nada es demasiado difícil de lograr cuando te esfuerzas y le pones dedicación.

Agradezco al Dr. Gonzalo Viramontes Gamboa que me ha brindado su apoyo, dedicación, confianza y que me ha mostrado lo mucho que se puede lograr cuando uno se encuentra realmente motivado y entusiasmado en su trabajo.

Agradezco a la Dra. Rosanna Bonasia quien me dió la oportunidad de realizar una estancia de investigación y me permitió ampliar el panorama que tengo sobre la investigación, por su dedicación, tiempo y la confianza que me entregó y me mostró que no sólo el estudio es importante si no salir a divertirse y conocer lugares cuando viajas.

Agradezco a mis profesores y al Posgrado de Ingeniería Mecánica por su dedicación y excelente trabajo y el tiempo que me dedicaron.

Agradezco a mis compañeros y amigos de la facultad, por su apoyo, confianza, lealtad y por compartir y pasar momentos difíciles y alegres durante el transcurso de la Maestría.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT por el apoyo monetario recibido bajo el programa de posgrados de calidad.

Agradezco a Santander por la beca recibida bajo el programa de becas de movilidad Santander el cual me permitió realizar una estancia nacional en el Instituto Politécnico Nacional para aprender de nuevas experiencias.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I.....	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN	13
1.3 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA.....	14
1.4 HIPÓTESIS.....	25
1.5 OBJETIVOS	26
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	26
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
CAPÍTULO II	27
MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 SPLASH.....	27
2.1.1 CORONA DE SPLASH.....	27
2.1.2 CAVIDAD DE AIRE.....	28
2.1.3 ÁNGULO DE LA CAVIDAD	28
2.1.4 JET DE LÍQUIDO	29
2.2 VELOCIDAD DE IMPACTO.	29
2.3 TENSIÓN SUPERFICIAL	30
2.4 SURFACTANTES O TENSOACTIVOS	30
2.5 NÚMEROS ADIMENSIONALES	31
2.5.1 NÚMERO DE REYNOLDS	31
2.5.2 NÚMERO DE FROUDE	32
2.5.3 NÚMERO DE WEBER	32
2.5.4 NÚMERO DE BOND.....	32
CAPÍTULO III.....	34
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	34

3.1 MATERIALES Y EQUIPO EXPERIMENTAL	34
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA CUASI-BIDIMENSIONAL	34
3.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS DISCOS DE IMPACTO	36
3.4 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES CON DODECYL SULFATO DE SODIO.....	36
3.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	39
3.6 VARIABLES DE INTERÉS.....	44
3.7 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL	44
3.7.1 EMPLEO DE TENSIÓMETRO ÓPTICO PARA MEDIR LA TENSIÓN SUPERFICIAL.	45
3.8 ANÁLISIS DE IMÁGENES.....	49
3.9 ANÁLISIS ADIMENSIONAL	56
3.10 SIMULACIONES 2D DEL SPLASH EN DUALSPHYSICS.....	57
CAPÍTULO IV	60
ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES AL DEFORMAR UNA SUPERFICIE DE AGUA .	60
4.1.1 FORMACIÓN DE LA CORONA, CAVIDAD Y JET DEL SPLASH EN 2D	60
4.1.2 VELOCIDAD DE IMPACTO	62
4.1.3 POSICIÓN DEL DISCO DURANTE CAÍDA LIBRE, IMPACTO Y DESCENDENCIA DENTRO DEL LÍQUIDO.	63
4.1.4 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE LA CAVIDAD	67
4.1.5 RESULTADOS DEL SPLASH EN 2D VARIANDO LA VELOCIDAD DE IMPACTO DEL DISCO PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE DISCO.....	69
4.1.6 RESULTADOS DEL SPLASH EN 2D VARIANDO LA VELOCIDAD DE IMPACTO PARA DIFENTES DENDIDADES DEL DISCO DE IMPACTO.....	72
4.1.7 ANÁLISIS ADIMENSIONAL PARA EL CASO DE AGUA PURA.....	74
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES USANDO SOLUCIONES ACUOSAS CON SURFACTANTE SDS.....	80
4.2.1 VALORES DE TENSIÓN SUPERFICIAL DE LAS SOLUCIONES CON SDS	80
4.2.2 EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE TENSIÓN SUPERFICIAL EN LA CORONA DEL SPLASH.	82
4.2.3 EFECTO EN LA PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD AL VARIAR SUTENSIÓN SUPERFICIAL.	83
4.2.4 EFECTO EN EL ÁNGULO DE LA CAVIDAD. AL VARIAR SU TENSIÓN SUPERFICIAL	87
4.2.5 EFECTO EN LA ALTURA DEL JET AL VARIAR SU TENSIÓN SUPERFICIAL. ...	92

4.2.6 ANÁLISIS ADIMENSIONAL PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE.	96
4.3 RESULTADOS NUMÉRICOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS EN DUALSPHYISCS DEL SPLASH EN 2D.	100
4.3.1 COMPARACIÓN DE LAS DEFORMACIONES SUPERFICIALES OBTENIDAS EN LOS EXPERIMENTOS CON LAS OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN.....	100
4.3.2 RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO DEL DISCO EN LA SIMULACIÓN.....	101
4.3.3 RESULTADOS DE LA RESOLUCIÓN EN LA DISTANCIA ENTRE PARTÍCULAS	102
4.3.4 RESULTADOS DE LA PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD Y LA ALTURA DEL JET EN LAS SIMULACIONES	103
4.3.5 RESULTADOS ADIMENSIONALES EN LA SIMULACIÓN	106
CAPÍTULO V	109
CONCLUSIONES	109
5.1 CONCLUSIONES GENERALES	110
5.2 RECOMENDACIONES	112
5.3 PERSPECTIVAS A FUTURO	113
ACCIONES DE DIFUSIÓN.....	114
APÉNDICE	119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 a) Esquema del dispositivo usado para impactar disco de manera frontal. b) Gráfica de la profundidad relativa de sellado con respecto a la raíz cuadrada del número de Froude (Glasheen y McMahon, 1996).	14
Figura 1.2 a) Imagen de la profundidad de cierre. b) Gráfica de la comparación del modelo analítico y una simulación numérica para el cierre de profundidad en función de la velocidad de impacto. Caso A (esfera de 1 cm de diámetro) y caso B (esfera de 2 cm de diámetro) (Lee et. al, 1997).	15
Figura 1.3 a) Jet producido por el impacto de una esfera en una superficie granular. b) Gráfica de la altura adimensional del jet en función de los números de Reynolds y Froude (Thoroddsen y Shen, 2001).	16
Figura 1.4 Jets formados por el impacto de esfera de tungsteno, cilindro corto de latón y cilindro largo de acero todos con un diámetro de 8 mm, liberados desde una altura H= 50 cm, la altura del jet se ve afectada al modificar la viscosidad de la solución (Nigers y Walters, 2001).	17
Figura 1.5 a) Cavidad formada por una esfera de acero. b) Gráfica del coeficiente de impacto en función de la profundidad adimensional (Lavery, 2004).	18
Figura 1.6 a) Superficie rugosa de la cavidad dejada por una esfera. b) Gráfica de la posición de una esfera en el fluido en función del tiempo (Akers y Belmonte, 2006).	18
Figura 1.7 Formación de agujeros en la superficie de la corona de una gota al impactar sobre una película líquida de diferente tensión superficial (Thoroddsen y Etho, 2006).	19
Figura 1.8 a) Prisma triangular usado en el impacto de superficie líquida. b) Deformación de la corona del splash (Alam et al., 2007).	20
Figura 1.9 Formas del splash al impactar objetos de diferente geometría (Kubota y Mochizuki, 2011).	20
Figura 1.10 a) Etapas de la entrada al agua de la cuña. La imagen superior es la etapa de impacto, la imagen inferior izquierda es la etapa de transición y la imagen restante es la etapa postcierre. b) Gráfica de contornos de presión de la cavidad de aire cerca del cierre, z, y son las coordenadas vertical y horizontal respectivamente de la cavidad (Wang J. et al., 2015).	21
Figura 1.11 Desarrollo de la corona del splash durante el impacto de un cilindro hueco sobre una superficie líquida. Se puede observar el apilamiento de líquido, el flujo de jet y la corona del splash. La superficie izquierda del cilindro posee un recubrimiento hidrofóbico y la separación del jet se presenta a una menor altura (Kormakz y Güzel, 2017).	22
Figura 1.12 a) Sistema Experimental de impacto de la cuña. α es el ángulo de movimiento de la cuña y θ es el ángulo de asimetría de la cuña. b) Distribución de velocidades del fluido en el momento del impacto de la cuña por velocimetría de imágenes de partículas (Russo et al., 2018).	23
Figura 1.13 En la imagen izquierda se muestra la fuerza de impacto en función del tiempo para diferentes ángulos de cuña. En la imagen superior derecha se muestra que para para diferentes velocidades de impacto la forma de la corona del splash muestra ondulaciones. En la imagen inferior derecha se muestra una gráfica de la deformación de la corona del splash para varios valores del número de Weber (Vincent et al., 2018).	24
CAPÍTULO II	
Figura 2.1 Formación de la corona de splash (Lavery, 2003).	27
Figura 2.2 Formación de una cavidad por el impacto de una esfera (Lavery, 2003).	28

Figura 2.3 Ángulo de cono en una cavidad de aire formado por el paso de una esfera (Laverty, 2003).	28
Figura 2.4 Formación de un jet por impacto de una esfera en un medio granular (Thoroddsen y Shen, 2000).	29
Figura 2.5 Un mosquito parado sobre la superficie libre de un fluido estático [1].	30
Figura 2.6 Representación de una molécula de surfactante ilustrando sus partes principales.	31
CAPÍTULO III	
Figura 3.1. Esquema de las dimensiones del espacio de trabajo en la celda.	35
Figura 3.2. Celda bidimensional con su base de cilindros.	35
Figura 3.3 Discos sólidos de diámetros del rango de 1/2" a 3" y diferentes materiales.	36
Figura 3.4 Gráfica de tensión superficial (mN/m) del agua en función de la concentración de surfactante (ppm) para diferentes tipos de surfactante hidrofílico. (Wu et al., 1995)	37
Figura 3.5 Sistema de iluminación colocado en la parte posterior de la celda.	40
Figura 3.6 Cámara rápida utilizada para la captura de imágenes con una lente acoplada para la observación del fenómeno.	40
Figura 3.7 Esquema del montaje experimental utilizado para realizar los experimentos del Splash en 2D.	41
Figura 3.8 Imagen del montaje experimental en físico.	41
Figura 3.9 Variación del nivel de líquido en la celda para modificar la velocidad de impacto del disco mediante caída libre. Se muestran 3 ejemplos de nivel de líquido empleados: a) $h = 20\text{ cm}$, b) $h = 40\text{ cm}$ y c) $h = 60\text{ cm}$.	42
Figura 3.10 Solución acuosa de SDS con una concentración $c = 1\text{ cmc}$ vertida en la celda para un experimento con un nivel de solución $h = 20\text{ cm}$.	43
Figura 3.11 Muestras de las soluciones acuosas para medir su tensión superficial.	44
Figura 3.12 Barra de menú del software Attension Theta para realizar mediciones de ángulo de contacto, tensión superficial, energía superficial libre y ángulo de menisco.	45
Figura 3.13 Ventana para realizar la calibración del tensiómetro óptico enfocando al balín de calibración.	46
Figura 3.14 Tensiómetro óptico utilizado para realizar las mediciones de tensión superficial de las soluciones.	47
Figura 3.15 Ventana enfocando la aguja donde se desarrollará la gota pendiente.	48
Figura 3.16 Medición de la Tensión superficial por el método de gota pendiente.	49
Figura 3.17 Imagen binarizada de la cavidad de aire y disco de teflón 1" descendiendo en el agua.	50
Figura 3.18 Localización del nivel de referencia antes del impacto del disco sólido.	51
Figura 3.19 Contorno de la cavidad de aire antes del cierre. La posición absoluta del centro del disco se muestra indicada con el símbolo + en color azul.	52
Figura 3.20 Gráfica de la velocidad del disco de teflón 1" en función del tiempo después del impacto del disco con la superficie. Gráfica generada en Matlab.	54
Figura 3.21. Cavidad de aire desarrollada a una profundidad de 1.5 diámetros de disco.	55
Figura 3.22 Imagen binarizada del jet formado al cerrarse la cavidad de aire.	56
CAPÍTULO IV	
Figura 4.1 Corona del splash en 2D por impacto de un disco de teflón de diámetro de 1".	60
Figura 4.2 Cavidad de aire en 2D por impacto de un disco de teflón de diámetro de 1".	61
Figura 4.3 Jet de agua desarrollado totalmente por impacto de un disco de teflón de diámetro de 1".	61
Figura 4.4 Gráfica de las velocidades de impacto teórica y experimental en función de la altura de caída libre.	63

Figura 4.5 Caída libre de un disco de teflón de diámetro de 1" posicionado su centro de masa a una altura $y = 5.21 \text{ cm}$ con respecto a la superficie libre.	64
Figura 4.6 Gráfica de la posición del disco en función del tiempo, para un disco de teflón de diámetro de 1".	64
Figura 4.7 Gráfica de la velocidad promediada del disco en función del tiempo para un disco de teflón de diámetro 1".	66
Figura 4.8 Ángulo de la cavidad a una profundidad de $\frac{H_c}{D} = 1.5$.	67
Figura 4.9 Gráfica del ángulo de la cavidad en función de la posición del frente del disco con un diámetro de 1" y a una velocidad de impacto de 250 cm/s .	68
Figura 4.10 Profundidad máxima de la cavidad (H_c) graficada en función de la velocidad de impacto del disco (V_i) para varios tamaños de disco.	69
Figura 4.11 Gráfica del ángulo de cavidad (Θ) contra la velocidad de impacto del disco (V_i), para diferentes tamaños de disco.	70
Figura 4.12 Gráfica de la altura del jet (H_j) contra la velocidad de impacto del disco (V_i), para diferentes tamaños de disco.	71
Figura 4.13 Profundidad de la cavidad (H_c) contra la velocidad de impacto del disco (V_i), para diferentes materiales de disco todos con un diámetro de 1".	72
Figura 4.14 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) contra la velocidad de impacto (V_i), para diferentes materiales de disco todos con diámetro de 1".	73
Figura 4.15 Gráfica de la altura del jet (H_j) contra la velocidad de impacto (V_i), para diferentes materiales de disco todos con diámetro de 1".	74
Figura 4.16 Gráfica de la profundidad adimensional (H_c/D) contra número de Froude (Fr).	75
Figura 4.17 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) contra el valor del número de Froude (Fr), para diferentes diámetros del disco de teflón (D).	76
Figura 4.18 Gráfica de la altura del jet adimensional (H_j/D) contra el número de Froude (Fr), para diferentes valores del número de Bond (Bo).	77
Figura 4.19 Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c/D) en función del número de Froude (Fr), para diferentes valores de densidad del disco.	78
Figura 4.20 Gráfica del ángulo de cavidad (Θ) contra el número de Froude (Fr).	79
Figura 4.21 Gráfica de la altura del jet adimensional (H_j/D) en función del número de Froude (Fr).	80
Figura 4.22 Gráfica de la tensión superficial (σ) en función de la concentración de surfactante en la solución (C).	81
Figura 4.23 Imágenes de la formación de la corona para un disco de teflón de diámetro de 1" que impacta con una velocidad de 250 cm/s . Imagen izquierda agua pura con tensión superficial de 72.8 mN/m . Imagen derecha solución con SDS a 1 cmc con tensión superficial 38.45 mN/m .	82
Figura 4.24 Imágenes de la corona del splash y su cavidad a instantes de cerrarse para un disco de teflón de diámetro de 1" que impacta con una velocidad de 250 cm/s . Imagen izquierda agua pura con tensión superficial de 72.8 mN/m . Imagen derecha solución con SDS a 1 cmc con tensión superficial 38.45 mN/m .	83
Figura 4.25 Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón diámetro de 1", para bajas concentraciones de surfactante en la solución acuosa.	84
Figura 4.26 Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores altos de concentración de surfactante en la solución acuosa.	85

Figura 4.27. Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón con diámetro de 2", para bajas concentraciones de surfactante en la solución acuosa.	86
Figura 4.28. Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón con diámetro de 2", para altas concentraciones de surfactante en la solución acuosa.	87
Figura 4.29 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores bajos de concentración de surfactante en la solución acuosa.	88
Figura 4.30 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores altos de concentración de surfactante en la solución acuosa.	89
Figura 4.31 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2", para valores bajos de concentración de surfactante en la solución.	90
Figura 4.32 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2", para valores altos de concentración de surfactante en la solución.	91
Figura 4.33 Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores bajos de concentración de surfactante SDS en la solución acuosa.	92
Figura 4.34 Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón con diámetro de 1", para valores altos de concentración de surfactante en la solución.	93
Figura 4.35 Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2", para valores bajos de concentración de surfactante en la solución.	94
Figura 4.36. Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2", para valores altos de concentración de surfactante en la solución.	95
Figura 4.37 Gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función de la concentración (C) de surfactante, para valores de velocidad de impacto de 160 y 250 cm/s empleando un disco de teflón de 1" de diámetro.	96
Figura 4.38 Gráfica de la altura del jet adimensional (H_j/D) en función de la concentración (C) de surfactante de la solución, para valores de velocidad de impacto de 160 y 250 cm/s empleando un disco de teflón de diámetro de 1".	97
Figura 4.39 Gráfica de la profundidad adimensional en función del número de Frode, para diferentes números de bond de un disco de teflón de diámetro de 1".	98
Figura 4.40 Gráfica del ángulo de la cavidad en función del número de Froude, para diferentes números de Bond de un disco de teflón de diámetro de 1".	99
Figura. 4.41 Gráfica de la altura del jet adimensional en función del número de Froude, para diferentes números de Bond de un disco de impacto de teflón de diámetro de 1".	100
Figura 4.42 Etapas del splash en el experimento de laboratorio lado izquierdo y en la simulación realizada en DualSPHysics lado derecho. A) Formación de corona del splash. B) Formación de la cavidad de aire. C) Formación del jet líquido.	101
Figura 4.43 Profundidad de la cavidad (H_c) contra la velocidad de impacto (V_i), para el disco de teflón de 1" de diámetro tanto caso experimental y numérico.	103
Figura 4.44 Altura del jet (H_j) contra velocidad de impacto (V_i), para disco de teflón de diámetro de 1" para casos experimental y numérico.	104
Figura 4.45 Profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función del número de Frode (Fr), para disco de diámetro $D = 1/2$ ".	106

Figura 4.46 Profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función del número de Froude (Fr), para disco de diámetro $D = 1$ ".	107
Figura 4.47 Profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función del número de Froude (Fr), para disco de diámetro $D = 2$ ".	108
Figura A.1 Esquema de los elementos de la función de interpolación para el cálculo de la función en la partícula i [2].	120

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Densidades y tamaños de los discos de impacto.	36
Tabla 3.2 Valores de concentración de las soluciones acuosas con surfactante empleadas.	37
Tabla 3.3 Valores de concentración de surfactante y su respectivo cantidad de masa de surfactante necesaria para preparar un volumen de 0.5 L de solución.	38
Tabla 3.4 Descripción de las funciones de los icono de la barra de menús del software Attension Theta CAM 2008.	45
Tabla 3.5 Constantes definidas y parámetros necesarios para correr la simulación.	58

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1 Valores de velocidad de impacto teórica y experimental para la altura de caída libre del disco.	62
Tabla 4.2 Valores de tensión superficial medidos de las soluciones a diferentes concentraciones.	81
Tabla 4.3 Comparación de velocidades de impacto experimental y numérico y nivel de líquido requerido para producir en la simulación la velocidad de impacto.	102
Tabla 4.4. Casos de simulaciones realizadas con diferentes resoluciones y su respectiva altura del jet obtenida.	102
Tabla 4.5 Valores numéricos de la profundidad de la cavidad y de la altura del jet para los discos de ½”, 1” y 2” en diferentes velocidades de impacto.	105
Tabla 4.6 Valores numéricos de la profundidad de la cavidad adimensional para diferentes valores del número de Froude y diferentes tamaños de disco.	106

RESUMEN

Existen muchos procesos en la naturaleza y en diferentes procesos industriales en donde interactúan un líquido y un sólido, ya sea cuando un sólido golpea a un líquido, o un líquido golpea a un sólido. Uno de los objetivos principales de la investigación se centra en cuantificar los cambios observables en la respuesta del fluido cuando se reduce su tensión superficial.

Se realizó un análisis de las deformaciones que se presentan en la superficie del agua cuando es impactada por un sólido. Como parte de la simplificación del estudio, se confinó el líquido en una celda rectangular vertical de espesor reducido. De tal manera que las deformaciones en la interface fueron inducidas dentro de un sistema confinado cuasi 2D, en donde el líquido podría desplazarse principalmente en 2 dimensiones y bajo la influencia de la fuerza de gravedad. Para generar las deformaciones se empleó un disco sólido que al dejarlo caer dentro de la celda cuasi 2D golpeaba la superficie del líquido. Se analizaron diferentes soluciones acuosas en las que se varió la tensión superficial del agua.

Se pueden identificar tres estructuras fluidas al inducirse deformaciones superficiales en el líquido: Primeramente se forma lo que se conoce como corona del splash cuando el sólido impacta la superficie. Posteriormente, se forma una cavidad de aire cuando el sólido entra al líquido y desciende a través de él. Finalmente, un jet sale expulsado a medida que la cavidad se va cerrando. Mediante análisis de imágenes se determinó la velocidad de impacto del disco, la profundidad máxima de la cavidad, el ángulo en la cavidad, así como la altura máxima del jet.

Para analizar el efecto de la tensión superficial sobre la deformación superficial, en esta investigación se consideró una región de velocidades de impacto bajas (para números de Froude bajos de 0 a 5). Para modificar la tensión superficial del agua se empleó un surfactante hidrofílico. Al reducir la tensión superficial del agua se obtuvo un aumento en los valores máximos tanto de la profundidad de la cavidad como de la altura del jet. Esto es porque al reducir la tensión superficial se disminuye la fuerza necesaria para aumentar el área superficial durante las deformaciones.

De manera adicional se incluyeron resultados numéricos obtenidos por el método de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH por sus siglas en inglés). El modelo numérico reproduce cualitativamente las deformaciones observadas en los resultados experimentales para el caso de agua pura.

Palabras clave: splash, bidimensional, tensión superficial, agua, surfactante.

ABSTRACT

There are many processes in nature and industrial processes in which a liquid and a solid interact themselves, such as when a solid impacts on a liquid, or a liquid impacts on a solid. One of the main goals of the research is to quantify the observable changes in the fluid response when its surface tension is reduced.

Deformations on a water surface impacted by a solid were analyzed. As part of the simplification of this study, the liquid was confined into a vertical rectangular cell with a reduced thickness. Therefore, the interface deformations were induced within a quasi-2D confined system, where the liquid could move mainly in 2 dimensions and under the influence of gravity. Dropping a solid disc that impacts on the water surface induced the deformations inside the quasi-2D cell. Different aqueous solutions were analyzed in which the water surface tension was varied.

Three fluid structures can be identified as surface deformations in the liquid are induced: First, a splash crown is formed when the solid impacts. Then, an air cavity is formed when the solid enters and descends through the liquid. Finally, a jet is ejected as the cavity is closing. The impact velocity of the disc, the maximum cavity depth, the angle of the cavity, and the maximum height of the jet were determined by using image analysis.

To analyze the effect of surface tension on surface deformation, a region of low impact velocities (for low Froude numbers from 0 to 5) was considered in this research. To modify the surface tension of the water, a hydrophilic surfactant was used. As reducing the surface tension of the water, both the maximum depth of the cavity and the maximum height of the jet showed an increase in its value. This is because reducing the surface tension decreases the force necessary to increase the surface area during deformations.

In addition, numerical results obtained by the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method are shown. The numerical model reproduced qualitatively the deformations observed in the experiments in the case of pure water.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta aspectos fundamentales del trabajo, inicia con el planteamiento del problema seguido de su respectiva justificación. Después sigue con estado del arte relacionado a la deformación de una superficie libre líquida y fenómenos que tienen que ver con la interacción de un objeto sólido y un líquido en su interface. Por otra parte, se describen el objetivo general y los objetivos específicos y se finaliza con la hipótesis.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Mecánica de Fluidos estudia la respuesta de los fluidos debido a las fuerzas ejercidas sobre ellos. En este caso el splash es un fenómeno que se presenta cuando un cuerpo sólido o líquido impacta sobre una superficie líquida libre, la cual se deforma y se dispersa en respuesta a la fuerza con la que fue impactada.

El impacto de objetos sólidos sobre superficies fluidas ha sido estudiado principalmente en sistemas experimentales en 3 dimensiones. Algunos estudios experimentales y de simulación se han enfocado en la profundidad de la cavidad de aire que se forma durante la entrada de un objeto sólido dentro de la fase líquida, otros se han enfocado en la estructura de la corona de splash que se forma al impactar objetos esféricos ya sean sólidos o en forma de gotas de líquido, entre otros estudios.

Se plantea el estudio del impacto sobre una superficie fluida al variar su valor de tensión superficial y con ello modificar las propiedades interfaciales del sistema. Lo anterior se verá reflejado en la forma de la corona de splash que se genere, la forma y profundidad de la cavidad de aire, así como en la altura del jet.

La investigación aquí planteada propone una técnica para realizar ensayos sobre superficies líquidas, a nivel de Mecánica de Fluidos, que permitan analizar el cambio en la deformación de su interface al disminuir la tensión superficial del líquido, en el régimen de bajas velocidades de impacto. Por lo tanto, el presente estudio plantea una forma de caracterizar interfaces fluidas en 2D ante deformaciones inducidas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El splash es un fenómeno asociado a la Mecánica de Fluidos y muestra la respuesta de una superficie líquida a la cual se le ha transferido energía por el impacto de un objeto. Es un fenómeno común en la naturaleza y se presenta en industrias que manejan líquidos. Su estudio es de gran interés en la industria de impresoras por inyección de tinta en donde se busca reducir el splash debido a la pérdida de material.

Se han desarrollado estudios con aplicaciones en la arquitectura naval para el diseño de barcos, buques e hidroaviones, en el área militar para el desarrollo de misiles, además de que ayuda a comprender cómo algunos animales como los lagartos basiliscos y algunas aves de costa pueden caminar por la superficie libre del mar.

En diferentes estudios se han considerado parámetros tales como la velocidad de impacto, la altura de liberación del objeto, el diámetro del objeto, las fuerzas inerciales, de flotación, de gravedad y elásticas, así también como propiedades del fluido tales como su densidad y viscosidad. Estudios recientes han incluido fluidos no Newtonianos, como por ejemplo fluidos micelares viscoelásticos en donde es tomada en cuenta la elasticidad del fluido.

Debido a que el impacto sobre una superficie líquida involucra la deformación de su interface, es importante enfocar el estudio del splash analizando el papel que juega la tensión superficial. Por otra parte, se propone desarrollar la experimentación en dos dimensiones, en busca de correlaciones más sencillas que simplifiquen el comportamiento observado durante el splash. En virtud de que el estudio de la deformación se realizará mediante análisis de imágenes, es favorable una simplificación de dimensiones en el sistema de estudio y trabajar en 2D, ya que esto permite mejorar la definición de los perfiles, se tendrá un mejor control y precisión de la posición de los impactos favoreciendo así la reproducibilidad de los ensayos, adicionalmente se logrará una reducción considerable en el volumen del fluido a estudiar. Una de las desventajas detectada es que presentará efectos de confinamiento por la presencia cercana de paredes. Por lo anteriormente expuesto, se propone estudiar la deformación de una interface fluida debido al impacto de un objeto sólido en 2D al variar su tensión superficial.

1.3 ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DEL PROBLEMA

Los primeros estudios relacionados con el splash datan de inicios del siglo XX. En la mayoría de estas investigaciones se ha tomado en cuenta sólo una de las etapas que involucra el splash, como por ejemplo la formación de la corona de splash que rodea al objeto que impacta, la formación de la cavidad que se forma detrás del objeto, o la formación del jet cuando se cierra la cavidad de aire, entre otros aspectos. Se pueden encontrar en la literatura científica una diversidad de trabajos relacionados con el splash. Algunos trabajos consultados han enfocado su investigación en el impacto de fluidos no newtonianos (Cheny y Walters, 1996; Cheny y Walters, 1999; Bandyopadhyay, 2013) otros han enfocado su estudio en el impacto de gotas en superficie sólidas o películas delgadas de fluido (Leng, 2001; Thoroddsen, 2002; Randy et al., 2006; Thoroddsen et al., 2008; Stevens, 2014), otros se han enfocado en simulación numérica para analizar la cavidad de aire y la corona del splash (Gaudet, 1998; Tomé et al., 2010) otros trabajos se han enfocado en el impacto de superficie de agua con diferentes geometrías de objetos para estudiar el comportamiento de entrada de dichos objetos (Huang et al., 2015; Russo et al., 2018; Chen et al., 2019; Dymont, 2019). Algunas de las publicaciones que aportan antecedentes más cercanos con el presente trabajo se muestran a continuación:

Glasheen y McMahon (1996) realizaron experimentos en una superficie de agua impactando discos de manera frontal controlada a través de un eje unido al disco (ver figura 1.1 a)). Determinaron la fuerza con la que entra al agua a bajas velocidades y obtuvieron la profundidad adimensional a la cual se sella la cavidad formada por el disco para diferentes números de Froude. Además en su experimentación obtienen que la masa virtual adimensional M , tiene un valor aproximado de $1/\pi$ y obtienen una correlación lineal que relaciona la raíz cuadrada del número de Froude (\sqrt{Fr}) a la profundidad relativa $\frac{h_s}{r}$. Donde h_s es la profundidad máxima de la cavidad y r es el radio del disco y observaron que al aumentar el número de Froude se tiene una mayor profundidad de la cavidad generada al momento de su cierre.

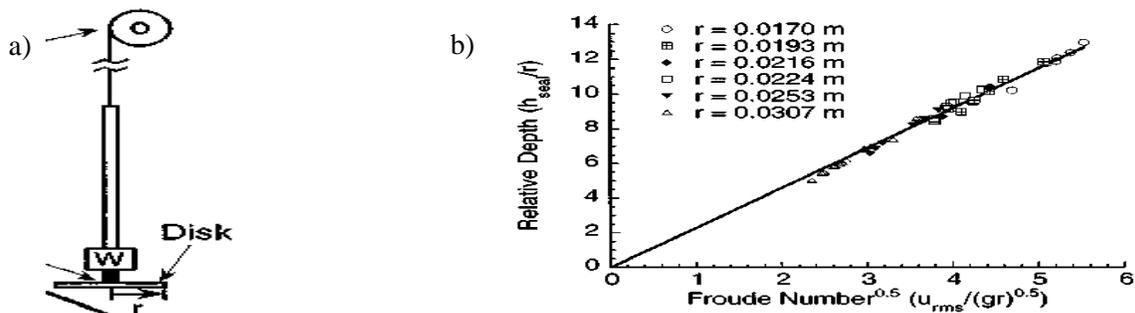


Figura 1.1 a) Esquema del dispositivo usado para impactar un disco de manera frontal. b) Gráfica de la profundidad relativa de sellado con respecto a la raíz cuadrada del número de Froude (Glasheen y McMahon, 1996).

Lee et al. (1997) realizaron experimentos de impacto de proyectiles esféricos a muy altas velocidades sobre una superficie de agua libre. En tales experimentos a velocidades

altas es característico que se produzca un cierre previo dentro de la cavidad al cual se identificó como profundidad del cierre quedando atrapada una burbuja al cerrarse. Ellos desarrollaron un modelo analítico basado en la energía cinética que se transfiere del proyectil para desarrollar la cavidad, el cual estima variables de la dinámica de la cavidad como la localización de la profundidad del cierre, el tiempo de cierre, el radio de la cavidad a un tiempo y profundidad específicas y la velocidad con la que crece la cavidad. Además determinaron que para esferas que impactan la superficie libre del agua en un régimen de alta velocidad, el tiempo de cierre de profundidad es independiente de la velocidad de impacto del proyectil, similar al impacto de superficie libre pero a bajas velocidades y que la longitud del cierre de profundidad sí varía con la velocidad de impacto del proyectil.

En la figura 1.2 a) se muestra una imagen de la profundidad del cierre. En la figura 1.2 b) se ve la variación del cierre de profundidad con relación a la velocidad de impacto.

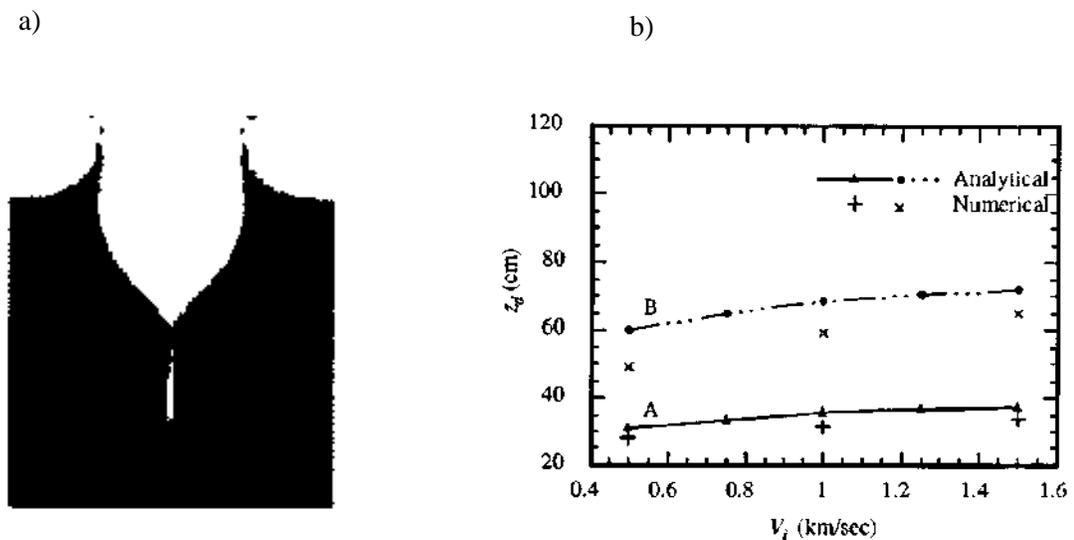


Figura 1.2 a) Imagen de la profundidad del cierre b) Gráfica de la comparación del modelo analítico y una simulación numérica para el cierre de profundidad en función de la velocidad de impacto. Caso A (esfera de 1 cm de diámetro) y caso B (esfera de 2 cm de diámetro) (Lee et. al, 1997).

Por otra parte Thoroddsen y Shen (2001) encontraron que en un medio granular, la máxima altura del jet depende de la velocidad de impacto, de la gravedad y de la viscosidad del medio granular a través del producto de los números de Reynolds y Froude, teniendo en cuenta que para un medio granular los efectos de la tensión superficial son despreciables. En sus resultados llegaron a una relación lineal entre la altura adimensional del jet y el producto de los números de Reynolds y Froude. Esto es que cuando el producto de estos números se incrementa se obtiene una altura mayor del jet, ver figura 1.3 El diámetro de grano del medio granular y la altura de liberación de la esfera juegan un papel importante para determinar los números de Reynolds y Froude respectivamente.

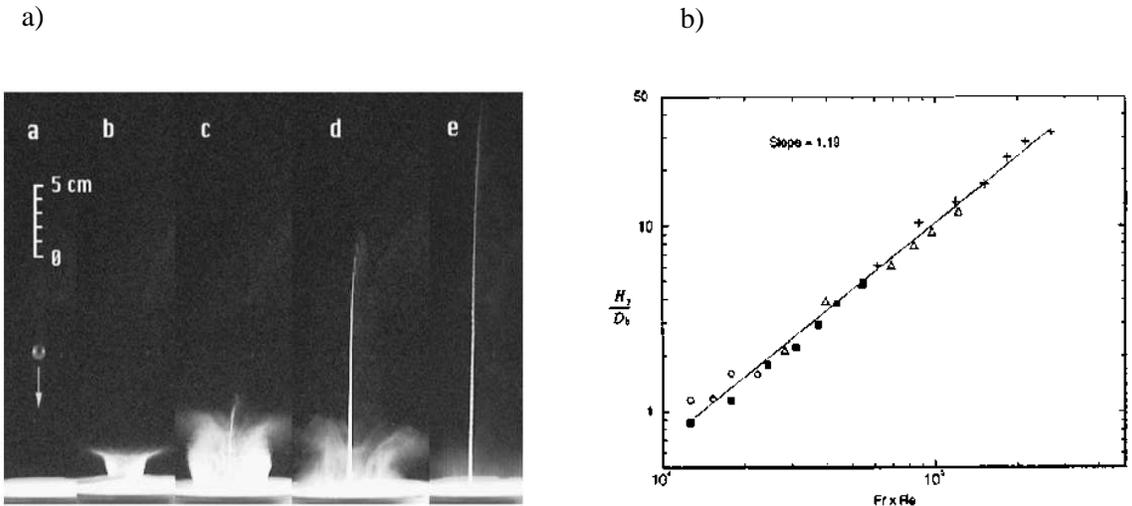


Figura 1.3 a) Jet producido por el impacto de una esfera en una superficie granular. b) Gráfica de la altura adimensional del jet en función de los números de Reynolds y Froude (Thoroddsen y Shen, 2001).

Nigen y Walters (2001) realizaron experimentos de impacto en superficies de soluciones al variar su viscosidad y observar el cambio de la altura del jet planar. Ellos describen que en el impacto sobre una superficie líquida con proyectiles esféricos se forma un jet unidimensional axis simétrico, pero cuando se usan geometrías longitudinales como cilindros, en especial cilindros largos, se forman jets bidimensionales. Ellos determinan que la altura del jet planar que se forma al impactar una superficie libre con un objeto cilíndrico no se ve afectada al modificar la viscosidad del fluido como lo es en el caso de jets unidimensionales axis simétricos. Mientras que para cilindros de longitud reducida sí se ve afectada la altura del jet. Al aumentar la viscosidad del fluido se observó que la altura del jet desarrollado decrece de manera similar a los jets unidimensionales formados por el uso de objetos esféricos.

En la figura 1.4 se presentan los tipos de jets generados por diferentes geometrías del objeto de impacto, se observa que para cilindros largos el jet no cambia de altura al variar la viscosidad del fluido, mientras que en los otros casos sí lo hace.

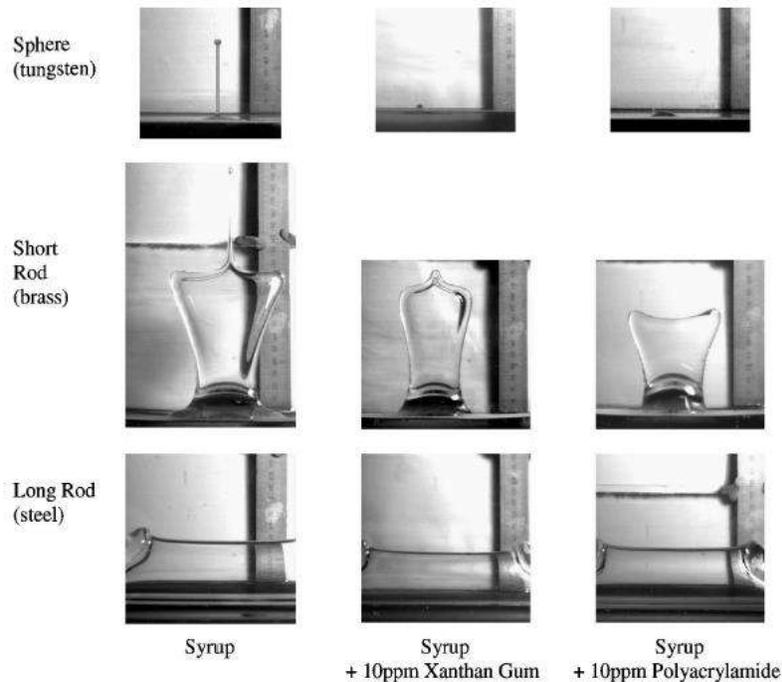


Figura 1.4 Jets formados por el impacto de una esfera de tungsteno, un cilindro corto de latón y un cilindro largo de acero todos con un diámetro de 8 mm, liberados desde una altura $H=50\text{ cm}$. La altura del jet se ve afectada al modificar la viscosidad de la solución en la impactan (Nigen y Walters, 2001).

Laverty (2004) desarrolló una correlación que permite calcular el coeficiente de impacto en función del tiempo teniendo en cuenta la geometría esférica de los objetos usados en sus experimentos, así como la curvatura de la deformación del splash. Obtiene resultados más precisos que las correlaciones de Von Karman y Wagner, ver figura 1.5 b). Obtuvo además el valor límite del diámetro de una esfera para la formación de una cavidad. Otra información interesante encontrada en ese trabajo fue el ángulo de cono formado por la cavidad el cual decrece conforme la esfera se hunde pero para una profundidad de dos a cuatro diámetros de la esfera el ángulo se mantiene constante y para profundidades mayores el ángulo finalmente decrece hasta que la cavidad se cierra. Este fenómeno se relaciona con la desaceleración de la esfera mientras se hunde en el agua.

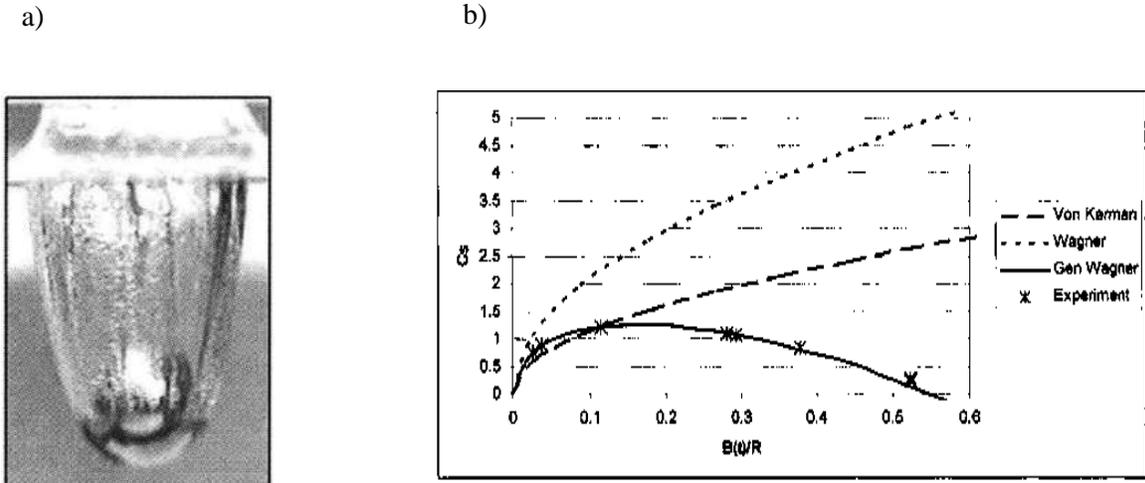


Figura 1.5 a) Cavity formada por una esfera de acero. b) Gráfica del coeficiente de impacto en función de la profundidad adimensional (Lavery, 2004).

Akers y Belmonte (2006) realizaron un estudio experimental del impacto de esferas sólidas en superficie líquida libre donde el fluido de trabajo era una solución viscoelástica de micelas cilíndricas. Encontraron que para este tipo de fluido la profundidad de penetración adimensional es aproximadamente la raíz cubica del número de Froude elástico. Encontraron además los parámetros que rigen si se forma una cavity suave o rugosa, está determinado por el número de Deborah y el número de Grashof, los cuales relacionan la velocidad de impacto y el diámetro de la esfera respectivamente. Por tanto para un determinado tamaño de esfera se obtuvo una velocidad de impacto límite a la cual se empieza a formar una superficie de cavity rugosa o de lo contrario se obtendrán superficies de cavity suaves para este tipo de fluido, ver figura 1.6 a).

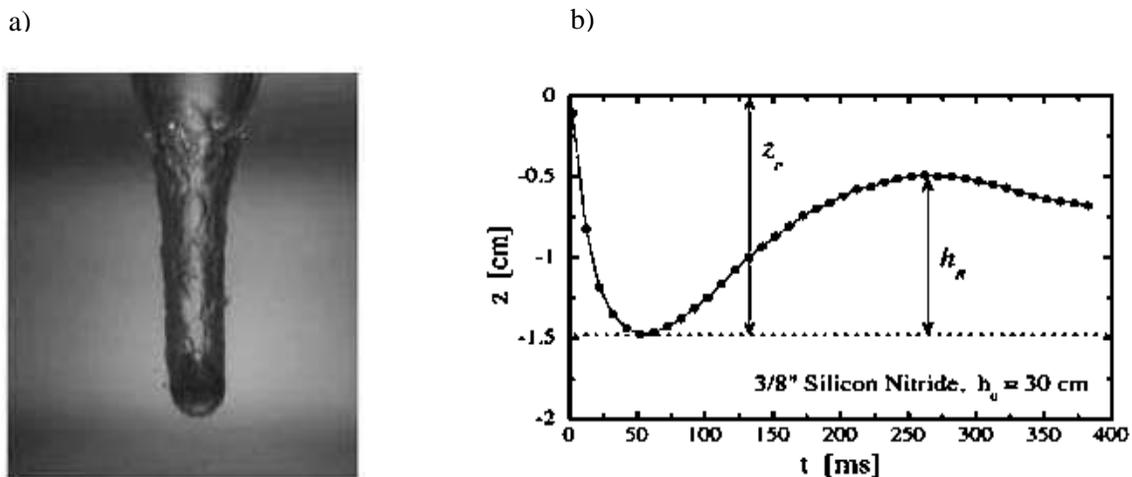


Figura 1.6 a) Superficie rugosa de la cavity formada por una esfera. b) Gráfica de la posición de una esfera en el fluido en función del tiempo (Akers y Belmonte, 2006).

Thoroddsen y Etho (2006) realizaron un estudio del impacto de gotas líquidas sobre la superficie de una película delgada de fluido. En el experimento se analizó que la formación de los agujeros de la corona del splash al momento que la gota impacta. Se observó que este fenómeno estaba gobernado principalmente por la diferencia de tensión superficial entre ambos fluidos que se esparcen sobre la superficie de la corona del splash. Por efecto Marangoni el espesor de la corona se adelgaza hasta que se forman pequeños agujeros. Los agujeros de la corona van creciendo hasta encontrarse con otros cercanos formando una red de filamentos de fluido hasta que se rompe formando un roció de gotitas en el aire, ver figura 1.7. La rapidez a la que se forman los agujeros y la separación de los mismos se debe principalmente a la viscosidad de la gota que impacta.

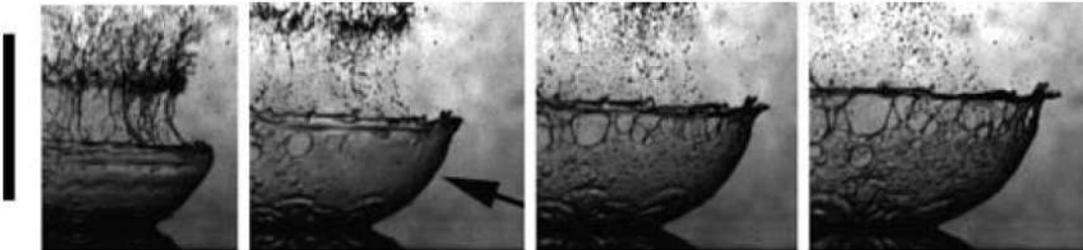
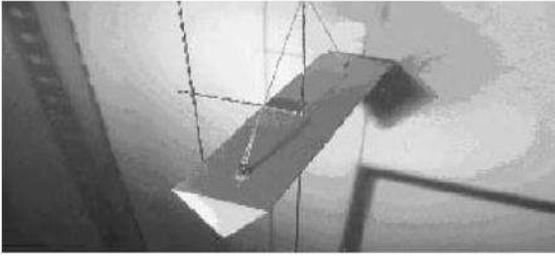


Figura 1.7 Formación de agujeros en la superficie de la corona de una gota al impactar sobre una película líquida de diferente tensión superficial (Thoroddsen y Etho, 2006).

Alam et al. (2007) utilizaron la técnica numérica “Motion Particle Semi-implicit” para calcular la deformación de la corona del splash en 2D cuando un objeto sólido en caída libre impacta sobre una superficie líquida. Se compararon los casos en donde se tomó en cuenta la tensión superficial del líquido y el caso sin tensión superficial. Los resultados numéricos los validaron experimentalmente usando un tanque donde el fluido de trabajo fue agua y el objeto utilizado para impactar la superficie libre fue un prisma triangular (ver figura 1.8 a). Ellos encontraron que para objetos de tamaño reducido el efecto de la tensión superficial es muy importante en el desarrollo de la corona; mientras que para objetos muy grandes el efecto de la tensión superficial no tiene relevancia en la formación de la corona ya que domina el efecto de la fuerza de gravedad.

a)



b)

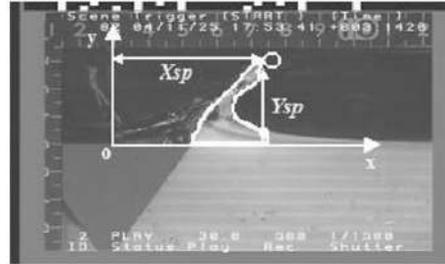


Figura 1.8 a) Prisma triangular usado en el impacto de superficie líquida. b) Deformación de la corona del splash (Alam et al., 2007).

Kubota y Mochizuki (2011) realizaron un estudio de la influencia que tiene la forma geométrica de los objetos sólidos que se impactan en la superficie de un líquido y así generar el splash. Ellos encuentran que las etapas de la formación de la corona del splash y la formación de la cavidad de aire se relacionan con la forma del objeto sólido debido a que la película de fluido cercana a la superficie del sólido interactúa de acuerdo al perfil de la forma geométrica del objeto sólido. Para el caso de esferas, la película de fluido que entra en contacto con el sólido logra adherirse en una mayor área superficial a medida que la esfera desciende por el fluido. Para el caso de conos con frente semiesférico, la película de fluido tiende a desprenderse inmediatamente cuando hay un cambio de curvatura, lo cual sucede al finalizar el frente de ataque del objeto y comienza la parte posterior de la superficie del objeto. Por lo tanto estos cambios de geometría modifican la forma de la corona y de la cavidad de aire, ver figura 1.9.

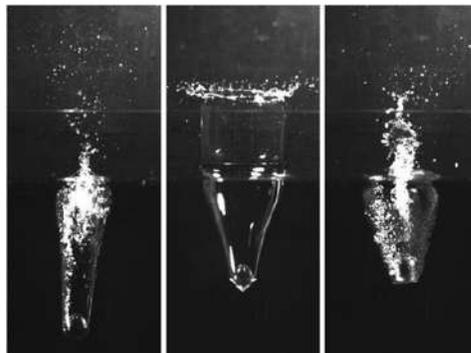


Figura 1.9 Formas del splash generadas al impactar objetos sólidos de diferente geometría (Kubota y Mochizuki, 2011).

Wang J. et al. (2015) realizaron un estudio numérico basado en la técnica “Boundary Integral Equation” (BIE) por sus siglas en inglés, para investigar el impacto y entrada de una cuña en una superficie libre de agua el cual validaron mediante experimentos de impacto en superficie de agua por una cuña que cae libremente. La entrada de la cuña en el agua fue descrita mediante cuatro etapas.

Ellos determinaron mediante el análisis numérico y experimental que en la zona cercana al cierre de la cavidad el flujo de aire aumenta debido a una caída de presión en el cuello de la cavidad. Lejos de esa zona, la presión se uniformiza y por tanto el flujo de aire en la mayor parte de la cavidad es despreciable.

En la figura 1.10 a) se muestran las etapas en el impacto de la cuña contra la superficie del agua y en el inciso b) se presenta la gráfica de contornos de presión para la cavidad de aire que está a punto de cerrarse.

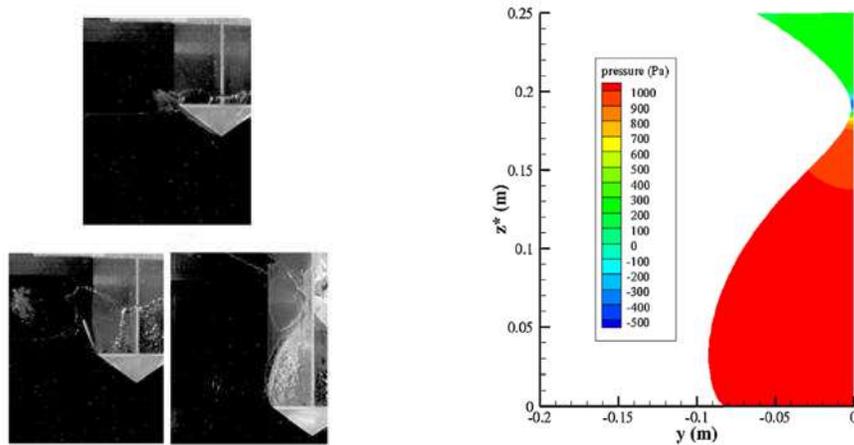


Figura 1.10 a) Etapas de la entrada al agua de la cuña. La imagen superior es la etapa de impacto, la imagen inferior izquierda es la etapa de transición y la imagen restante es la etapa postcierre. b) Gráfica de contornos de presión de la cavidad de aire cerca del cierre; z , y son las coordenadas vertical y horizontal respectivamente de la cavidad (Wang J. et al., 2015).

Kormakz y Güzel (2017) estudiaron el efecto que tiene la hidrofobicidad en el desarrollo de la corona del splash para ello usaron un spray hidrofóbico para cubrir una sección de la superficie sólida de los objetos de impacto. Para la formación de la corona del splash se tiene inicialmente una dispersión de gotas que se desprenden de la superficie líquida al momento en que el objeto sólido la impacta. Conforme el objeto sólido penetra la superficie y desciende una cantidad de líquido se adhiere a la superficie sólida, a lo que se le denomina apilamiento. Una vez que el objeto ha descendido aproximadamente medio diámetro, el apilamiento de líquido sale expulsado en forma flujo de jet. Debido a la fuerza de gravedad el flujo de jet cae hacia la superficie líquida en forma de arco dando lugar a la corona del splash. Observaron que la separación del flujo del jet se presenta antes en superficies hidrofóbicas, por lo que la velocidad de dispersión del líquido aumenta. Por otra parte determinaron que la fuerza de impacto que el fluido ejerce en el objeto sólido es menor en superficies hidrofóbicas que en superficies sólidas normales.

En la figura 1.11 se muestra uno de los cilindros que usaron como objeto de impacto, se puede observar que la separación del flujo del jet se presenta antes en el lado izquierdo que en el lado derecho, esto debido al recubrimiento hidrofóbico que le fue aplicado.

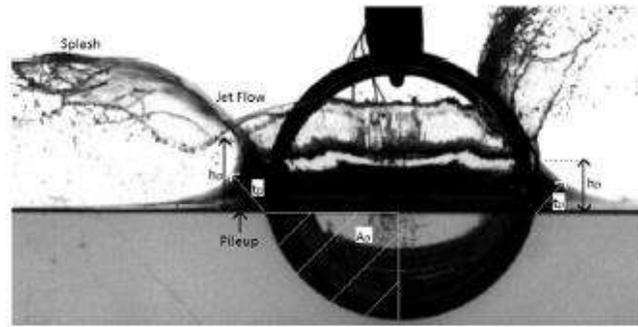


Figura 1.11 Desarrollo de la corona del splash durante el impacto de un cilindro hueco sobre una superficie líquida. Se puede observar el apilamiento de líquido, el flujo de jet y la corona del splash. La superficie izquierda del cilindro posee un recubrimiento hidrofóbico y la separación del flujo del jet se presenta a menor altura (Kormakz y Güzel, 2017).

Russo et al. (2018) realizaron un estudio experimental del impacto de una cuña a diferentes ángulos de impacto y a diferentes ángulos de rotación del talón de la cuña al momento del impacto. Determinaron que el ángulo del talón de la cuña juega un papel muy importante en la distribución de velocidades del fluido impactado, en la carga hidrodinámica sobre la cuña y en la energía transferida por la elevación de la superficie del fluido. Por otra parte el ángulo de velocidad en el momento del impacto tiene un efecto en la distribución espacial en la carga hidrodinámica.

En la figura 1.12 a) se muestra el sistema experimental que emplearon para la realización de los experimentos con cuña inclinada. En la figura 1.12 b) se observa el campo de velocidades en el fluido es mayor y se concentra en el lado de la cuña que impacta la superficie líquida cuando la cuña entra con un ángulo de rotación de talón de $\theta = 30^\circ$ y un ángulo de impacto $\alpha = 30^\circ$.

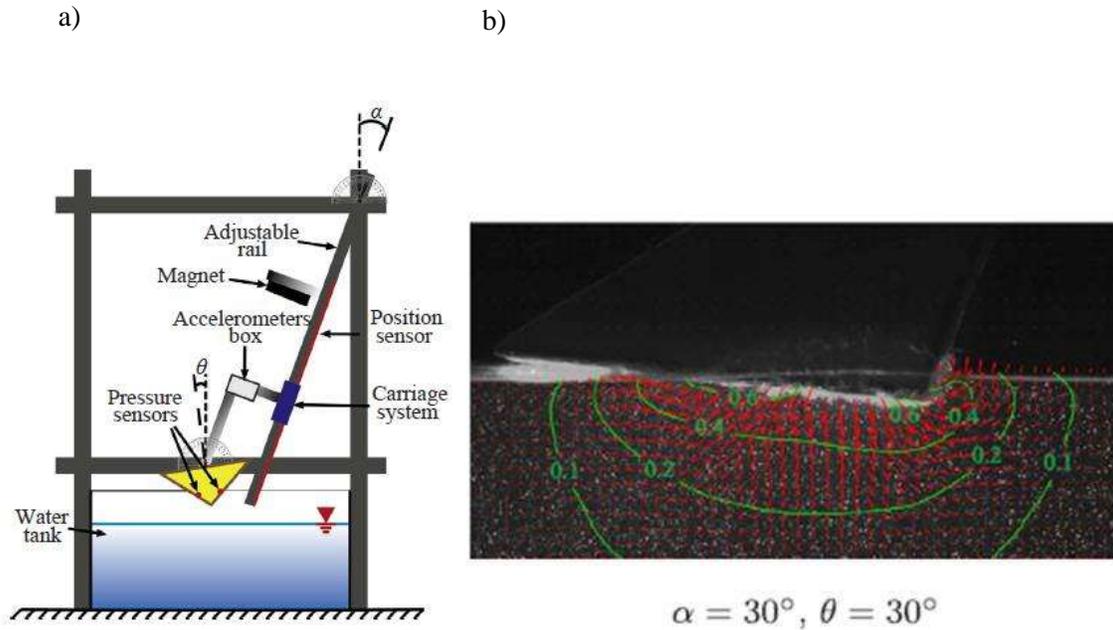


Figura 1.12 a) Sistema experimental de impacto de una cuña. α siendo el ángulo de la trayectoria de la cuña y θ es el ángulo de asimetría de la cuña. b) Distribución de velocidades del fluido en el momento del impacto de la cuña por velocimetría de imágenes de partículas (Russo et al., 2018).

Vincent et al. (2018) investigaron los efectos de la fuerza de impacto de una cuña al variar el ángulo geométrico de la cuña, así como la forma de la corona del splash al variar la velocidad de impacto de la cuña. Ellos determinaron un ángulo de transición de $\alpha \cong 70^\circ$ donde se da el cambio de fuerzas de impacto menores a $10 N$ para ángulos de cuña menores a 70° y fuerzas de impacto grandes cuando el ángulo de cuña es mayor a 70° , lo cual genera picos transitorios.

Además determinaron que la forma de la corona del splash adquiere una forma de ola conforme se aumenta la velocidad de impacto. Para velocidades de impacto mayores, la corona se deforma más y toma la forma de una ola más pronunciada ya que la fuerza de succión de Venturi aumenta con la velocidad de impacto y la fuerza de tensión superficial no es suficientemente grande para evitarlo.

En la figura 1.13 se muestra cómo al reducir el ángulo de cuña se reduce la fuerza de impacto. Por otra parte se observa el cambio en la forma de la corona al variar la velocidad de impacto. Para valores bajos del número de Weber (fuerza de succión de Venturi pequeña) la tensión superficial mantiene una forma de la corona aplanada.

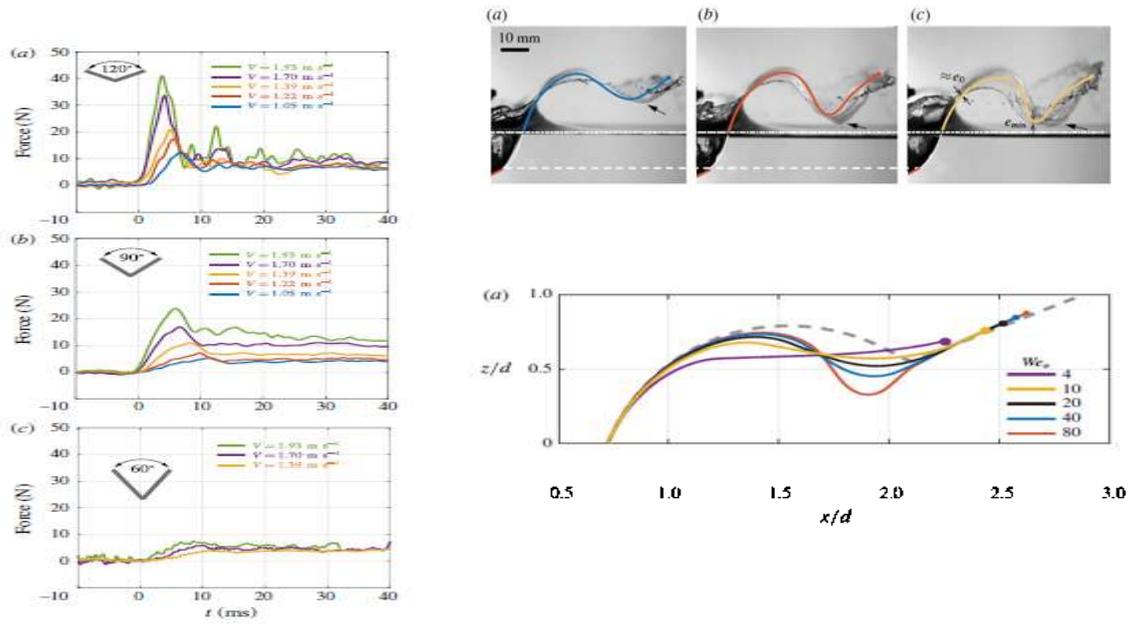


Figura 1.13 En la imagen izquierda se muestra la fuerza de impacto en función del tiempo para diferentes ángulos de cuña. En la imagen superior derecha se muestra que para diferentes velocidades de impacto la forma de la corona del splash muestra ondulaciones. En la imagen inferior derecha se muestra la deformación de la corona del splash para varios valores del número de Weber (Vincent et al., 2018).

1.4 HIPÓTESIS

Al modificar la tensión superficial de un fluido se modifican las propiedades interfaciales entre la fase líquida y la fase del gas con la que está en contacto, por lo cual se espera que la interface presente un aumento en su área superficial al disminuir su tensión superficial, aumentando con ello la profundidad de la cavidad y la altura del jet que se forma durante el impacto de un objeto sólido sobre la superficie fluida.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la deformación generada durante el impacto de un disco sólido sobre la superficie de una solución acuosa en un sistema 2D y cómo se ve modificada al variar su tensión superficial.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Construir una celda experimental para el análisis de la deformación superficial de un líquido en un sistema 2D.
2. Realizar un análisis de los números adimensionales que caracterizan al sistema.
3. Determinar el ángulo del cono de la cavidad, la profundidad de la cavidad y la altura del jet que se forma durante el impacto de un disco sobre una superficie líquida empleando análisis de imágenes.
4. Analizar el efecto del tamaño y densidad del disco que impacta en la deformación de la superficie líquida.
5. Medir la tensión superficial de una solución acuosa con surfactante hidrofílico cuando se varía su concentración.
6. Estudiar el efecto de la tensión superficial sobre la cavidad y el jet que se forman al impactar un disco en la superficie del líquido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta toda la información de conceptos teóricos pertinente al tema de investigación, inicia con el concepto de splash ,luego con los conceptos de cada una de sus formaciones, siguiendo con la definición de tensión superficial y finalizando con la definición de algunos números adimensionales empleados en la investigación.

2.1 SPLASH

La deformación generada sobre una superficie líquida ya sea por el impacto de un objeto sólido o por el impacto de una gotas líquida es a lo que se le conoce como splash. Asociado al splash se pueden identificar una serie de movimientos del fluido como son: una formación de una corona, la formación de una cavidad de aire y la formación de un jet líquido.

2.1.1 CORONA DE SPLASH

Es la deformación de la superficie libre de un fluido cuando se le impacta con un objeto ya sea sólido o líquido. La formación de la **corona de splash** se produce cuando el objeto golpea la superficie libre del fluido de prueba y le transfiere su energía durante el impacto. Cuando el objeto entra en contacto con la superficie del fluido, el fluido que es desplazado sale expulsado en forma de pequeñas gotas. Para objetos que poseen geometría esférica al momento de impactar generan de manera más clara una dispersión de gotas en forma de corona.

En la figura 2.1 se muestra la formación de la corona de splash por el impacto de una esfera sólida.

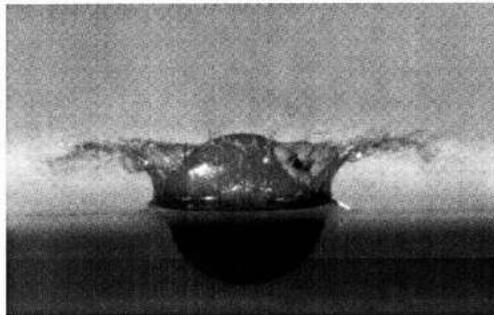


Figura 2.1 Formación de la corona de splash (Lavery, 2003).

2.1.2 CAVIDAD DE AIRE

El hueco de aire que un objeto va dejando atrás al penetrar un líquido se le identifica con el nombre de **cavidad**. La cavidad puede alcanzar un cierto valor de longitud antes de que quede sellada completamente por el fluido debido a su presión hidrostática del mismo. La longitud que alcanza la cavidad en el momento del cierre se le denominará **profundidad de la cavidad**.

En la figura 2.2 se muestra cómo se va formando una cavidad de aire por el impacto de una esfera.

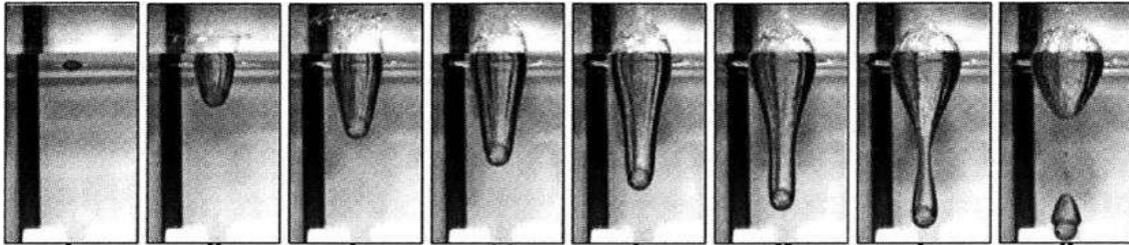


Figura 2.2 Formación de una cavidad por el impacto de una esfera (Lavery, 2003).

2.1.3 ÁNGULO DE LA CAVIDAD

El ángulo de la cavidad es el ángulo formado por las paredes de fluido adyacentes a la cavidad de aire. Este ángulo α tiene un valor máximo en el momento que se forma la cavidad de aire y va decreciendo conforme el objeto se hunde. Cuando la cavidad está a punto de cerrarse el ángulo de cavidad se deforma. En la figura 2.3 se tiene una representación del ángulo de cono para una cavidad de aire.

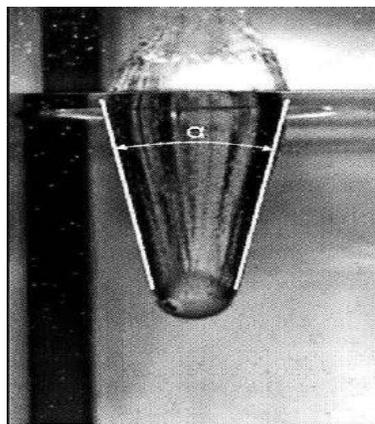


Figura 2.3 Ángulo de cono en una cavidad de aire formado por el paso de una esfera (Lavery, 2003)

2.1.4 JET DE LÍQUIDO

Una vez que la cavidad de aire se cierra, el fluido tiende a llenar la cavidad y se genera un flujo o chorro de líquido expulsado hacia fuera del fluido en forma de **jet**. Este fenómeno no solo se aprecia en sistemas fluidos sino también se ha observado en medios granulares, presentando un comportamiento similar a los fluidos.

En la figura 2.4 se tiene un ejemplo de la formación de un jet debido al impacto de una esfera en la superficie libre de un medio granular.

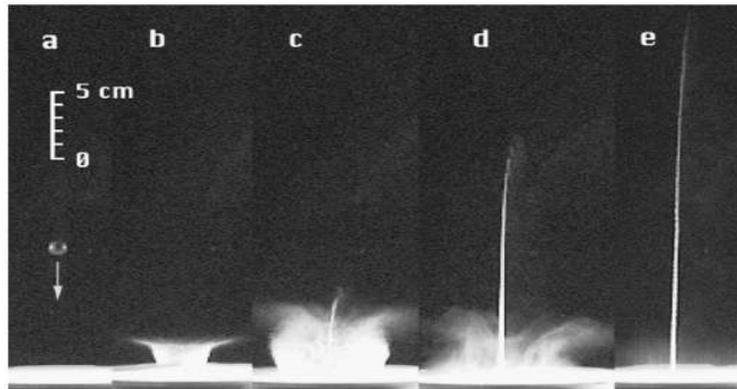


Figura 2.4 Formación de un jet por impacto de una esfera en un medio granular (Thoroddsen y Shen, 2000)

2.2 VELOCIDAD DE IMPACTO.

La velocidad de impacto de un objeto es la velocidad de caída libre que adquiere en el momento del impacto con la superficie líquida, esta es calculada a partir de la primera conservación de la energía donde la energía potencial del objeto sólido con respecto al nivel de la superficie libre debe de ser igual a la energía cinética que el objeto posee en el momento del impacto, despreciando la fuerza de arrastre del aire en la caída. Esto queda expresado de la siguiente forma:

$$mgh = \frac{1}{2}mV_i^2 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Reduciendo la ecuación y despejando la velocidad:

$$V_i = \sqrt{2gh} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

m : masa del objeto sólido en (g);

g : aceleración de la gravedad 981 (cm/s^2);

h : posición del objeto de impacto medido desde la superficie libre (cm);

V_i : velocidad de impacto del objeto (cm/s).

2.3 TENSIÓN SUPERFICIAL

En un líquido, contenido en un recipiente abierto a la atmósfera, existen fuerzas de cohesión que se equilibran entre sí para diferentes partículas de fluido dentro del mismo, excepto en la superficie libre del fluido. Las fuerzas de cohesión para las partículas de fluido en la superficie libre son mayores que las fuerzas entre las partículas de líquido y las del aire. Por tanto, se tiene un desequilibrio de fuerzas en la interface, donde las fuerzas de cohesión por parte del líquido tensan la superficie libre del fluido formando así una especie de membrana de fluido. Esta fuerza de tensión distribuida por unidad de longitud es lo que se conoce como tensión superficial, cuya unidad fundamental en el sistema CGS es dyn/cm. Cuando se pone un objeto de peso liviano como una aguja o incluso un mosquito sobre la superficie del agua, éste no se hunde debido a que la tensión superficial equilibra su peso. En la figura 2.5 se muestra de manera ilustrativa un mosquito parado sobre la superficie libre de un fluido, el cual no se hunde debido a la tensión superficial del agua Mataix (2012).

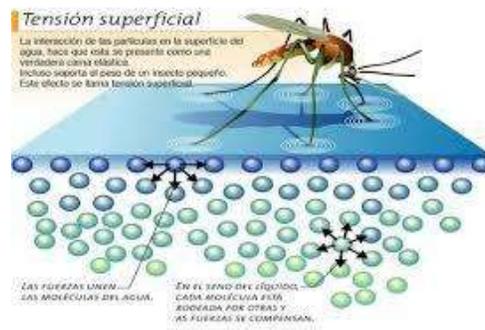


Figura 2.5 Un mosquito parado sobre la superficie libre de un fluido estático. [1]

2.4 SURFACTANTES O TENSOACTIVOS

Los surfactantes son moléculas de origen natural o químico cuya función es cambiar las propiedades en la interface de contacto entre dos fases, por ejemplo la tensión superficial para el caso de un líquido en contacto con aire o la tensión interfacial para dos fluidos inmiscibles en contacto. Las moléculas de surfactante se componen de dos partes: una parte hidrofílica o afín al agua representada por una cabeza polar y una parte hidrofóbica que no es afín al agua pero que puede ser afín al aceite o al aire, la cual se representa por una cola no polar.

Los surfactantes pueden ser clasificados por la carga iónica de su cabeza polar en la molécula de surfactante. En los surfactantes aniónicos la carga molecular es negativa, en los catiónicos es positiva; en los no iónicos su carga neta es cero; en los anfotéricos existen tanto cargas positivas como negativas en la molécula.

En la figura 2.6 se muestra el esquema de una molécula de surfactante, la cabeza es la parte polar de la molécula y la cola es la parte apolar; además se aprecia la orientación de las partes del surfactante con respecto a sus fases afines, la parte hidrofóbica se orienta hacia el aire y su parte hidrofílica se orienta hacia el agua (Rosen, 2004).

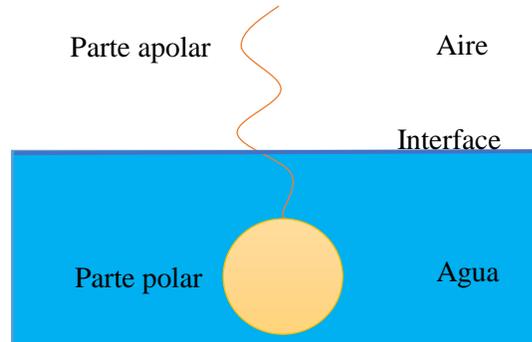


Figura 2.6 Representación de una molécula de surfactante ilustrando sus partes principales.

2.5 NÚMEROS ADIMENSIONALES

Una serie de números adimensionales pueden ser considerados durante el estudio del splash, entre los más importantes se tienen los siguientes: (Cengel y Cimbala, 2012)

2.5.1 NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds se define como la razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Este número adimensional es el parámetro que define si un flujo de fluido es laminar o turbulento. Para números de Reynolds pequeños las fuerzas viscosas estabilizan el movimiento aleatorio o las fluctuaciones que el fluido pueda presentar, dado que las fuerzas inerciales son de magnitud baja. Para números de Reynolds grandes, las fuerzas inerciales son muy grandes en relación con las viscosas y el fluido ya no puede fluir de manera ordenada, por tanto se obtiene que el fluido fluye de manera turbulenta.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

V : velocidad del fluido (cm/s);

ν : viscosidad cinemática (cm^2/s) que se puede expresar como $\nu = \frac{\mu}{\rho}$;

μ : viscosidad dinámica. ($g/cm s$);

L : longitud característica del sistema (cm);

ρ : densidad del fluido (g/cm^3).

2.5.2 NÚMERO DE FROUDE

El número adimensional de Froude se define como la relación de la fuerza inercial y la fuerza de gravedad. Este número es usado frecuentemente en el análisis de impacto en superficies fluidas libres. El número de Froude se expresa:

$$Fr = \frac{\text{Fuerza Inercial}}{\text{Fuerza de Gravedad}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

V : velocidad del fluido (cm/s);

g : aceleración de la fuerza de gravedad 981 (cm/s^2);

L : longitud característica del sistema (cm).

2.5.3 NÚMERO DE WEBER

Es el número adimensional que relaciona la fuerza inercial y la fuerza de tensión superficial. Este número adimensional es importante para el análisis de fenómenos donde las fuerzas inerciales son moderadas. Para el caso de medios granulares la tensión superficial es despreciable mientras que para los fluidos es importante sus efectos. El número de Weber se expresa como:

$$We = \frac{\text{Fuerza Inercial}}{\text{Fuerza de Tension Superficial}} = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (g/cm^3);

V : velocidad del fluido (cm/s);

L : longitud característica del sistema (cm);

σ : tensión superficial del fluido (dyn/cm);

2.5.4 NÚMERO DE BOND

Es el número adimensional que relaciona la fuerza de gravedad a la fuerza de tensión superficial. Cuando se tiene presente un flujo tranquilo este número adimensional se vuelve importante en análisis del flujo en especial cuando se tienen fuerzas gravitacionales de gran magnitud por ejemplo en objetos de dimensiones grandes sujetos la fuerza gravitacional. El número de Bond se expresa:

$$Bo = \frac{\text{Fuerza de gravedad}}{\text{Fuerza de Tensión Superficial}} = \frac{\rho g L^2}{\sigma} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (g/cm^3);

g : aceleración gravitacional de 981 (cm/s^2);

L : longitud característica del sistema (cm);

σ : tensión superficial del fluido (dyn/cm).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los materiales y procedimientos para la realización de los experimentos del splash en 2D. Primeramente se aborda la construcción de la celda y de los discos de impacto, seguido de la preparación de las soluciones acuosas a diferentes concentraciones. Después se presenta una descripción del procedimiento experimental empleado en los experimentos de la deformación de la superficie libre líquida. Posteriormente se presenta el procedimiento de la medición de la tensión superficial de las soluciones y una descripción del programa de análisis de imágenes desarrollado para la medición de las variables de interés del splash. Finalmente se presenta el procedimiento para la realización de las simulaciones numéricas del splash en DualSPHysics.

3.1 MATERIALES Y EQUIPO EXPERIMENTAL

Los materiales utilizados en los experimentos fueron:

- Agua destilada.
- Surfactante Dodecyl Sulfato de Sodio (SDS o SLS). Se seleccionó ya que disminuye significativamente la tensión superficial del agua a bajas concentraciones y su uso es de menor riesgo en comparación con otros surfactantes, usado para la preparación de las soluciones acuosas.
- Alcohol amílico (Pentanol). Se seleccionó como co-surfactante ya que en conjunto con el SDS disminuyen la tensión superficial aún más que con el uso de solo surfactante.
- Politetrafluoretileno (PTFE) conocido comúnmente como Teflón material usado para construcción de los discos.
- Acero Inoxidable material usado para la construcción de los discos.
- Aluminio material usado para la construcción de los discos.

Los equipos utilizados para la realización de los experimentos fueron:

- Cámara de alta velocidad de captura de imágenes (Optronis) del Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. UMSNH
- Tensiómetro Óptico (Attension Theta CAM 200) ubicado en el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, UMSNH.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA CUASI-BIDIMENSIONAL

Se construyó una celda bidimensional empleando placas de acrílico de 3/8" permitiendo un volumen de trabajo con dimensiones de altura $H = 62 \text{ cm}$, ancho $W = 40.5 \text{ cm}$ y espesor $E = 0.5 \text{ cm}$. Para la unión de las placas y los separadores se usó un adhesivo

industrial para acrílico. En la figura 3.1 se muestra un esquema de las dimensiones del volumen de trabajo en la celda.

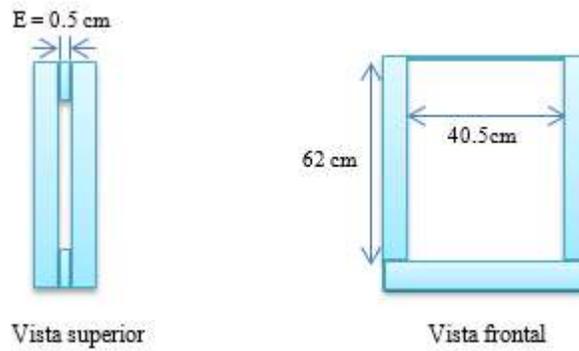


Figura 3.1. Esquema de las dimensiones del espacio de trabajo en la celda.

La base de la celda se hizo a partir de una barra metálica hueca y se le hicieron unas cavidades rectangulares de 2.5 cm de largo y de profundidad de $\frac{3}{4}$ " para poder acoplar la celda y mantenerla en forma vertical.

La celda bidimensional acoplada a su base se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2. Celda bidimensional con su base de cilindros.

3.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS DISCOS DE IMPACTO

Los discos sólidos se cortaron de una placa de teflón de un espesor de 1/8" (0.3175 cm) adicionalmente se maquinaron dos discos más uno de acero inoxidable y otro de aluminio de dos barras circulares con el mismo espesor que el de teflón. La tabla 3.1 se enlistan los diámetros de los discos y sus densidades. La figura 3.3 muestra los discos de diferentes materiales y diámetros empleados en la investigación.

Tabla 3.1 Densidades y tamaños de los discos de impacto.

Material del disco	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)	Diámetro (pulgada)
Teflón	2	1/2, 1, 2 y 3
Aluminio	2.7	1
Acero Inoxidable	7.85	1



Figura 3.3 Discos sólidos de diferentes diámetros, parte superior discos de teflón y parte inferior disco de acero y disco de aluminio.

3.4 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES CON DODECYL SULFATO DE SODIO

Para la preparación de las soluciones se eligió el surfactante Dodecyl Sulfato de Sodio (SDS o SLS) ya que disminuye la tensión superficial del agua significativamente a un valor de concentración bajo, además de que es un surfactante de uso común y su uso no es tan peligroso como pudiera ser el uso de otros surfactantes.

El surfactante SDS ($NaC_{12}H_{25}SO_4$) tiene una densidad $\rho = 1.01 g/cm^3$, un peso molecular $P_m = 288.38 g/mol$ y una concentración micelar crítica (cmc) $c = 8.15 \times 10^{-3} mol/L$ a una temperatura $T = 20^\circ C$. En la figura 3.4 se muestra una gráfica del valor de la tensión superficial en función de la concentración para diferentes tipos de surfactante. Se observa que a medida que aumenta la concentración del surfactante la tensión

superficial del agua disminuye, para algunos surfactantes como el Tween 20, 40, 80 y el Triton X-100 a partir de cierta concentración alcanzan un valor de tensión superficial mínimo y aun cuando se aumente la concentración del surfactante ya no se observa una disminución de tensión superficial en la solución. Para los surfactantes restantes el valor de tensión superficial continúa disminuyendo al aumentar la concentración de surfactante. En el caso del DTMAC la disminución de tensión superficial es muy lenta, mientras que para el SLS la disminución de tensión superficial es bastante rápida, por lo tanto aquí se ve que uno de los surfactantes que permite una variación aceptable de la tensión superficial del agua es el SLS ó SDS.

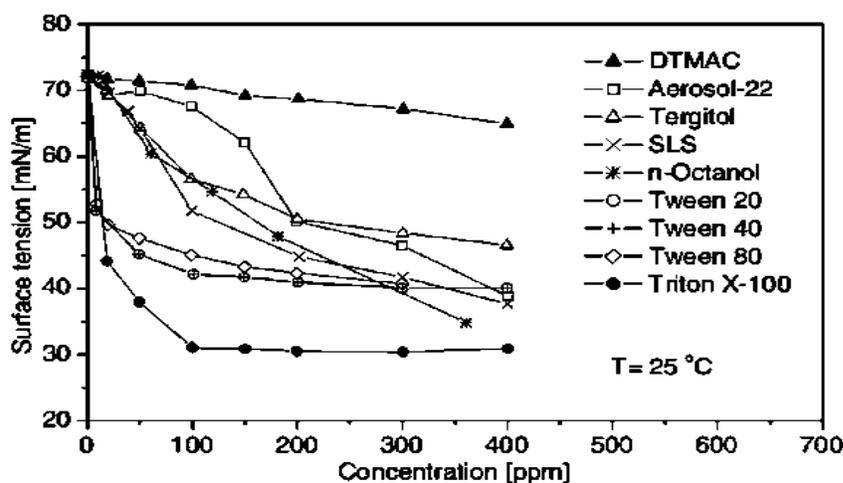


Figura 3.4 Gráfica de tensión superficial (mN/m) del agua en función de la concentración de surfactante (ppm) para diferentes tipos de surfactante hidrofílico. (Wu et al., 1995)

En la preparación de las soluciones primeramente se determinó el volumen total de líquido a usar en la celda, resultando un volumen de $V = 1.5 L$. Se eligió trabajar con un rango de concentraciones basado en la concentración micelar crítica (cmc) del SDS en agua a una temperatura de $T = 20^{\circ}C$ cuyo valor reportado es de $1 cmc = 8.15 \times 10^{-3} mol/L$. En lugar de trabajar con unidades pequeñas de mol/L se optó por usar fracciones de la concentración micelar crítica de SDS para representar la concentración del surfactante. Se eligieron 8 valores de concentración por tanto 8 soluciones se tuvieron que preparar. Los valores de concentración del surfactante en las soluciones se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores de concentración de las soluciones acuosas con surfactante empleadas.

Concentración c (cmc)							
0.001	0.01	0.05	0.1	0.5	0.8	1	2

La masa necesaria de surfactante para elaborar las soluciones se determinó al conocer la concentración en la solución y el volumen total de la solución, mediante la siguiente ecuación:

$$m = c \cdot V \cdot P_m \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

m : masa del surfactante en (g);

c : concentración de la solución en (mol/L);

V : volumen total de la solución en (L);

P_m : peso molecular del SDS en (g/mol).

En este caso el peso molecular del surfactante SDS empleado es de $288.38 g/mol$.

Por ejemplo la tabla 3.3 muestra los valores de concentración de surfactante seleccionados en la investigación y sus respectivos valores calculados para la masa necesaria a medir y así obtener la concentración deseada en un volumen determinado.

Tabla 3.3 Valores de concentración de surfactante y su respectivo cantidad de masa de surfactante necesaria para preparar un volumen de $0.5 L$ de solución.

Concentración de surfactante (cmc)	Concentración de surfactante (ppm)	Masa de surfactante (g)
0.001	2	0.0011751
0.01	24	0.0117514
0.05	118	0.0587574
0.1	235	0.1175148
0.5	1175	0.5875742
0.8	1180	0.9401188
1	2350	1.1751485
2	4701	2.350297

Para alcanzar el valor de la concentración deseada en la solución se usó un matraz de aforo clase B de $0.5 L$. Se utilizó una balanza analítica para medir la cantidad de masa requerida para preparar cada solución. La cantidad de surfactante se colocó en el matraz y posteriormente se vertió la cantidad de agua destilada necesaria para alcanzar un volumen de $0.5 L$ dentro del matraz. Finalmente se colocó la solución en un baño ultrasónico para acelerar el proceso de disolución. Para obtener el volumen de solución necesario para llenar la celda experimental se repitió el procedimiento las veces necesarias para obtener un volumen máximo disponible de $1.5 L$ de solución.

PREPARACIÓN DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA CON CO-SURFACTANTE

Para reducir aún más a tensión superficial del agua con el uso del SDS como surfactante se preparó una solución especial con co-surfactante. La disminución de tensión superficial con surfactantes se logra hasta alcanzar un valor fijo de tensión superficial al aumentar la concentración, después de alcanzarse este valor de tensión superficial aunque se siga aumentando la concentración de surfactante no es posible reducir más la tensión superficial; para poder reducir aún más la tensión superficial se usan co-surfactantes. Para elegir el co-surfactante se prepararon soluciones acuosas con SDS y tres co-surfactantes. Los tres co-surfactantes usados fueron: etanol ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH}$), butanol ($\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_3-\text{OH}$) y pentanol ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$). Se midió la tensión superficial de las tres soluciones preparadas con cada uno de los co-surfactantes, resultando el pentanol como el que disminuía más la tensión superficial. De esta manera se seleccionó al pentanol, para preparar una solución con co-surfactante a utilizar en los experimentos de impacto de superficie líquida. En la preparación de la solución se eligió agregar el pentanol a una solución acuosa con SDS, a una concentración de $c = 2 \text{ cmc}$ en una relación 1:5; es decir por la cantidad de masa del SDS agregada la solución se tuvo que agregar 5 veces la masa del pentanol. Esta relación masa surfactante y masa co-surfactante redujo aún más la tensión superficial del agua, del valor fijo alcanzado solo con surfactante sin saturar la solución de co-surfactante. En el trabajo presente no se utilizó una relación más alta entre las masas de surfactante y co-surfactante, por problemas de disolución; lo cual originó una separación de fases líquidas quedando fuera del objetivo de la investigación.

3.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El montaje experimental utilizado para realizar los ensayos de deformación de superficie líquida se compone de la celda cuasi-bidimensional, los discos de impacto, además de:

- **Sistema de iluminación**

Para el sistema de iluminación se utilizó una lámpara de LEDS con pantalla difusora de forma cuadrada 60 *cm* de lado, de tamaño suficiente para iluminar la superficie líquida y su deformación dentro de la celda. La lámpara se colocó en la parte posterior de la celda para resaltar el contraste y permitir una buena definición de los bordes de la interface en el desarrollo del experimento. Se empleó una fuente de poder de corriente directa para alimentar la lámpara y evitar oscilaciones en la intensidad de la luz que interfieran con la frecuencia de captura de la cámara. La figura 3.5 muestra el sistema de iluminación para la experimentación.

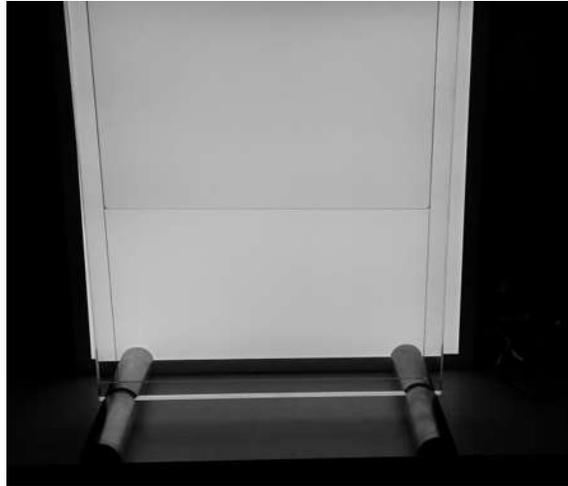


Figura 3.5 Sistema de iluminación colocado en la parte posterior de la celda.

- **Cámara rápida para una alta velocidad de captura de imágenes**

Para la observación detallada del desarrollo de cada una de las etapas del splash se trabajó con una cámara de alta velocidad (Optronis) con una capacidad de frecuencia máxima de 25, 000 cuadros por segundo y resolución máxima de 1696x1710. En la figura 3.6 se muestra la cámara con su lente, empleada en los experimentos.



Figura 3.6 Cámara rápida utilizada para la captura de imágenes con una lente acoplada para la observación del fenómeno.

En la figura 3.7 se muestra un esquema de los componentes del montaje experimental utilizados para la realización de los experimentos.

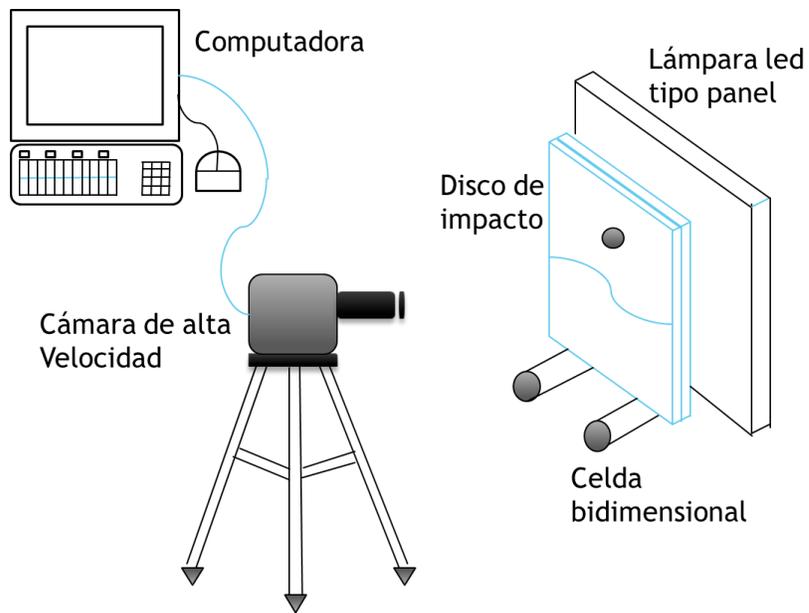


Figura 3.7 Esquema del montaje experimental utilizado para realizar los experimentos del Splash en 2D.

En la figura 3.8 se muestra una imagen del montaje experimental y sus componentes en físico.



Figura 3.8 Imagen del montaje experimental en físico.

La realización de un experimento consiste básicamente en activar de forma manual el disparador de la cámara desde la computadora para comenzar a grabar, se suelta el disco desde la parte superior de la celda para que comience a caer. El disco que va cayendo empieza a acelerarse hasta alcanzar una velocidad máxima en el momento del impacto con la superficie libre del líquido y este inicie su movimiento descendiente dentro del líquido desacelerándose hasta que llega al fondo de la celda. En el momento del impacto se desarrolla la corona del splash, después se forma la cavidad de aire cuando el disco desciende dentro

del líquido y finalmente emerge el jet en el cierre de la cavidad. Todo esto es grabado por la cámara de alta velocidad.

En los experimentos, la velocidad de impacto se fue modificando para cada uno de los discos empleados en la investigación y se cuantificaron los valores obtenidos para las formaciones del splash como: la profundidad de la cavidad de aire, el ángulo de cono de la cavidad y altura del jet desarrollado cuando se cierra la cavidad.

La forma en que se varió la velocidad de impacto fue subiendo el nivel de líquido en la celda. La forma de impacto de la superficie libre fue por caída libre del disco ($V_o = 0$) el cual adquiere una velocidad final al momento del impacto en función de la altura medida desde la superficie del líquido. Comenzando con un nivel del líquido de $h = 20 \text{ cm}$ (nivel al cual se evita que el disco sólido rebote al impactar el fondo de la celda), este se fue aumentando en incrementos de $\Delta h = 5 \text{ cm}$ hasta un nivel de líquido de $h = 60 \text{ cm}$ lo cual trae una disminución de la velocidad de impacto del disco ya que la altura libre disponible respecto a la superficie del líquido se disminuye. De esta manera, la velocidad máxima de impacto correspondió a un nivel de $h = 20 \text{ cm}$ y la mínima a un nivel de $h = 60 \text{ cm}$, dejando que el frente del disco iniciara en contacto con la superficie líquida para asociarle una velocidad de impacto $V_i = 0$. La figura 3.9 muestra un esquema de la variación del nivel de líquido en la celda y la reducción de la altura de caída libre del disco.

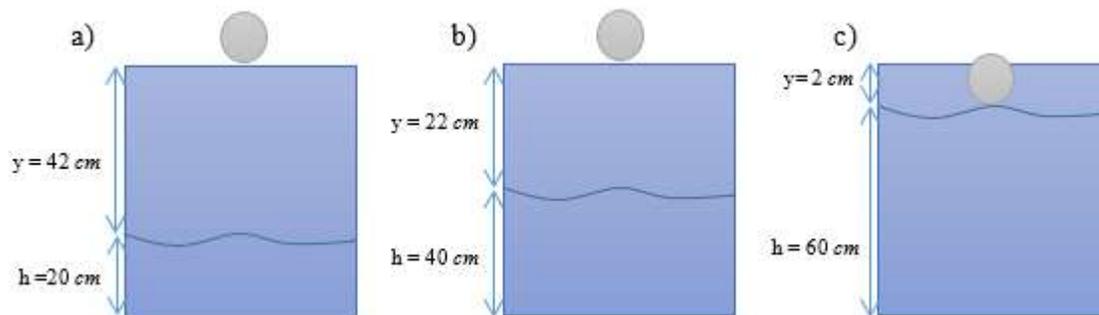


Figura 3.9 Variación del nivel de líquido en la celda para modificar la velocidad de impacto del disco mediante caída libre. Se muestran 3 ejemplos de nivel de líquido empleados: a) $h = 20 \text{ cm}$, b) $h = 40 \text{ cm}$ y c) $h = 60 \text{ cm}$.

El rango de velocidades experimental alcanzado de esta forma fue de 0 cm/s a 250 cm/s .

Se realizaron dos tipos de experimentos en este trabajo: i) primero se varió tamaño y densidad del disco de impacto, usando simplemente agua como fluido de trabajo; ii) segundo se varió la tensión superficial del agua al usar soluciones acuosas con diferentes concentraciones.

Experimentos variando el tamaño y densidad del disco

En este tipo de experimentos se usaron discos de teflón de $\frac{1}{2}$ " hasta 3". Para el disco de $D = 1$ " se utilizaron discos de diferente material: teflón, aluminio y acero inoxidable. El fluido de trabajo utilizado fue agua destilada. En estos experimentos se utiliza cada vez un disco de diferente tamaño o un disco del mismo tamaño pero con diferente densidad, la velocidad de impacto se varía y se cuantifican la profundidad de la cavidad, su ángulo y la altura del jet.

Experimentos variando la tensión superficial del agua

En este tipo de experimentos se usaron 2 discos de material de teflón de diámetros de 1" y 2". El fluido de trabajo usado en este caso fueron las soluciones a las concentraciones especificadas anteriormente. En la realización de los experimentos, la tensión superficial del fluido de trabajo se fue variando al cambiar la solución acuosa por otra con diferente concentración. Para una concentración dada de surfactante, la velocidad de impacto del disco se varió y se cuantificaron: la profundidad de la cavidad, el ángulo de la cavidad y la altura del jet.

En la figura 3.10 se muestra un experimento de tensión superficial, la celda contiene una solución acuosa de SDS a una concentración $c = 1 \text{ cmc}$ y un nivel de líquido de $h = 20 \text{ cm}$. Se puede ver que a esta concentración de surfactante se forma espuma en la superficie libre al momento de verter la solución en la celda, lo cual es muy usual en soluciones acuosas con alta concentración de surfactante, sin embargo debe retirarse la espuma para que no interfiera durante la experimentación.

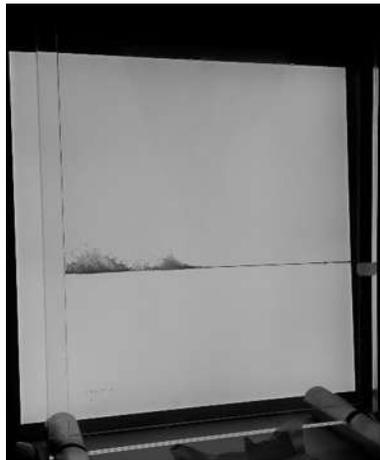


Figura 3.10 Solución acuosa de SDS con una concentración $c = 1 \text{ cmc}$ vertida en la celda para un experimento con un nivel de solución $h = 20 \text{ cm}$.

En los experimentos el tiempo que tardaba en caer el disco desde su liberación hasta que se desarrollara el jet era de aproximadamente de 3 segundos, por lo cual se eligió trabajar con una frecuencia de captura 1000 fps para visualizar detalladamente cada una de las etapas del splash y con una buena resolución.

Para la reproducibilidad de los experimentos y generar estadística en los resultados, por cada experimento se realizaron 5 repeticiones y los valores de la profundidad, ángulo de cavidad y altura del jet de esas repeticiones se promediaron para tener un valor representativo de cada caso de estudio.

3.6 VARIABLES DE INTERÉS

Las variables (dependientes) principales de interés para el estudio de este trabajo son:

- Profundidad de la cavidad
- Ángulo de la cavidad
- Altura del jet

Y se desea analizar su comportamiento en función de las siguientes variables (independientes):

- Velocidad de impacto del disco
- Tensión superficial de las soluciones acuosas.
- Densidad del disco de impacto
- Tamaño del disco de impacto

3.7 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL

Para la medición de la tensión superficial de las soluciones con SDS se utilizó un tensiómetro óptico (Attenstion Theta CAM 200) el cual está basado en la técnica de la gota pendiente. Para ello se tomaron muestras de 100 *ml* de cada una de las soluciones con sus diferentes concentraciones. Se utilizó una jeringa para tomar 1ml de una solución y llevarla al tensiómetro óptico, para realizar su medición de tensión superficial. Las mediciones se realizaron a una temperatura ambiente de aproximadamente 20 °C. La figura 3.11 ilustra las muestras de las soluciones tomadas para medir su tensión superficial.



Figura 3.11 Muestras de las soluciones acuosas para medir su tensión superficial.

3.7.1 EMPLEO DE TENSIÓMETRO ÓPTICO PARA MEDIR LA TENSIÓN SUPERFICIAL.

El tensiómetro óptico Theta Lite emplea la técnica de la gota pendiente y a través del análisis del perfil de la gota determina el valor de tensión superficial.

El tensiómetro cuenta con el software Attension Theta CAM 2008 que se compone de 7 menús principales. En la figura 3.12 se muestra la barra de menus con los cuales se puede operar el sistema mediante la captura y análisis de imágenes para la determinación del valor de tensión superficial.

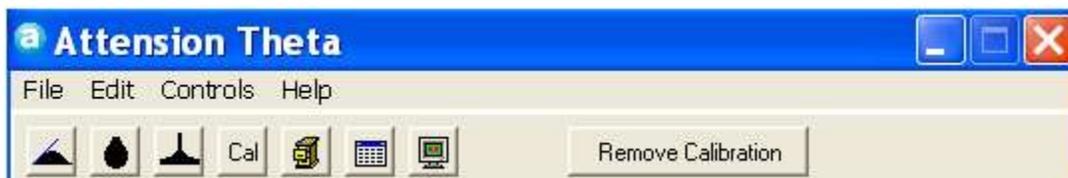


Figura 3.12 Barra de menús del software Attension Theta para realizar mediciones de ángulo de contacto, tensión superficial, energía superficial libre y ángulo de menisco.

En la tabla 3.4 se muestran los iconos de la barra de menús del Software Attension Theta y sus funciones.

Tabla 3.4 Descripción de las funciones de los iconos de la barra de menús del software Attension Theta CAM 2008.

	Iniciar un nuevo experimento de ángulo de contacto.
	Iniciar un nuevo experimento de tensión superficial.
	Iniciar un nuevo experimento de ángulo de menisco.
	Realizar calibración.
	Acceso a la base de datos.
	Editar la base de datos.
	Configuración de la cámara

Calibración del tensiómetro

Previamente a iniciar una medición de tensión superficial se debe calibrar el tensiómetro mediante un objeto de referencia como patrón de medida para un enfoque determinado. Para este tensiómetro se tiene un balín de 4 mm el cual debe ser limpiado con alcohol y secado con aire comprimido.

Para calibrar el tensiómetro se da click en el icono Cal de la barra de menús el cual despliega una ventana mostrada en la figura 3.13.

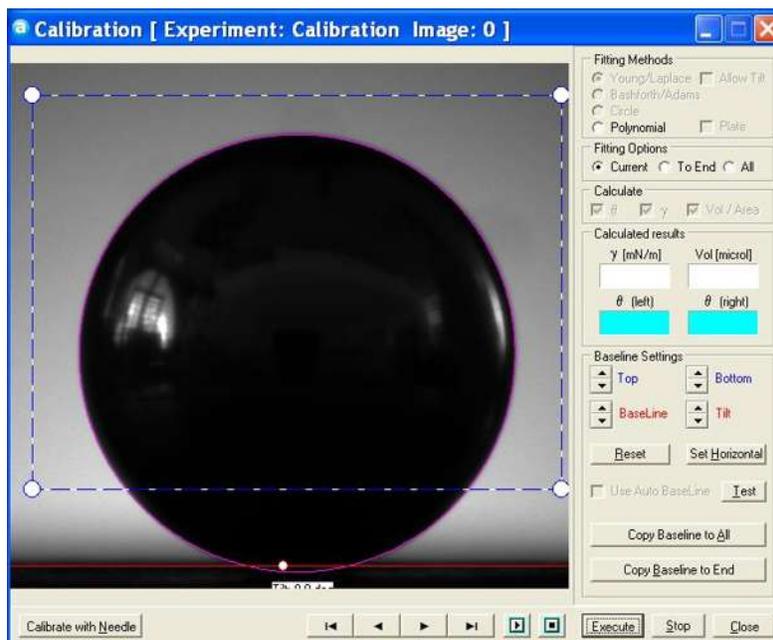


Figura 3.13 Ventana para realizar la calibración del tensiómetro óptico, enfocando al balón de calibración.

En esta ventana se debe enfocar con una buena nitidez el balón y después ajustar la línea base de color rojo en la superficie sobre la que se encuentra el balón, con la región punteada, se debe seleccionar 3/4 partes del área superior del balón. Una vez realizado esto se procede a capturar una imagen del balón con el botón EXECUTE, el programa mostrará una ventana con el diámetro del balón de 4 mm para corroborar el tamaño del balón, se da click en aceptar y el programa generará una función de ajuste sobre el perfil del balón, mostrando que la calibración se ha realizado con éxito.

Una vez realizada la calibración el usuario no deberá mover el enfoque de la cámara ya que eso garantiza que las mediciones realizadas sean confiables si el enfoque de la cámara es modificado una nueva calibración será necesaria.

Medición de tensión superficial por medio del tensiómetro óptico

En la figura 3.14 se muestra el tensiómetro óptico en físico utilizado para realizar las mediciones de tensión superficial. Se puede ver la jeringa colocada en el microinyector que inyecta el líquido a una velocidad programada previamente, también se observa la cámara del tensiómetro enfocando la gota suspendida de la aguja para realizar la toma de imágenes que posteriormente el software realizará el cálculo de la tensión superficial del líquido.

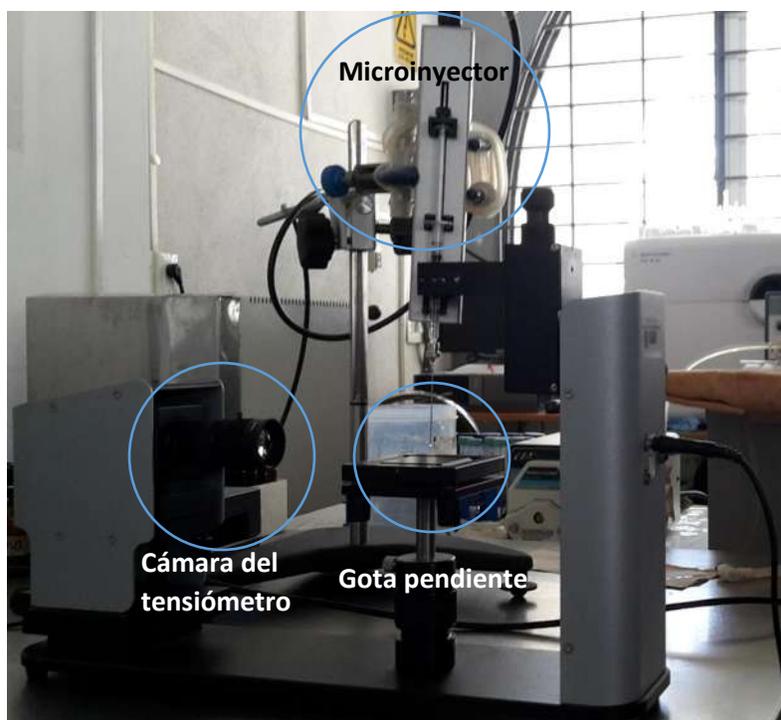


Figura 3.14 Tensiómetro óptico utilizado para realizar las mediciones de tensión superficial de las soluciones.

Antes de realizar una medición de tensión superficial se debe asegurar que la aguja utilizada se encuentre totalmente limpia para evitar errores en la medición o factores que puedan alterar el valor de la tensión superficial. Para esto a la aguja se somete a un proceso de limpieza que consiste en dejarla hervir en agua destilada por 5 minutos y posteriormente secarla con aire comprimido.

Para realizar una medición de tensión superficial de una solución se toma una muestra de 1 ml de la solución con una jeringa y esta se coloca en el microinyector. De la barra de menús se selecciona el icono: comenzar experimento de gota pendiente. Esto despliega una ventana con imagen en vivo de la cámara del tensiómetro. Primeramente se debe enfocar y centrar la aguja de punta plana que se empleará para emerger la gota. En la figura 3.15 se muestra una imagen del software en donde se muestra la aguja enfocada.

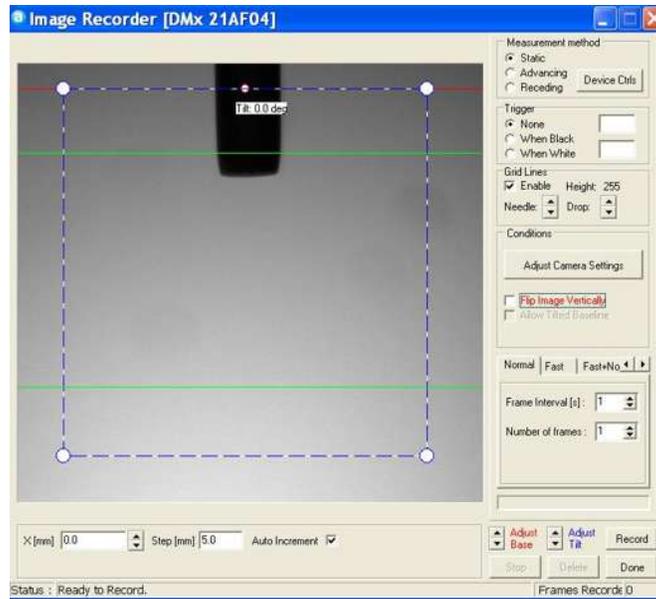


Figura 3.15 Ventana enfocando la aguja donde se desarrollará la gota pendiente.

Una vez que la aguja queda enfocada, se procede configurar la frecuencia de captura de la cámara y el modo de disparo. Ya que se han realizado estas configuraciones se procede a activar el microinyector. El microinyector inyecta líquido a una baja velocidad para desarrollar una gota que queda suspendida en la aguja, cuando la gota logra desarrollarse completamente previo a su desprendimiento, se procede a capturar las imágenes. El tensiómetro posteriormente utiliza las imágenes para calcular una función de ajuste en cada perfil de la gota y determinar numéricamente el factor de forma para el cálculo de la tensión superficial. El valor de tensión superficial lo almacena en una base de datos como resultado del promedio obtenido en la serie de imágenes. En la figura 3.16 se muestra una ventana donde se muestra la gota desarrollada y el perfil que de la curva de ajuste, que el software utiliza para realizar el cálculo de la tensión superficial, en este caso se está calculando la tensión superficial de una gota de agua.

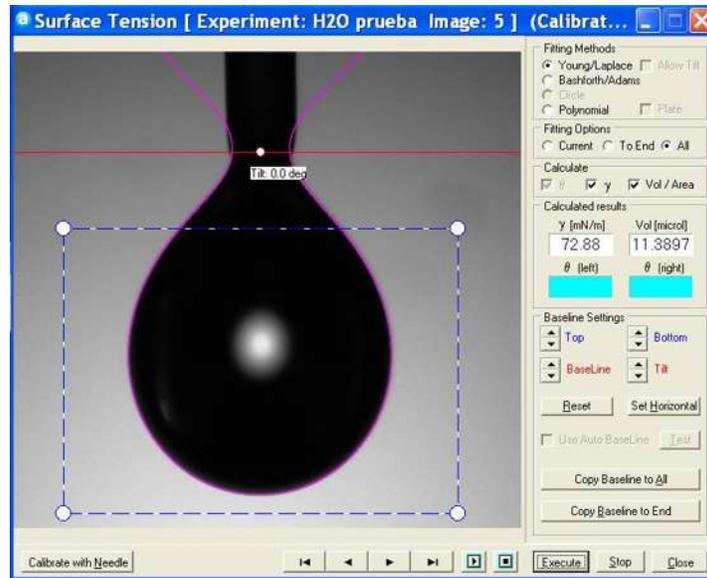


Figura 3.16 Medición de la Tensión superficial por el método de gota pendiente.

3.8 ANÁLISIS DE IMÁGENES

Se desarrollaron una serie de códigos programados en el software Matlab para procesar imágenes y medir algunos parámetros de las formaciones fluidas generadas durante el splash como por ejemplo:

- Profundidad de la cavidad.
- Ángulo de la cavidad.
- Altura del Jet.

Los códigos están agrupados en diferentes archivos con extensión .m. Cada uno de estos archivos realiza un tratamiento específico sobre las imágenes, con la finalidad de diferenciar los objetos de interés como por ejemplo la superficie líquida y el disco. Entre los principales comandos empleados para realizar el procesamiento y análisis de imágenes se encuentran:

- `imread`: comando empleado para identificar los elementos de matriz asociados a cada imagen. Permite leer imágenes de interés.
- `rgb2gray`: convierte una imagen a color en escala RGB a una imagen en escala de niveles de grises. Permite definir un umbral que posteriormente se utilizaría en la binarización.
- `imsubtract`: comando que permite sustraer una imagen a partir de otra. Permite sustraer de la imagen fondo la imagen actual con la finalidad de eliminar los objetos estáticos en la imagen.
- `im2bw`: comando que permite convertir una imagen en escala de grises en una imagen a blanco y negro. Su uso permitió que a la imagen resultado de la

substracción, les asignará a los objetos de interés un valor lógico de 1 y al resto de los objetos un valor lógico de 0, de forma que sólo aparecen en la imagen los objetos de interés en color blanco y el resto de los objetos aparecen en color negro de acuerdo a un umbral seleccionado. En este caso los objetos de interés son el disco y la interface.

- `bwareaopen`: elimina objetos de no interés que aparecen en la imagen por tener intensidad similar en escala de grises a los objetos de interés de acuerdo a un área en pixeles especificada.

En la figura 3.17 se muestra una imagen binarizada del disco de teflón 1” y la cavidad que va dejando atrás mientras desciende en el fluido. Se observan gotas de líquido en la imagen que fueron binarizadas con valor de 1 (pixeles blancos) por tener intensidad en escala de grises similar a la interface, con el comando “`bwareaopen`” se eliminan esos elementos que no cumplen el criterio seleccionado.

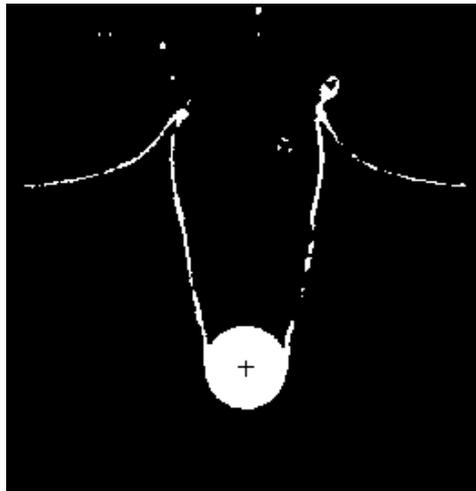


Figura 3.17 Imagen binarizada de la cavidad de aire y disco de teflón 1” descendiendo en el agua.

Detección de la interface.

La profundidad de la cavidad y la altura del jet se miden con respecto al nivel de líquido antes del impacto del disco, por esto se necesita conocer este nivel de referencia. Para ello el programa procesa la imagen de fondo para encontrar los pixeles que constituyen la superficie líquida antes del impacto y de ahí realizar un ajuste lineal de manera que determina la posición vertical de la interface dada la coordenada horizontal en el centro de la imagen. Esta posición en pixeles es luego escalada a centímetros en base al valor conocido del diámetro del disco. La figura 3.18 muestra la localización del nivel de referencia en la imagen de fondo referente a la superficie líquida antes del impacto.

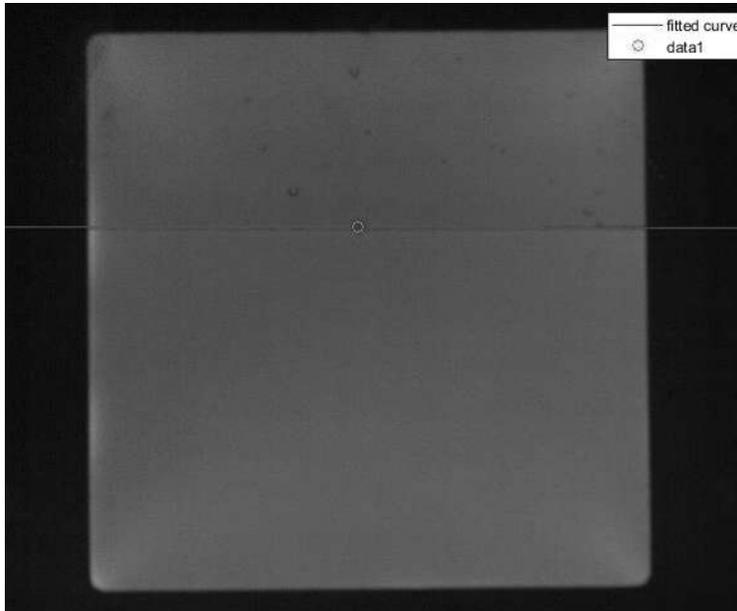


Figura 3.18 Localización del nivel de referencia antes del impacto del disco sólido.

Para cada uno de los parámetros del splash se programó un código independiente con extensión .m. para ser ejecutado en Matlab.

Profundidad de la cavidad: El código programado calcula la profundidad de la cavidad basándose en el comando de Matlab “imfindcircles”, que sirve para localizar el centro y radio de círculos presentes en la imagen. Dado que el único círculo presente en la imagen es el disco, con este comando se encuentra la posición del disco en cada una de las imágenes; es decir su evolución a través del tiempo. Primero una carpeta de imágenes que se carga en el directorio de trabajo, una por una es mandada a llamar para su procesamiento general, después es localizado el centro y radio del disco en la imagen. Esta posición del disco en pixeles se le suma el radio del disco para tener localizada la posición del frente del disco. Posteriormente a la posición del frente del disco se le resta el nivel de referencia para obtener la profundidad de la cavidad a cualquier instante de tiempo de la siguiente forma:

$$Y_{fr} = Y_{ref} - y \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

Y_{fr} : posición del frente del disco respecto al nivel de líquido (cm);

Y_{ref} : nivel de la referencia de la superficie líquida sin perturbar (cm);

y : posición del frente del disco (cm).

Finalmente la posición relativa del disco en la imagen actual es registrada en una lista de la posición del frente del disco de acuerdo al índice de la imagen correspondiente.

La profundidad máxima de la cavidad se determina de la lista de posiciones con el índice de la imagen correspondiente a aquella en el momento en que la cavidad se cierra de su de su separación más angosta.

En la figura 3.19 se muestra la imagen binarizada de la cavidad de aire antes del cierre y la posición del centro del disco marcada con una + en azul. Para el cálculo de la profundidad máxima de la cavidad se realiza una diferencia del nivel de referencia con la posición del frente del disco en valor absoluto (posición del centro más el radio del disco).

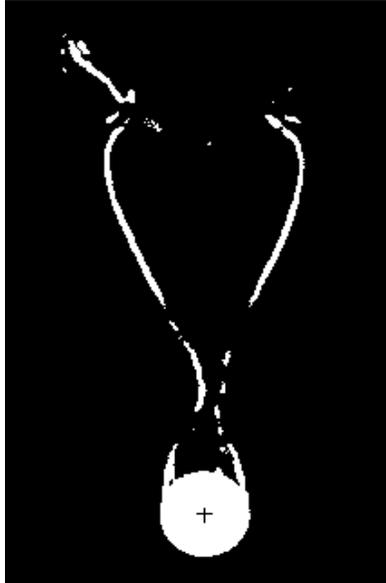


Figura 3.19 Contorno de la cavidad de aire antes del cierre. La posición absoluta del centro del disco se muestra indicada con el símbolo + en color azul.

Velocidad del disco.

Además de la profundidad de la cavidad, se calcula la velocidad del disco basándose en el cambio de la posición vertical del mismo con respecto al incremento de tiempo entre cada imagen. Este cálculo se programó basándose en una diferencia central de la forma:

$$V_j = \frac{Pos_{j+1} - Pos_{j-1}}{2Dt} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

V_j : velocidad del disco calculada para la imagen actual con subíndice j (cm/s);

Pos_{j+1} : posición del disco en la imagen siguiente con subíndice $j+1$ (cm);

Pos_{j-1} : posición del disco en la imagen anterior con subíndice $j-1$ (cm);

Dt : incremento de tiempo entre dos imágenes consecutivas (s).

El incremento de tiempo Dt entre dos imágenes consecutivas es simplemente el inverso de la frecuencia empleada para la captura de las imágenes, identificada como fps (frames per second).

La velocidad del disco calculada es registrada en una lista de acuerdo al índice de la imagen actual para posteriores cálculos o gráficas.

Para el cálculo de la velocidad de impacto, el código programado identifica el índice correspondiente a la posición del frente del disco donde la distancia de la superficie al frente del disco es mínima. Con este índice se calcula el tiempo transcurrido desde el momento en que el disco aparece en la primera imagen hasta el momento en que el disco tiene contacto con la superficie libre. Con este intervalo de tiempo calculado se localiza la velocidad correspondiente en el registro de velocidades del disco de las imágenes procesadas. El intervalo de tiempo se calcula de la siguiente forma:

$$t_{imp} = (I_{imp} - I_{ic})Dt \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

t_{imp} : tiempo calculado para el impacto del disco en (s);

I_{imp} : índice de la imagen en donde el frente del disco tiene contacto con la superficie;

I_{ic} : índice de la imagen inicial;

Dt : diferencia de tiempo entre una imagen y la siguiente en (s).

Con el tiempo de impacto, el código se programó para realizar una segmentación del tiempo total del experimento y poder graficar tanto la posición y la velocidad del disco en función del tiempo, antes del impacto y después del impacto del disco con la superficie libre.

En la figura 3.20 se muestra una gráfica de la velocidad del disco después del impacto con la superficie. Se puede apreciar cómo la velocidad del disco va disminuyendo conforme éste desciende dentro del agua al formar la cavidad.

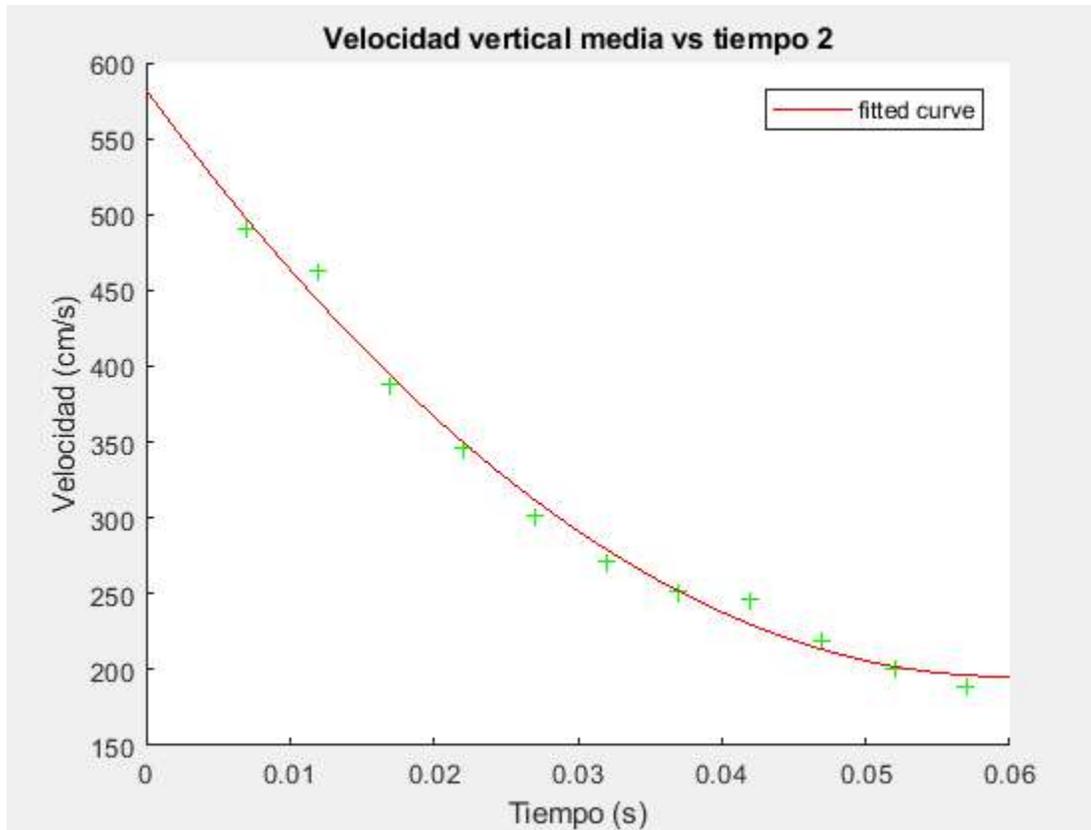


Figura 3.20 Gráfica de la velocidad del disco de teflón 1” en función del tiempo después del impacto del disco con la superficie. Gráfica generada en Matlab.

Ángulo de cavidad: Mediante el código programado en Matlab se calcula el ángulo formado por las paredes de la cavidad, esto se realiza en base al producto punto de dos vectores paralelos a dos rectas obtenidas por ajuste lineal sobre los contornos de la cavidad. Para ello se programó un código que identifica la frontera sobre las paredes de la cavidad mediante el comando “bwtraceboundary”. Posteriormente, una vez localizados los pixeles se realiza un ajuste lineal para determinar los coeficientes de las líneas que pasan por esos puntos. El primer coeficiente obtenido corresponde a la pendiente m de la recta en cuestión y se usa para determinar un vector de componente horizontal unitario 1 y componente vertical con valor m sobre la recta:

$$\vec{u} = 1\hat{i} + m_1\hat{j} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$\vec{v} = 1\hat{i} + m_2\hat{j} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

\vec{u} : vector sobre la recta en el contorno izquierdo de la cavidad;

\vec{v} : vector sobre la recta en el contorno derecho de la cavidad;

m_1 : pendiente de la recta en el contorno izquierdo de la cavidad;

m_2 : pendiente de la recta en el contorno izquierdo de la cavidad.

El ángulo se puede determinar mediante el producto punto entre los vectores asociados a cada pared de la cavidad:

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| |\vec{v}| \cos(\theta) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Obteniéndose:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| |\vec{v}|}\right) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

$|\vec{u}|$: magnitud del vector \vec{u} ;

$|\vec{v}|$: magnitud del vector \vec{v} ;

θ : ángulo de la cavidad.

Para el cálculo del ángulo de la cavidad se empleó el criterio propuesto por Lavery (2004) en donde se asume una cavidad desarrollada cuando el frente del disco ha alcanzado una profundidad de 1.5 D respecto al nivel de referencia.

En la figura 3.21 se aprecia la detección de las fronteras en color verde brillante y las líneas de ajuste en las paredes izquierda y derecha de la cavidad en color rojo y azul respectivamente para el cálculo del ángulo de la cavidad.

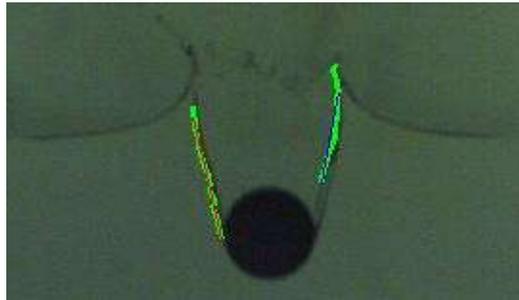


Figura 3.21. Cavidad de aire desarrollada a una profundidad de 1.5 diámetros de disco.

Altura del jet: Se programó un código para calcular la altura del jet mediante el comando de Matlab “find” que encuentra pixeles de valor lógico 1 y entrega los índices correspondientes de los pixeles encontrados en la imagen. La altura máxima del jet es calculada por el programa al determinar la coordenada vertical (fila mínima en la imagen) del pixel perteneciente a la parte superior del jet, a este valor se le resta la coordenada vertical de la superficie líquida antes del impacto. Tanto la medida de la altura del jet y del nivel de

referencia son transformadas de pixeles a centímetros de acuerdo al valor conocido del diámetro del disco en ambas escalas.

En la figura 3.22 se muestra una imagen binarizada del jet desarrollado en donde el pixel blanco más alto corresponde a la fila mínima de la imagen que es el valor usado para calcular la altura del jet.

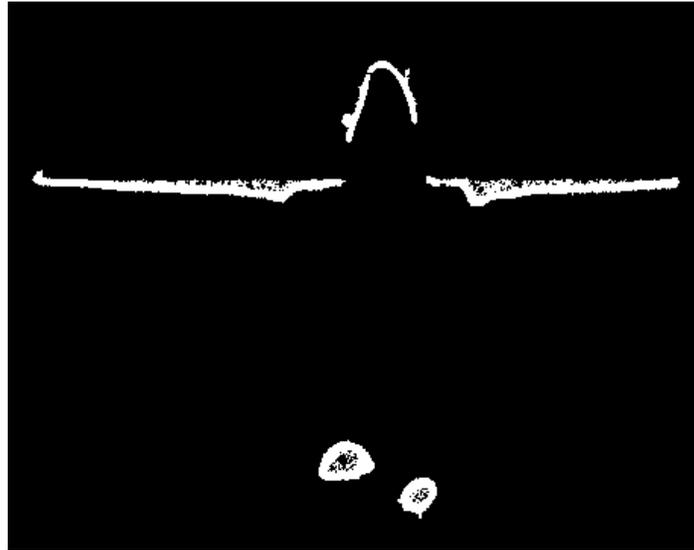


Figura 3.22 Imagen binarizada del jet formado al cerrarse la cavidad de aire.

3.9 ANÁLISIS ADIMENSIONAL

Los números adimensionales para caracterizar la deformación superficie líquida por impacto de un disco sólido son: el número de Reynolds, el número de Froude, el número de Weber y el número de Bond. Estos números adimensionales aplicados al caso de estudio quedan definidos como:

- ✚ Número de Reynolds (Relación de la fuerza inercial a la fuerza viscosa)

$$R_e = \frac{\rho V_i D}{\mu} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (g/cm^3);

V_i : velocidad de impacto del disco (cm/s);

D : diámetro del disco (cm);

μ : viscosidad del fluido en ($g/cm s$).

- ✚ Número de Froude (Relación de la fuerza inercial a la fuerza gravitacional) :

$$F_r = \frac{V_i}{\sqrt{gD}} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

V_i : velocidad de impacto del disco (cm/s);

g : aceleración gravitacional con un valor 981 (cm/s^2);

D : diámetro del disco (cm)

✚ Número de Weber (Relación de la fuerza inercial a la fuerza de tensión superficial):

$$W_e = \frac{\rho V_i^2 D}{\sigma} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (g/cm^3);

V_i : velocidad de impacto del disco (cm/s);

D : diámetro del disco (cm);

σ : tensión superficial del fluido (dyn/cm).

✚ Número de Bond (Relación de la fuerza gravitacional a la fuerza de tensión superficial):

$$B_o = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (g/cm^3);

g : aceleración gravitacional con un valor de 981 (cm/s^2);

D : diámetro del disco (cm);

σ : tensión superficial del fluido (dyn/cm).

3.10 SIMULACIONES 2D DEL SPLASH EN DUALSPHYSICS.

El objetivo de realizar simulaciones numéricas mediante SPH en DualSPHysics es modelar la deformación de una superficie libre por el impacto de un disco sólido en 2D en el modelo, ampliar la región de velocidades de impacto en el estudio y obtener un comportamiento de la profundidad de la cavidad y la altura del jet más detallado.

Previamente a realizar las simulaciones con las condiciones de los experimentos del laboratorio. Se realizó un análisis de convergencia de resolución de partícula con la finalidad de determinar el tamaño de partícula dp adecuado en la simulación. En un modelo SPH el tamaño de partícula entre más fino produce mejores resultados pero a consecuencia de un mayor número de partículas y por tanto se obtiene un mayor tiempo de simulación, además para simulaciones con flujos en superficies libres realizadas con un tamaño de partícula muy fino se pueden obtener resultados con errores grandes debido a inestabilidades cerca de la superficie libre, las cuales se incrementan al aumentar la resolución de partícula. De manera

que el tamaño de partícula no podía ser muy pequeño ya que se involucra un flujo con superficie libre, pero tampoco podía ser muy grande para obtener resultados físicos aceptables los tamaños de partícula propuestos fueron 0.5 mm, 1 mm, 2 mm y 3 mm.

Primeramente se trabajó con la validación del código al reproducir los experimentos físicos realizados del splash con los resultados del disco de 1" en 2D con DualSPHysics.

Se optó por definir la geometría de la celda cuasi-bidimensional en un plano en 2D con dimensiones de altura $H = 62 \text{ cm}$ y ancho $W = 40 \text{ cm}$; el disco se definió dentro del código para cada caso de tamaño como un círculo con radios $r = 0.635 \text{ cm}$, 1.27 cm y 2.54 cm . La velocidad de impacto del disco en las simulaciones varía con la altura a la que el disco se encuentra con referencia al nivel de la superficie del líquido, para alcanzar condiciones de velocidad de impacto similares a los experimentos, la velocidad de impacto del disco se varió de la misma forma que en los experimentos al modificar la altura del nivel del líquido y dejando caer el disco libremente desde una altura fija. Se determinó el nivel de líquido en la simulación para que el disco alcanzara la misma velocidad al momento del impacto con el fluido. Se realizó una simulación por cada valor de velocidad de impacto experimental obteniéndose 9 simulaciones en total por los 9 valores de velocidad de impacto en los experimentos.

El modelo que se usó de viscosidad fue el laminar-SPS (Escala de Subpartícula) para la simulación el cual permite simular flujos turbulentos. Las condiciones de frontera que se usaron fueron: condiciones periódicas en las paredes laterales mientras que en el fondo se usó una condición de muro y en la superficie una condición de frontera dinámica.

Algunas constantes como densidad, constante politrópica del agua, gravedad entre otras y los parámetros importantes de ejecución usados en la simulación se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Constantes definidas y parámetros necesarios para correr la simulación.

Constantes	
Asignación de partícula en la malla: 1:p/n, 2: p/n	(1) Una partícula por nodo
Gravedad:	-9.81 m/s^2 Dirección z
Densidad (rho0):	1000 kg/m^3
Nivel de líquido para calcular velocidad sistema (hws1):	0.8 m
Constante politrópica del líquido (gamma):	7
Velocidad del sistema (speedsound):	Calculada a partir de hws1
Coeficiente de velocidad de sonido (coefsound):	30
Velocidad del sonido:	Calculada a partir speedsound
Coeficiente de longitud de suavizado (coefh):	1.2
Coeficiente de paso de tiempo: (clnumber)	0.2
Tamaño de partícula (Definición dp):	0.002 m
Parámetros de ejecución	
Precisión 0:Simple, 1:Doble, 2:Usa y guarda Doble	(2)

Algoritmo de paso de tiempo 1:Verlet, 2:Symplectic	(2)
Algoritmo Verlet pasos para cambio a esquema Euler	40
Kernel de suavizado 1:Cubica, 2:Wendland	(2)
Modelo de viscosidad 1:Artificial, 2:Laminar + SPS	(2)
Valor de viscosidad:	$0.000001 \text{ m}^2/\text{s}$
Factor de viscosidad:	1
Formulación delta SPH:	0.1
Algoritmo de cambio 0:Ninguno, Ignorar 1:Objeto 2:Frontera, 3:Considerar todo	(1)
Coefficiente para calcular cambio (ShiftCoef):	-2
Límite para encontrar la superficie libre (ShiftTSF):	1.5
Algoritmo rígido 1:SPH, 2:DEM	(1)
Tiempo de congelación para cuerpos flotantes(Ftpause)	1 s
Coefficiente para paso de tiempo mínimo (coefDtMin) :	0.005
Paso de tiempo inicial (DtIni):	0.0001 s
Paso de tiempo mínimo (DtMin):	0.00001 s
Valores de paso de tiempo desde un archivo (DtFixed)	Desactivado
Velocidad de partículas para Dt (DtAllparticules) 0: Fluido y objetos, 1:Fluido, objetos y fronteras	(0)
Tiempo de simulación (TimeMax):	10 s
Tiempo de salida de información (TimeOut)	0.0005 s
Aumento de altura de partículas permitido (IncZ):	0.25
Fracción de partículas a ser excluidas por criterios de exclusión (PartsOutMax):	1
Densidad mínima permitida (RhopOutMin):	$700 \text{ kg}/\text{m}^3$
Densidad Máxima permitida (RhopOutMax):	$1300 \text{ kg}/\text{m}^3$
Condición periódica (XPeriodicIncZ):	0

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados de los experimentos realizados del splash en 2D iniciando con un análisis de la velocidad de impacto del disco durante su caída, del ángulo de la cavidad y cómo evoluciona al paso del tiempo. Continúa con los experimentos donde se varía el tamaño y la densidad del disco de impacto y se analiza el efecto que tienen estos cambios en la profundidad, ángulo de la cavidad y la altura del jet. Posteriormente se realiza un análisis adimensional para un análisis más detallado de las variables involucradas. En la segunda parte se analiza el efecto de la tensión superficial en cada uno de las variables de interés del splash mencionados anteriormente y finalmente en la tercera parte se analizan los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en la estancia de investigación y se comparan con los experimentos realizados, donde sólo se usa simplemente agua como fluido de trabajo sin cambios en su tensión superficial.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES AL DEFORMAR UNA SUPERFICIE DE AGUA

4.1.1 FORMACIÓN DE LA CORONA, CAVIDAD Y JET DEL SPLASH EN 2D

En esta sección se ilustra cómo es la formación de cada uno de los movimientos del splash, como la corona, la cavidad de aire y el jet que resultan por el impacto de un disco sólido en un sistema confinado en 2D.

En la figura 4.1 se muestra la formación de la corona del splash que ocurre en el impacto del disco con la superficie libre, una cantidad de fluido sale expulsado y dispersado en forma de gotitas que toman la forma de una corona.

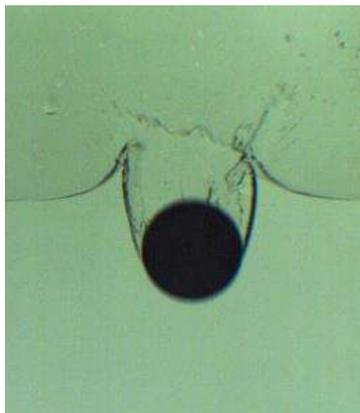


Figura 4.1 Corona del splash en 2D por impacto de un disco de teflón de diámetro de 1”

En la figura 4.2 se muestra la formación de la cavidad de aire que sucede después de que el disco descende en el interior del líquido, en su trayectoria deja detrás de él un hueco de aire abierto a la atmósfera conocido como cavidad de aire.



Figura 4.2 Cavidad de aire en 2D por impacto de un disco de teflón de diámetro de 1”.

En la figura 4.3 se muestra el jet desarrollado después de que la cavidad de aire se ha cerrado, en donde se aprecia su altura máxima alcanzada. Detrás del jet se observa una burbuja desprendida del disco de impacto que se formó cuando se dio el cierre de la cavidad.

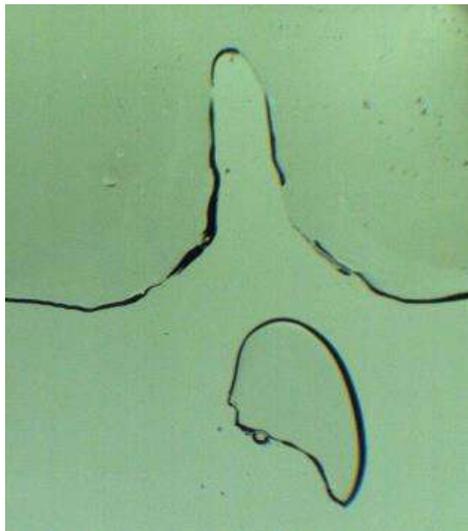


Figura 4.3 Jet de agua desarrollado totalmente por impacto de un disco de teflón de diámetro de 1”

4.1.2 VELOCIDAD DE IMPACTO

La velocidad de impacto se calcula para experimentos en 3D normalmente con la ecuación 2.1. La velocidad de impacto calculada con esa ecuación es una velocidad teórica. La velocidad de impacto del disco sólido en este trabajo se determinó experimentalmente por medio del programa de análisis de imágenes desarrollado en Matlab. En la tabla 4.1 se muestran los resultados de la velocidad de impacto teórica y los de la velocidad de impacto determinados experimentalmente, para los valores de altura de caída libre en los experimentos.

Tabla 4.1 Valores de velocidad de impacto teórica y experimental para la altura de caída libre del disco.

Altura de caída libre (y) (cm)	Velocidad de impacto teórica (cm/s)	Velocidad de impacto experimental (cm/s)
0	0	0
7	117.19	103.42
12	153.44	127.99
17	182.63	153.69
22	207.76	181.62
27	230.16	199.7
32	250.57	215.43
37	269.43	234.62
42	287.06	248.15

En la figura 4.4 se muestra la gráfica de la velocidad de impacto tanto teórica como experimental en función de la altura de caída libre.

De la figura 4.4 se ve una clara diferencia de valores entre la velocidad de impacto teórica a la velocidad de impacto experimental. La velocidad experimental es menor que la velocidad teórica esto es ocasionado por el confinamiento de la celda. El disco está en contacto con las paredes de la celda presentándose una fuerza de fricción por lo que se tiene una desaceleración cuando el disco cae, lo que reduce su velocidad al momento de impactar la superficie libre. En el presente trabajo se utilizó la velocidad de impacto experimental que toma en cuenta este efecto de fricción.

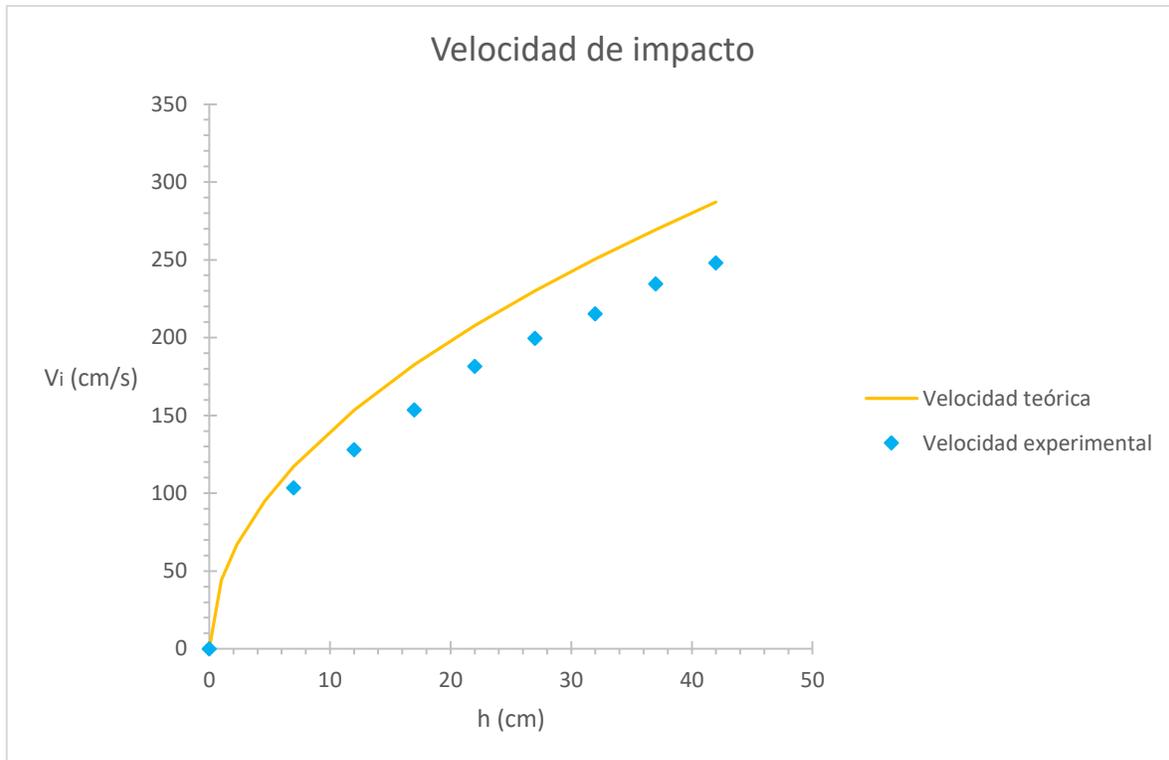


Figura 4.4 Gráfica de las velocidades de impacto teórica y experimental en función de la altura de caída libre.

4.1.3 POSICIÓN DEL DISCO DURANTE CAÍDA LIBRE, IMPACTO Y DESCENSO DENTRO DEL LÍQUIDO.

En esta sección de resultados se presenta la posición del disco de impacto en función del tiempo cuando desciende por caída libre, impacta la superficie libre del agua y desciende dentro del agua para un disco de teflón de diámetro de 1”.

En la figura 4.5 se muestra el disco de teflón cayendo, con una posición de 5.21 *cm* medida desde la superficie del agua en el frente de ataque del disco como ilustración del caso.

En la figura 4.6 se muestra la gráfica de la posición del centro del disco en función del tiempo, desde su posición mostrada en la figura 4.5 hasta que el disco sale del recuadro de observación.

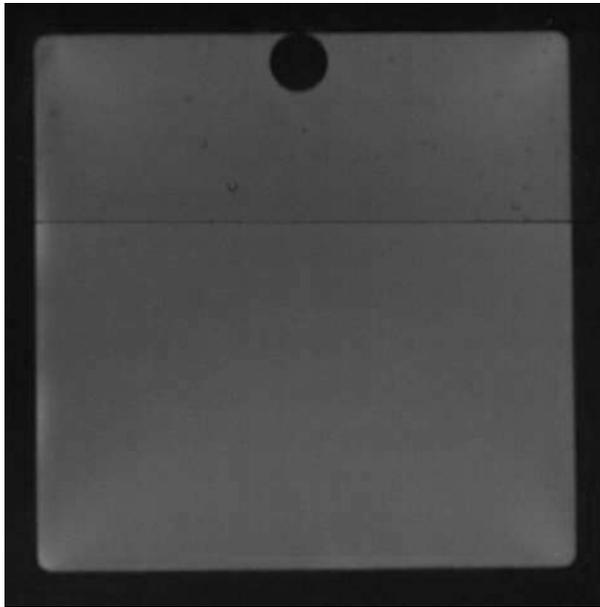


Figura 4.5 Caída libre de un disco de teflón de diámetro de 1" posicionado su centro de masa a una altura $y = 5.21 \text{ cm}$ con respecto a la superficie libre.

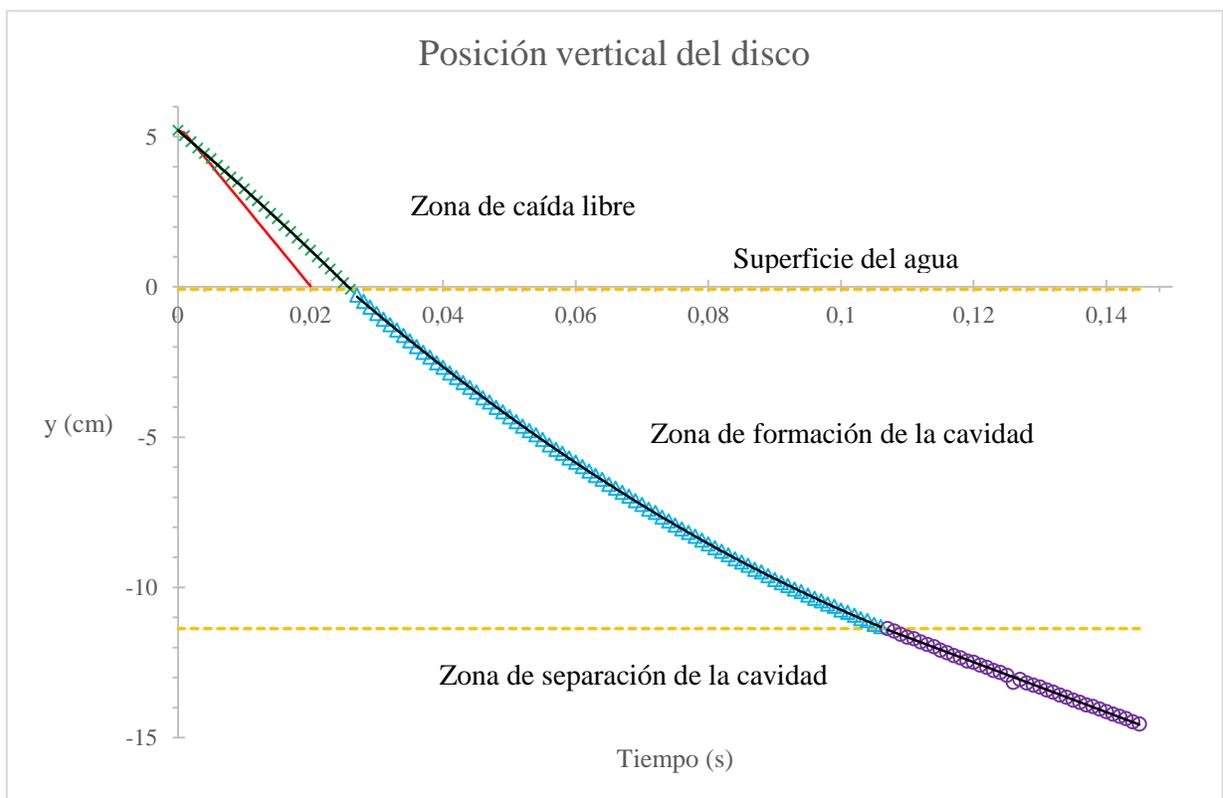


Figura 4.6 Gráfica de la posición del disco en función del tiempo, para un disco de teflón de diámetro de 1".

De la figura 4.6 se pueden identificar tres zonas durante la trayectoria del disco:

- ✚ Zona de caída libre, donde el disco se acelera conforme cae hasta impactar la superficie libre. La línea roja es la posición teórica del disco con una ecuación de caída libre definida como:

$$y = -490t^2 - 268.7t + 5.21 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Los puntos con **x** son la posición experimental con una ecuación de ajuste cuadrático:

$$y = -526.15t^2 - 189.11t + 5.21$$

- ✚ Zona de formación de la cavidad, donde comienza a formarse la corona del splash seguido de la cavidad de aire con una ecuación de ajuste cuadrático:

$$y = 616.6t^2 - 221.1t + 5.2 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

- ✚ Zona de separación de la cavidad, donde la cavidad se cierra y el disco se separa de la cavidad y continua hundiéndose dentro del líquido con una ecuación de ajuste lineal:

$$y = -83t - 2.53 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

De forma general se observa cómo disminuye la posición del disco conforme cae. Alcanzando un valor de 0 cm en el momento del impacto, en este caso corresponde a un tiempo de 0.027 s . Cuando sigue su trayectoria al descender dentro del líquido, el disco alcanza posiciones negativas, debido a que su posición se mide con respecto a la superficie libre del agua con $y = 0$.

De la zona de caída libre, para la posición del disco teórica se ve que el disco impacta la superficie libre a un tiempo antes que en el caso experimental. Del caso de la posición del disco experimental por la trayectoria de sus puntos se alcanza ver que el disco describe una trayectoria parabólica por tanto este puede ser un movimiento vertical uniformemente acelerado.

De la figura 4.6 en la zona de formación de la cavidad, se puede observar como al transcurrir el tiempo el disco alcanza posiciones más bajas, es decir se va hundiendo. En la zona de separación de la cavidad se observa cómo el disco comienza a seguir una tendencia lineal, el disco se mueve uniformemente con respecto al tiempo es decir a velocidad constante.

Para un análisis complementario del movimiento del disco, se muestra también la gráfica de sus velocidades promedio La figura 4.7 se muestra la gráfica velocidad promedio del disco en función del tiempo.

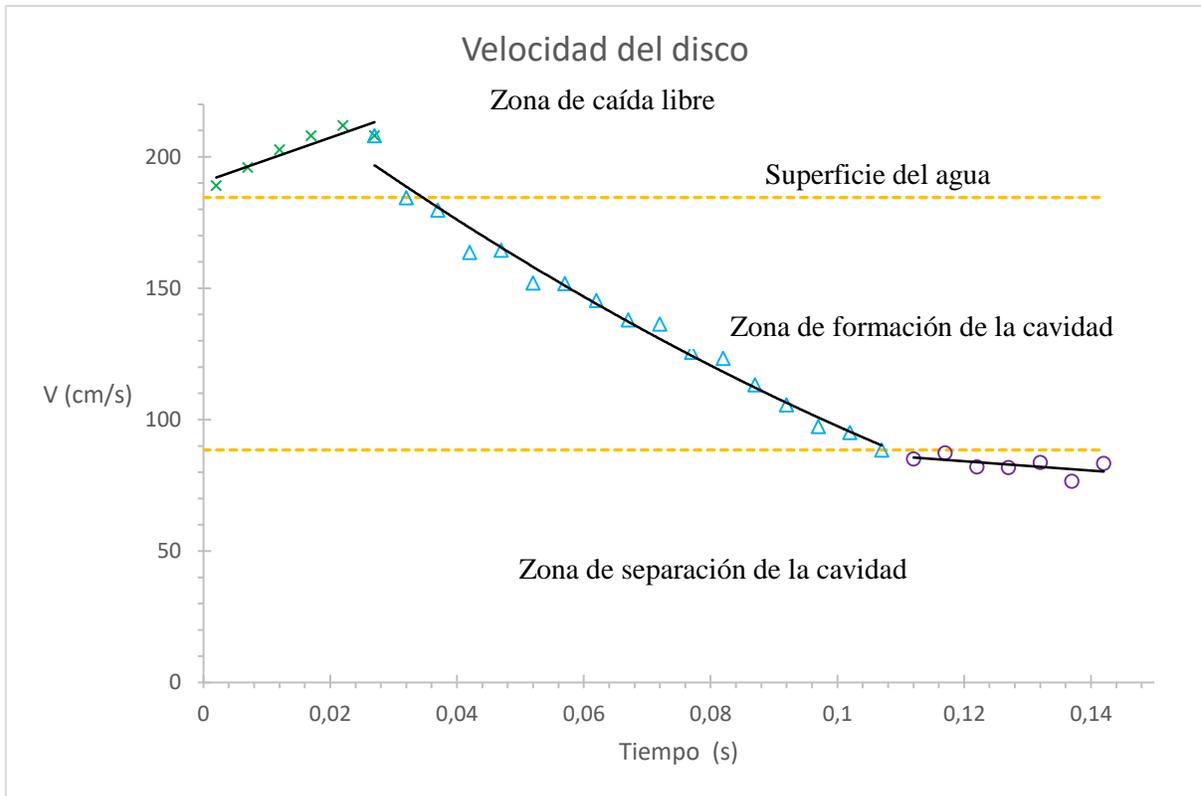


Figura 4.7 Gráfica de la velocidad promediada del disco en función del tiempo para un disco de teflón de diámetro 1”.

+ Zona de caída libre, con una ecuación de ajuste lineal:

$$V = 846.23t + 190.37 \quad (\text{Ec. 4.5})$$

+ Zona de formación de la cavidad, con una ecuación de ajuste cúbico:

$$V = -90358t^3 - 18672t^2 - 2456.4t + 246.27 \quad (\text{Ec. 4.6})$$

+ Zona de separación de la cavidad, con una ecuación de ajuste lineal:

$$V = -176.77t + 105.34 \quad (\text{Ec. 4.7})$$

De la figura 4.7 se puede ver que al pasar el tiempo la velocidad del disco aumenta hasta alcanzar un valor máximo en su magnitud en el momento del impacto y después como este desciende en el líquido su velocidad disminuye, por la fuerza de arrastre y la fuerza de tensión superficial que desaceleran el movimiento del disco.

De la zona de caída libre se observa una tendencia de aumento en la velocidad del disco, conforme cae y que además lo hace de manera uniforme y lineal, con lo que queda corroborado que el movimiento del disco es un movimiento uniformemente acelerado. La velocidad máxima alcanzada por el disco en este caso es de 213.21 *cm/s* de acuerdo a su ecuación de ajuste lineal, que es la velocidad en el momento del impacto y ocurre a los 0.027 *s*.

De la zona de formación de la cavidad, se observa que al pasar el tiempo después del impacto del disco con una velocidad máxima, la velocidad del disco disminuye. Se observa además que la velocidad del disco sigue una tendencia curva, su velocidad varía con el tiempo pero de forma no lineal, por tanto no es un movimiento uniformemente acelerado.

De la zona de separación de la cavidad se puede ver que su velocidad a un tiempo de 0.107 s empieza a estabilizarse y alcanzar una velocidad constante 83 cm/s , parece ser que el disco comienza a alcanzar una velocidad terminal. Esto ocurre a un valor de tiempo donde se da el cierre de la cavidad de aire. Esto indica que en la zona de la formación de la cavidad de aire, la superficie y la fuerza de arrastre desaceleran el movimiento del disco. Una vez que se cierra la cavidad, la fuerza que ejerce la superficie deja de estar presente y permite que en el disco se presente un equilibrio de fuerzas y por tanto alcanza una velocidad terminal.

4.1.4 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE LA CAVIDAD

Aquí se presenta el ángulo de la cavidad y cómo varía con respecto a la posición del frente del disco. El ángulo de la cavidad se desarrolla en el momento en que la corona del splash se ha formado y la cavidad de aire comienza a desarrollarse detrás del objeto. Al principio el ángulo de la cavidad es muy inestable pero una vez que el objeto sólido tiene una profundidad del diámetro del objeto el ángulo se estabiliza en cierta medida y se puede medir con mejor precisión el ángulo de la cavidad. En la figura 4.8 se muestra una imagen de la cavidad de aire y el ángulo descrito por las paredes de la cavidad, a un diámetro y medio de profundidad del disco respecto al nivel del líquido en reposo.

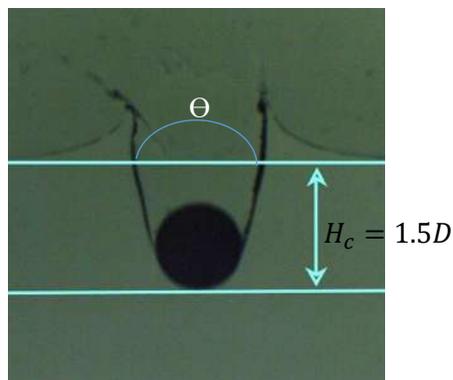


Figura 4.8 Ángulo de la cavidad a una profundidad adimensional de $\frac{H_c}{D} = 1.5$

En la figura 4.9 se muestra la gráfica del ángulo de la cavidad en función de la posición del frente del disco, con un diámetro de $1''$ impactando a una velocidad de 250 cm/s , obtenida por el programa de análisis de imágenes en Matlab.

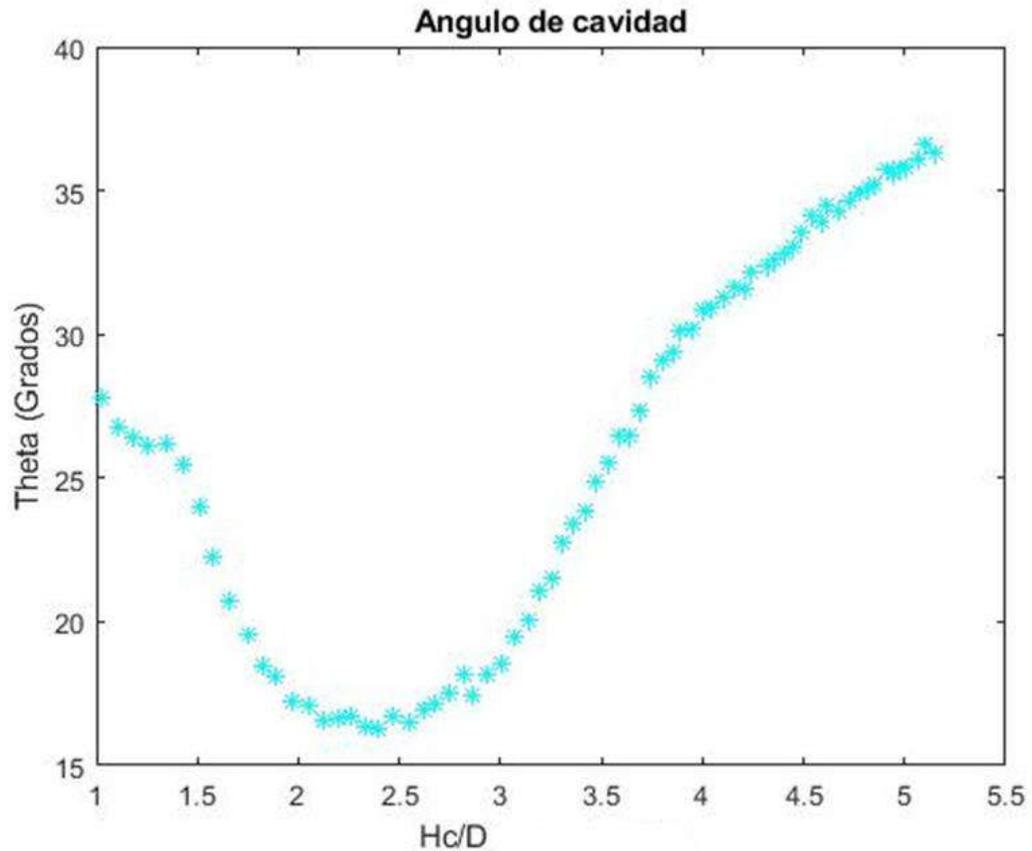


Figura 4.9 Gráfica del ángulo de la cavidad en función de la profundidad adimensional del frente del disco con diámetro de 1” para una velocidad de impacto de 250 cm/s.

En la figura 4.9 se puede apreciar que conforme el disco desciende, el ángulo de la cavidad de un valor de 25° decrece ligeramente a un valor de 18°. Debido al movimiento de desplazamiento lateral del líquido, que el disco genera cuando desciende, lo que provoca una disminución en el ángulo de la cavidad. Se observa que el disco al alcanzar una profundidad mayor de 2.5 diámetros, el ángulo de la cavidad comienza a aumentar. Esto se debe a que el disco, ha alcanzado una zona más profunda y la presión hidrostática del fluido en la cavidad formada, ocasiona que las paredes laterales de la cavidad sean forzadas a moverse en la dirección opuesta, haciendo que la distancia entre estas paredes se reduzca, logrando con ello un aumento del ángulo de la cavidad conforme se hunde el disco.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al variar la velocidad de impacto, el tamaño del disco, así como la densidad del disco en el comportamiento de la deformación que se induce en la superficie líquida.

4.1.5 RESULTADOS DEL SPLASH EN 2D VARIANDO LA VELOCIDAD DE IMPACTO DEL DISCO PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE DISCO

La profundidad de la cavidad en función de la velocidad de impacto, para varios tamaños de disco es presentada en la figura 4.10.

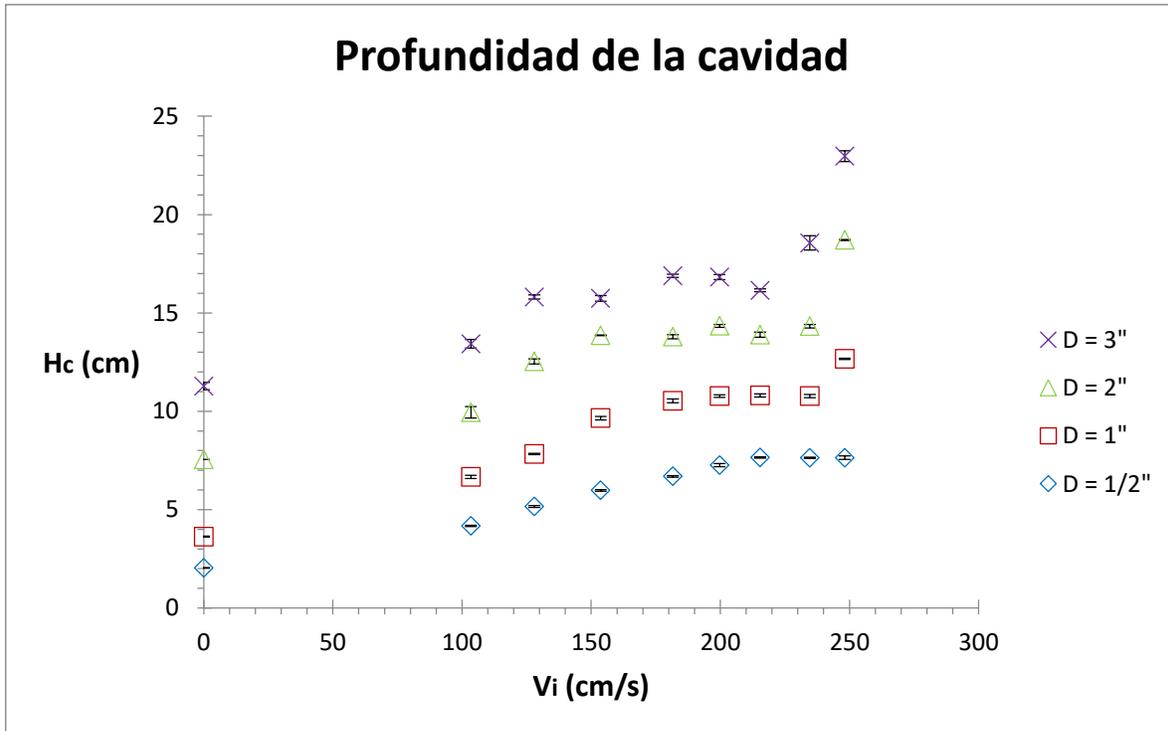


Figura 4.10 Profundidad máxima de la cavidad (H_c) gráfícada en función de la velocidad de impacto del disco (V_i) para varios tamaños de disco.

Se observa que conforme la velocidad de impacto aumenta, la profundidad de la cavidad aumenta, esto se debe a que al aumentar la velocidad de impacto, el disco tiene una energía cinética mayor, que le permite lograr una mayor penetración dentro del líquido venciendo las fuerzas de tensión superficial y compitiendo con las fuerzas viscosas, alcanzando cada vez mayores profundidades de la cavidad. Se nota también que para el rango de velocidad de 180 cm/s a 215 cm/s la profundidad de la cavidad aumenta lentamente, parece ser que pequeños cambios en la velocidad de impacto afecta muy poco la profundidad de la cavidad.

En relación al tamaño del disco se observa que la profundidad de la cavidad es mayor conforme el tamaño de disco aumenta. Los discos disponen de mayor energía potencial, factor adicional, que aumenta la energía cinética ($E_c = mV^2/2$) del disco, debido al aumento en su masa. Este aumento en la energía cinética del disco le permite con mayor facilidad abrirse camino a través del fluido generando una cavidad de mayor profundidad.

El ángulo de cavidad graficada contra la velocidad de impacto del disco para varios tamaños de disco, es presentado en la figura 4.11.

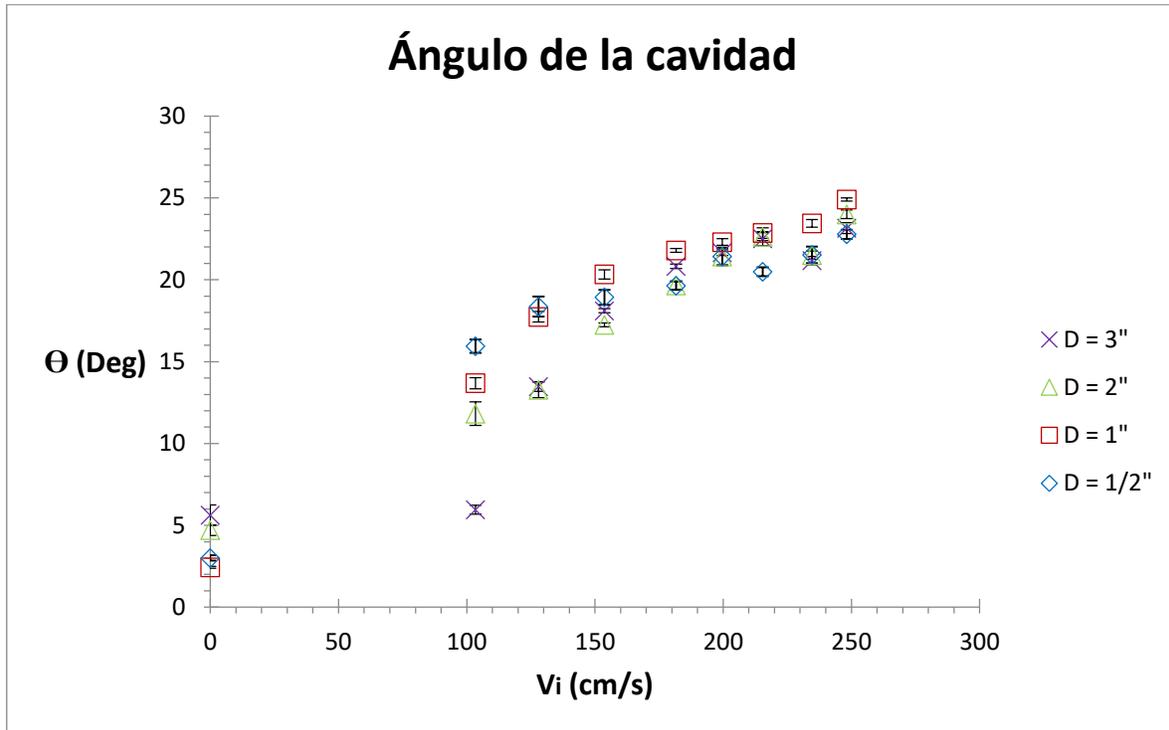


Figura 4.11 Gráfica del ángulo de cavidad (Θ) contra la velocidad de impacto del disco (V_i) para diferentes tamaños de disco.

De la gráfica 4.11 se puede observar que a medida que aumenta la velocidad de impacto se alcanza una mayor apertura de la cavidad representada por el ángulo Θ de la cavidad. Como ya se mencionó una mayor velocidad de impacto en la superficie del líquido transfiere una mayor energía al fluido. Por tanto el impulso que transfiere el disco al momento del impacto, le permite desplazar una mayor cantidad de agua en las capas superiores del fluido con una mayor velocidad, dando lugar a un incremento al ángulo de la cavidad durante la entrada del disco, así como un aumento en la altura de la corona.

Se observa también que a valores bajos de velocidad, menores a 180 cm/s el ángulo de cavidad es muy distinto para diferentes tamaños de disco, pero para valores de velocidad de impacto superiores 180 cm/s , el ángulo de cavidad es similar, para los diferentes tamaños de disco. El ángulo de cavidad permanece constante aun cuando el tamaño de disco cambie.

El efecto de la velocidad de impacto para valores mayores de 180 cm/s , es más dominante en el ángulo de la cavidad, que el que produce el aumento de tamaño del disco debido al factor cuadrático de la velocidad en el cálculo de la energía cinética.

La altura del jet contra la velocidad de impacto del disco para varios tamaños de disco es presentada en la figura 4.12.

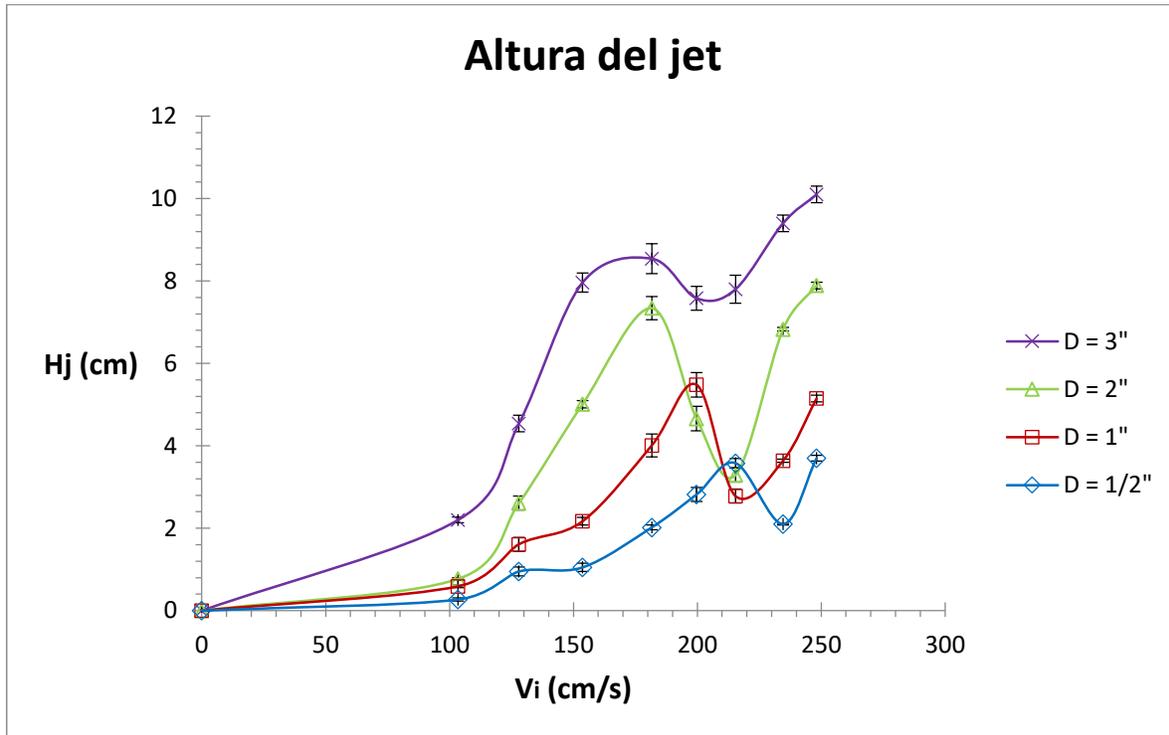


Figura 4.12 Gráfica de la altura del jet (H_j) contra la velocidad de impacto del disco (V_i) para diferentes tamaños de disco.

En la gráfica 4.12 se observa una tendencia aumento en la altura del jet cuando se aumenta la velocidad de impacto. Sin embargo, se logran observar un máximo y un mínimo local en un rango de velocidades de impacto. Posterior a dicha región continúa en aumento la altura del jet al incrementar la velocidad de impacto. A esta disminución de la altura del jet de su máximo local al mínimo local, a medida que se aumenta la velocidad de impacto, se le ha denominado aquí efecto de retroceso en la altura del jet. El efecto de retroceso en la altura del jet como una posible hipótesis se debe a varios factores. Un factor es el efecto de succión por los extremos de la corona del splash, estos extremos de la corona son de mayor tamaño y tienen una mayor influencia en el jet cuando se alcanza cierta velocidad de impacto. Cuando estos bajan y el jet emerge, logran que el jet se vuelva más ancho por la succión que ejercen al bajar. Otro factor importante es la tensión superficial del líquido ya que limita el crecimiento en la altura del jet produciendo un aumento en el ancho del jet. Un último factor que puede estar contribuyendo también es el peso del líquido arrastrado por el jet que al aumentar el ancho en su base aumenta la fuerza gravitacional e impide que el jet se desarrolle totalmente. Cuando se sigue aumentando la velocidad de impacto, con un valor mayor al del retroceso, la fuerza inercial alcanza un valor tal que supera las fuerzas gravitacionales y las de tensión superficial permitiendo que la altura del jet siga aumentando.

Se observa también que a mayores tamaños de disco se alcanzan mayores alturas del jet. Para el disco más pequeño se tienen alturas de orden de 0 a 3.7 cm mientras que para el más grande del orden 0 a 10 cm, esto es ocasionado por profundidades de la cavidad mayores alcanzadas para discos de mayor tamaño. El cierre de cavidad es más profundo y la superficie líquida en el cierre alcanza a estirarse más, por tanto se obtienen mayores alturas del jet.

También se puede observar que la región de transición donde se presenta el máximo local y el mínimo local (efecto de retroceso) muestra un desplazamiento en donde la región de transición se presenta a velocidades menores a medida que el diámetro del disco aumenta. Para los discos de 1/2" y 1" la velocidad de impacto a la que se presenta el retroceso es de 230 cm/s y 200 cm/s respectivamente. Para los discos de 2" y 3" se observa que que el efecto del retroceso se presentan a una misma velocidad de impacto de 180 cm/s.

4.1.6 RESULTADOS DEL SPLASH EN 2D VARIANDO LA VELOCIDAD DE IMPACTO PARA DIFENTES DENSIDADES DEL DISCO DE IMPACTO

En la figura 4.13 se muestra la profundidad de la cavidad alcanzada graficada contra la velocidad de impacto del disco, pero para diferentes materiales en este caso teflón ($\rho = 2 \text{ g/cm}^3$), aluminio ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$) y acero inoxidable ($\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$), todos los discos con un diámetro de 1".

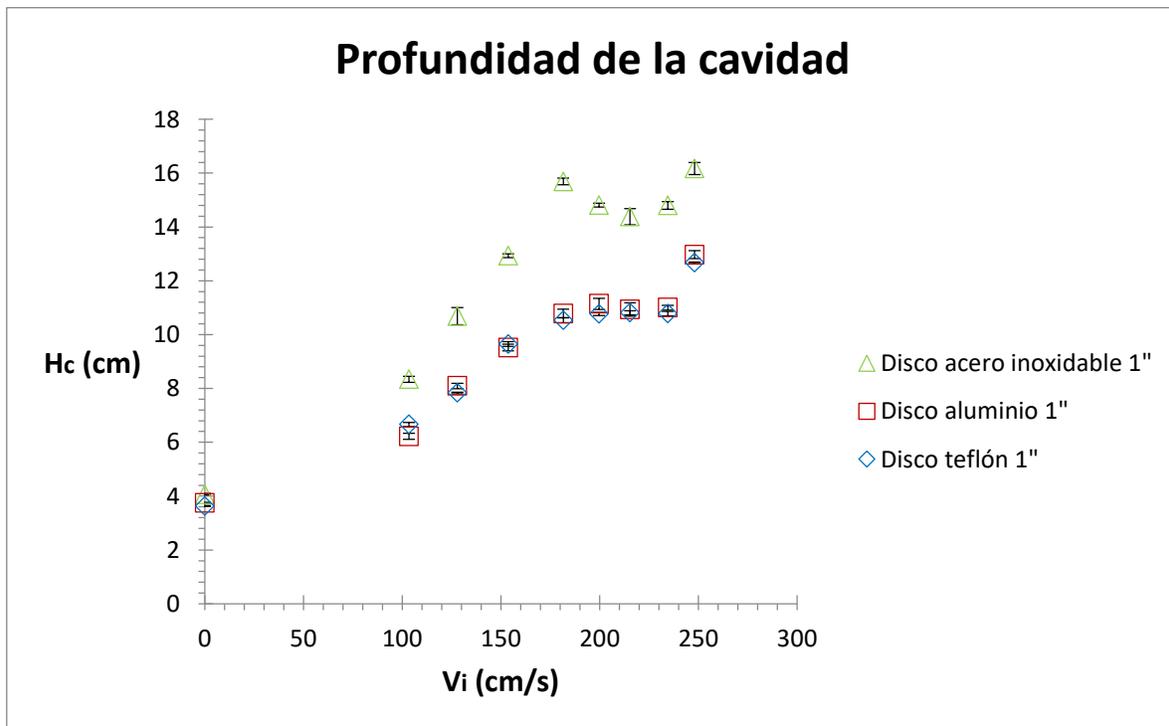


Figura 4.13 Profundidad de la cavidad (H_c) contra la velocidad de impacto del disco (V_i) para diferentes materiales de disco todos con un diámetro de 1".

Se observa de la gráfica 4.13 que el aumento de densidad para un mismo tamaño de disco, produce un aumento significativo en la profundidad de la cavidad, esto se nota en el caso del disco de acero inoxidable en comparación con el de teflón, la profundidad de la cavidad del disco de acero es mayor. Para un cambio pequeño de densidad en el disco se observa que la profundidad de la cavidad presenta una pequeña variación, como el caso del disco de teflón en comparación con el de aluminio ambos discos poseen una densidad similar.

Esto se debe a que un disco con mayor densidad posee una mayor masa que uno de menor densidad. Como ya se mencionó, una mayor masa en el disco sólido permite transferir un mayor impulso sobre la superficie líquida.

En la figura 4.14 se presenta el ángulo de la cavidad contra la velocidad de impacto para diferentes materiales de disco con diámetro de 1".

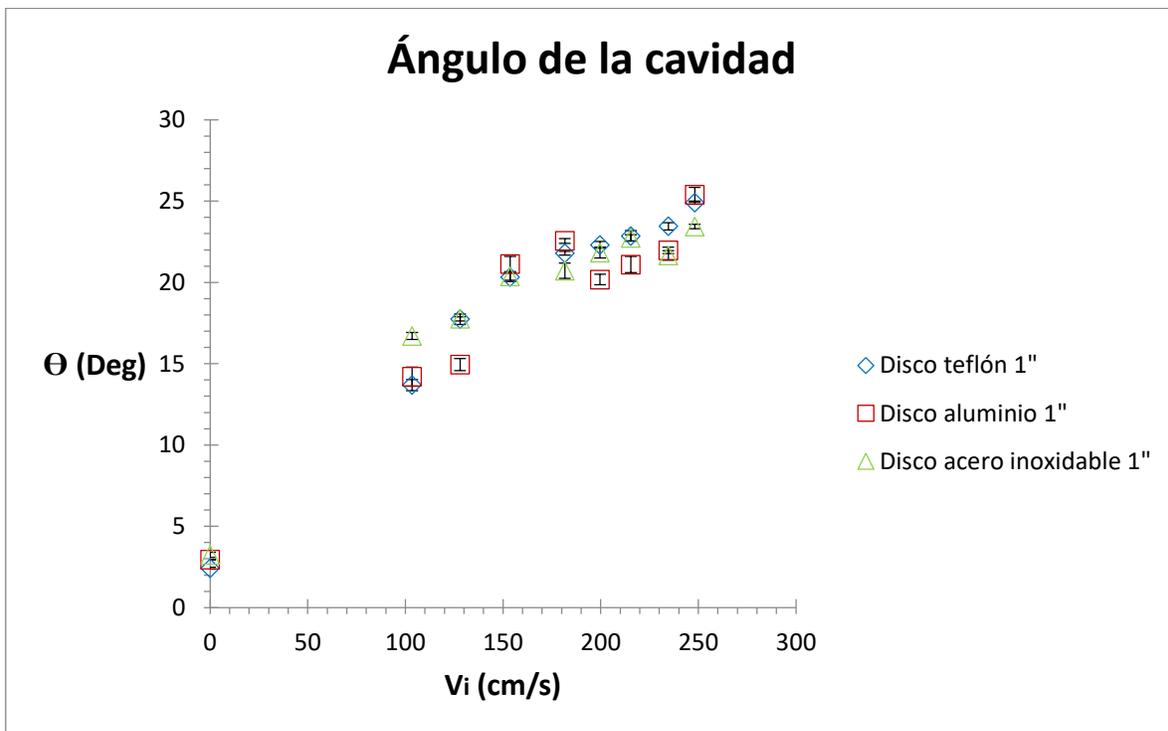


Figura 4.14 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) contra la velocidad de impacto (V_i) para diferentes materiales de disco todos con diámetro de 1"

Se observa de la figura 4.14 que para diferentes materiales se obtienen valores muy similares del ángulo de la cavidad, el ángulo de cavidad es independiente del tipo de material que se use en el disco de impacto. El ángulo de la cavidad se encuentra dominado más bien por el efecto de la velocidad de impacto donde al incrementar dicha velocidad, el ángulo de cavidad aumenta.

En la figura 4.15 se muestra la gráfica de la altura del jet contra la velocidad de impacto pero para diferentes materiales de disco todos con un diámetro de 1".

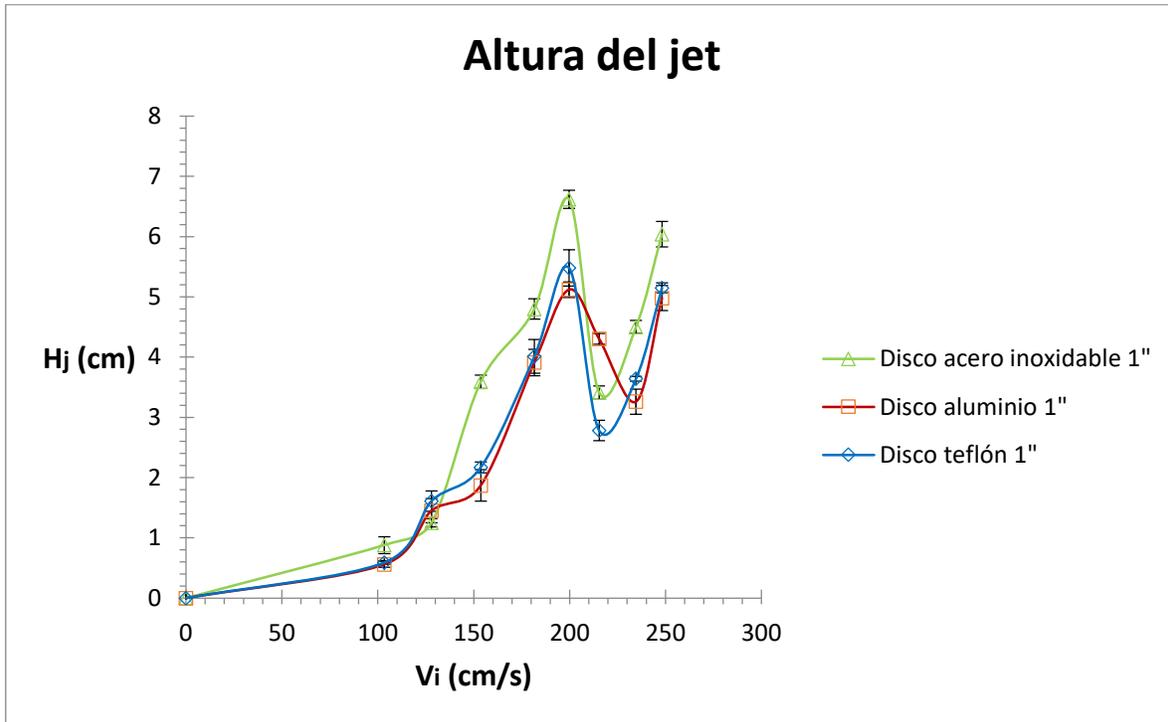


Figura 4.15 Gráfica de la altura del jet (H_j) contra la velocidad de impacto (V_i) para diferentes materiales de disco todos con diámetro de 1".

De la gráfica 4.15 se observa que al aumentar la densidad del disco, en el caso del disco de acero inoxidable muestra en su mayoría valores de la altura del jet mayores que en los discos de menor densidad como el de teflón y aluminio. En relación con el disco de acero inoxidable la altura del jet es mayor en un orden de 1.5 *cm* cuando se compara con el teflón o el aluminio, de manera que grandes cambios de densidad en el disco, la altura del jet se aumenta pero muy poco. Sin embargo, se observa que el efecto de retroceso sucede a la misma velocidad de impacto para los diferentes valores de densidad del disco, no importa que el tipo de material del disco cambie, el retroceso en la altura del jet se da a la misma velocidad de impacto de 200 *cm/s*.

4.1.7 ANÁLISIS ADIMENSIONAL PARA EL CASO DE AGUA PURA.

De los parámetros adimensionales establecidos para el caso de estudio, el número de Weber (We) en los experimentos realizados se encuentra en el rango de (185.62 – 1,068.08) para el disco de ½" y para el disco de 3" su rango es de (1,113.11 – 6,408.49). Esto indica que la fuerza de tensión superficial es muy pequeña en comparación con la fuerza inercial durante el impacto, por tanto en este análisis adimensional el número We no fue considerado.

En relación al número del Reynolds en los experimentos realizados, se encuentra en el rango de $(1.46 \times 10^5 - 3.5 \times 10^5)$ para el disco de $\frac{1}{2}$ " y para el disco de $(8.77 \times 10^5 - 2.1 \times 10^6)$; lo que indica que la fuerza inercial predomina en el flujo y la viscosidad es despreciable. Por tanto este parámetro en el análisis dimensional no fue relevante.

De modo que los parámetros adimensionales dependientes (profundidad de la cavidad y ángulo de la cavidad) son función solamente del número de Froude, pero para la altura del jet adimensional aún cuando la fuerza de tensión superficial es pequeña, en comparación con la fuerza inercial muestra un efecto importante. Al comparar la fuerza gravedad con la fuerza de tensión superficial, la fuerza de tensión superficial no es tan insignificante por tanto se debe considerar en el análisis del jet.

Para la altura del jet adimensional el efecto de la tensión superficial se vuelve importante y más cuando hay cambios presentes en el tamaño del objeto de impacto. Por tanto se considera el número de Bond para el análisis de la altura del jet cuyos valores quedaron comprendidos en el rango de $(21.61 - 777.95)$.

En la figura 4.16 se muestra la gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional en función del número de Froude.

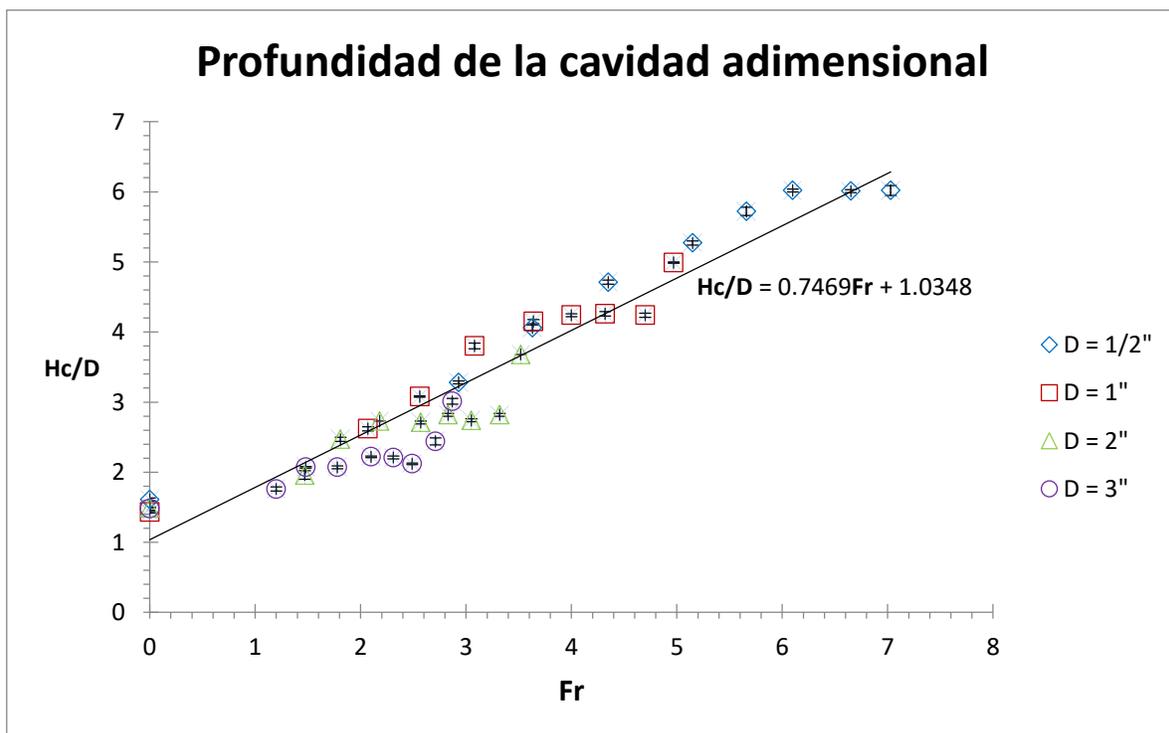


Figura 4.16 Gráfica de la profundidad adimensional (H_c/D) contra número de Froude (Fr).

En la gráfica 4.16 se puede ver como la mayoría de los valores de la profundidad de la cavidad se agrupan y se ajustan bien a una tendencia lineal con una ec. $H_c/D = 0.7469 Fr + 1.0348$. Cuando el número de Froude aumenta la profundidad de la cavidad también aumenta lo que indica que el principal parámetro que incrementa la profundidad de la cavidad, es la velocidad de impacto del disco y no el tamaño del disco.

En la figura 4.17 se muestra la gráfica del ángulo de la cavidad en función del número de Froude para diferentes tamaños de disco.

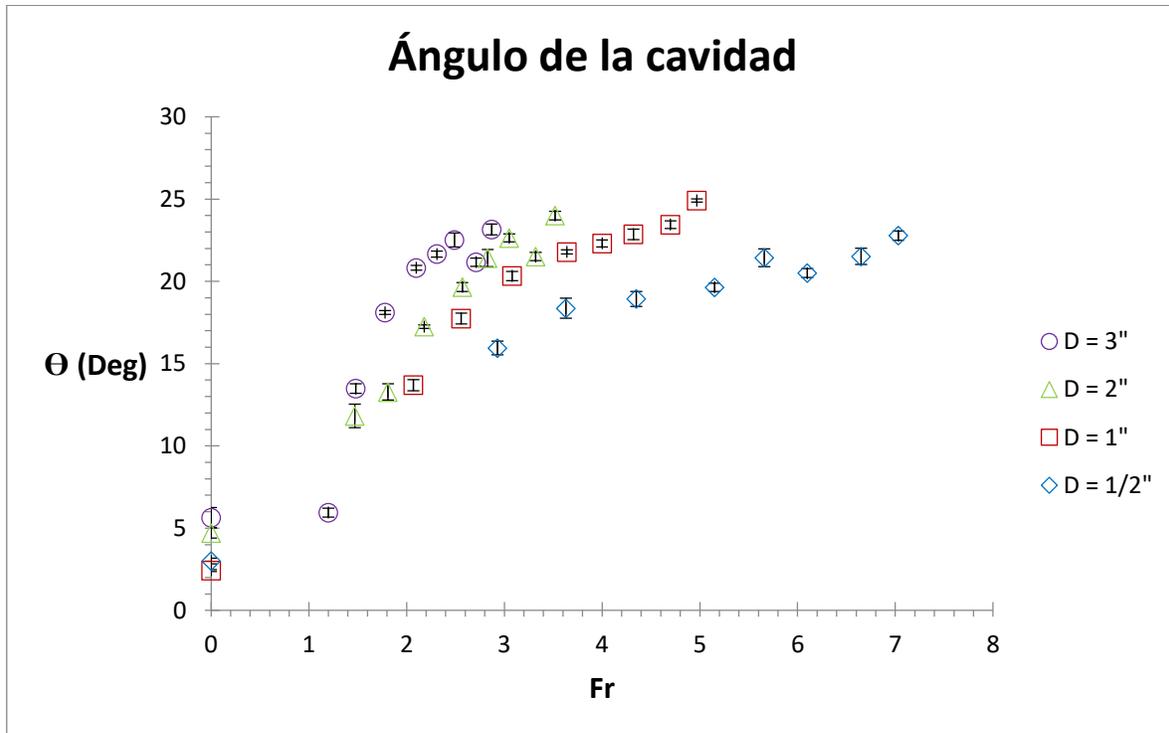


Figura 4.17 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) contra el valor del número de Froude (Fr) para diferentes diámetros del disco de teflón (D).

Se observa en la gráfica de la figura 4.17 que en general al aumentar el número de Froude el ángulo de la cavidad crece para cualquier tamaño de disco. En esta zona de números de Froude pequeños ($Fr < 7$) entre más grande es el tamaño del disco se obtienen ángulos de la cavidad mayores al ir incrementando el número de Froude. Se pueden apreciar para cada tamaño de disco dos tasas de crecimiento. Es decir, al ir aumentando el número de Froude, el ángulo de la cavidad crece más rápido al inicio y posteriormente su tasa de crecimiento es menor, mostrando dos pendientes para cada tamaño de disco. Entonces al ir disminuyendo el tamaño del disco la tasa de crecimiento inicial en el ángulo de la cavidad es menor y se va extendiendo a un rango mayor en el número de Froude. Esto se puede interpretar, de que para tamaños de disco grandes, la energía cinética con la que impacta es mayor, al poseer mayor masa y mayor extensión, por lo tanto se generan más rápidamente ángulos mayores en la cavidad al ir aumentar su velocidad, desde números de Froude pequeños. Por otra parte, un

disco de menor tamaño impacta con menor energía cinética y para poder aumentar el ángulo de la cavidad requiere alcanzar velocidades de impacto mayores y por lo tanto requiere extenderse a números de Froude mayores.

En la figura 4.18 se gráfica la altura del jet adimensional en función del número de Froude, para diferentes valores del número de Bond.

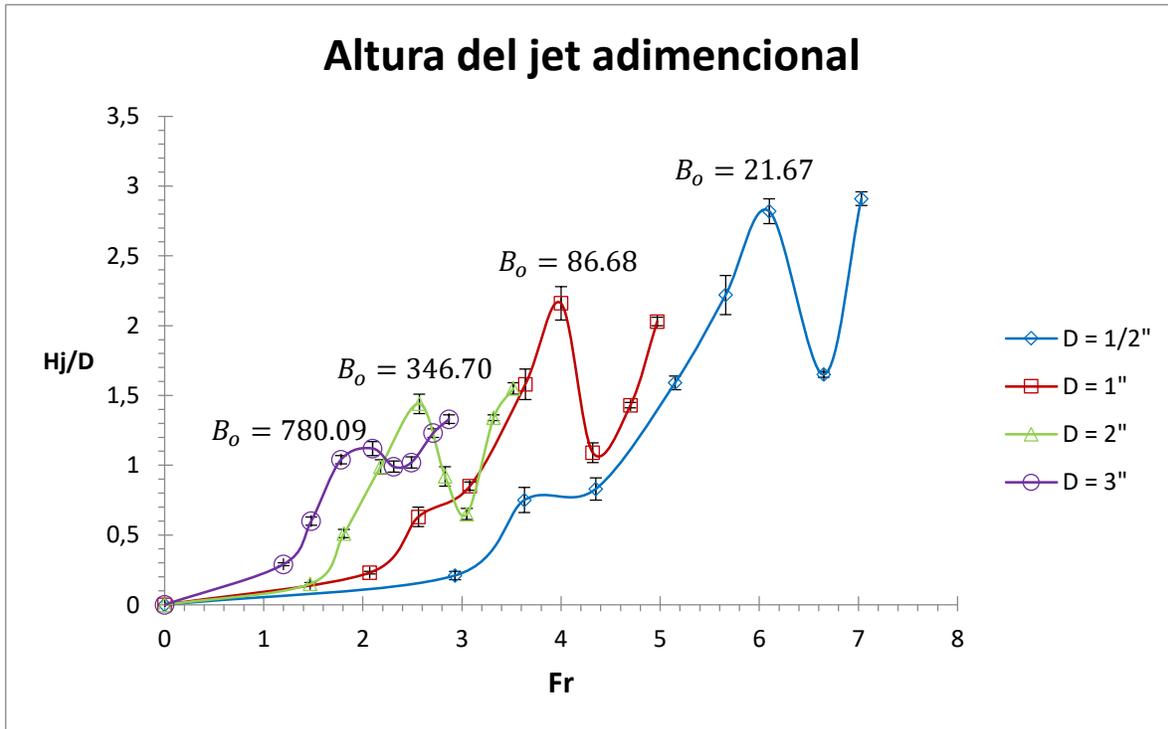


Figura 4.18 Gráfica de la altura del jet adimensional (H_j/D) contra el número de Froude (Fr) para diferentes valores del número de Bond (Bo).

De la gráfica 4.18 se observa algo muy interesante, para números de Bond pequeños el efecto de retroceso en la altura del jet es mayor por ejemplo en el disco de $1/2''$. Conforme el número de Bond aumenta se observa que el efecto de retroceso decrece, como en el caso del disco de $3''$. Esto indica que para tamaños grandes en el disco de impacto el efecto de retroceso puede ser muy pequeño. De manera contraria para los discos más pequeños en donde el efecto de la fuerza de gravedad disminuye y la fuerza de tensión superficial del agua toma mayor relevancia magnificando el efecto de retroceso.

En la figura 4.19 se muestra la gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional, para diferentes materiales de disco.

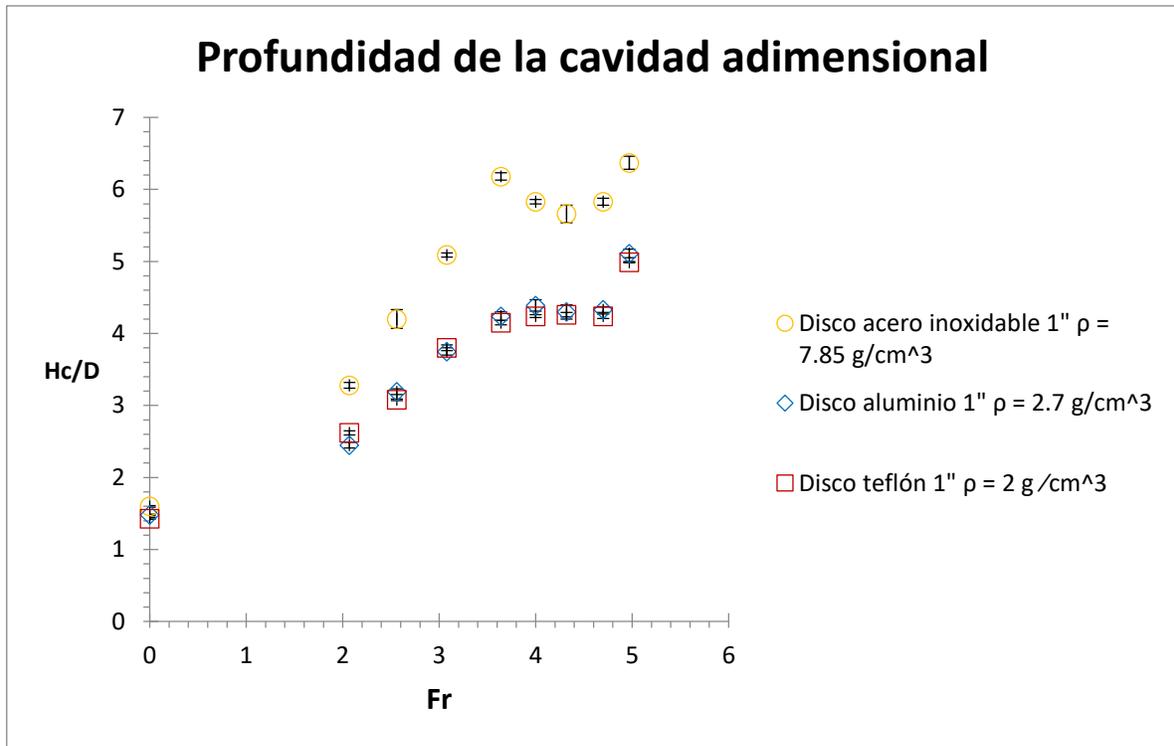


Figura 4.19 Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c/D) en función del número de Froude (Fr), para diferentes valores de densidad del disco.

De la gráfica 4.19 se puede ver que la profundidad de la cavidad adimensional se comporta de manera diferente para cambios en la densidad del disco, que para cambios en el tamaño del disco. Cuando el tamaño de disco cambia la profundidad adimensional de la cavidad no se modifica es independiente del tamaño, pero para cambios de densidad notables como se observa en la gráfica para el caso del acero inoxidable, la profundidad de la cavidad adimensional aumenta notablemente. También se ve que para cambios de densidad muy pequeños, cambio del disco de teflón al aluminio, la profundidad de la cavidad tiene valores muy similares para ambos discos. Por tanto la profundidad de la cavidad adimensional se incrementa solo cuando la densidad del disco aumenta.

En la figura 4.20 se presenta la gráfica del ángulo de cavidad en función del número de Froude.

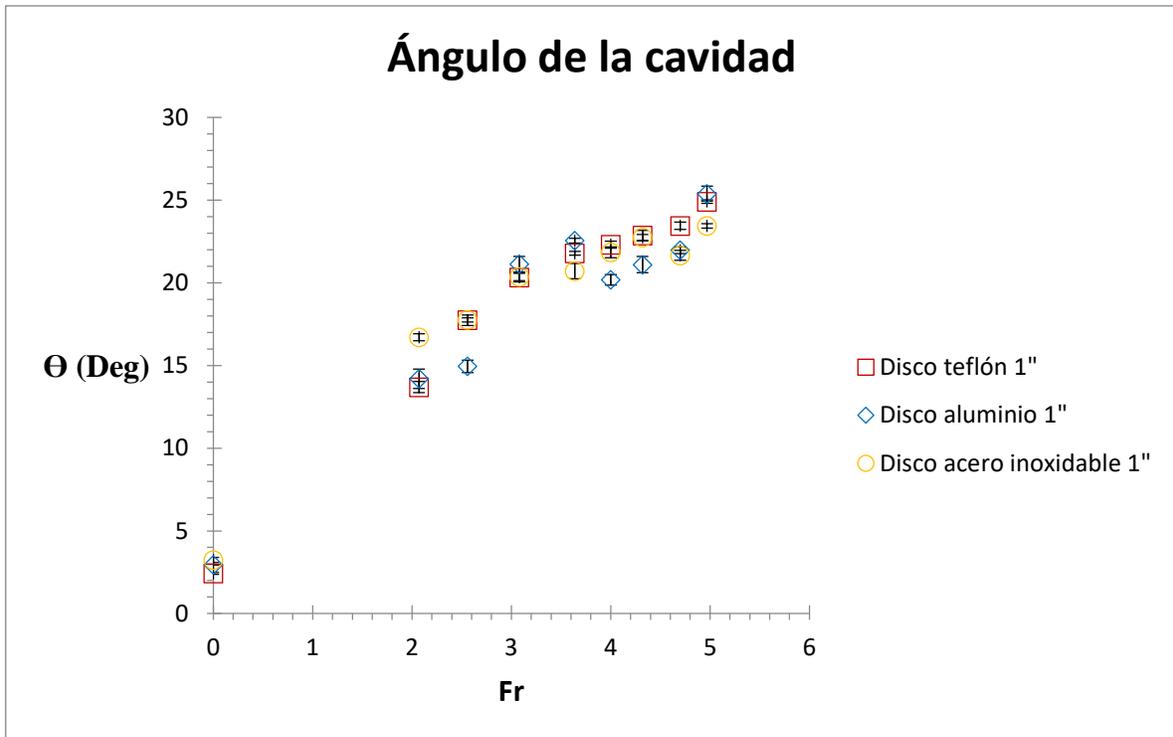


Figura 4.20 Gráfica del ángulo de cavidad (Θ) contra el número de Froude (Fr).

En la gráfica 4.20 se observa que el ángulo muestra menor dependencia a la densidad del material del disco, ya que los valores de ángulo de la cavidad son muy similares para las diferentes densidades de disco. Por tanto el ángulo de cavidad depende más del tamaño de disco que de la densidad del material.

Finalmente se presenta la gráfica de la altura del jet adimensional, pero para diferentes densidades del disco en función del número de Froude en la figura 4.21.

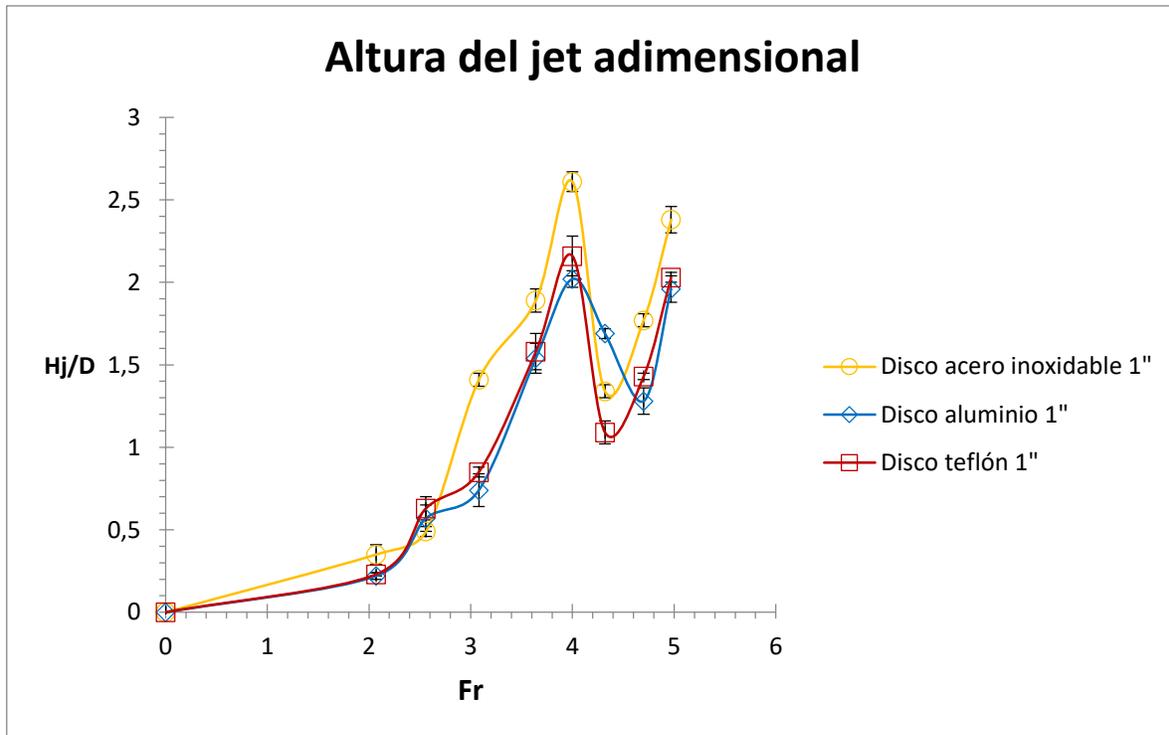


Figura 4.21 Gráfica de la altura del jet adimensional (H_j/D) en función del número de Froude (Fr)

De la gráfica 4.21 se observa que a diferencia de la gráfica 4.18, donde se varía el tamaño de disco, en este caso el variar la densidad de los discos de impacto, modifica muy levemente la altura del jet adimensional aun cuando se cambie drásticamente la densidad, como en el caso disco de acero inoxidable, el cambio en altura del jet es muy poco. Esto indica que la altura del jet adimensional es más sensible a cambios de tamaño de disco que a cambios de densidad del disco.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES USANDO SOLUCIONES ACUOSAS CON SURFACTANTE SDS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al variar la tensión superficial del agua, la velocidad de impacto en el comportamiento de la deformación que se induce en la superficie líquida.

4.2.1 VALORES DE TENSIÓN SUPERFICIAL DE LAS SOLUCIONES CON SDS

En la tabla 4.2 se muestran los valores de tensión superficial medidos de las soluciones acuosas utilizadas en el estudio.

Tabla 4.2 Valores de tensión superficial obtenidos al variar la concentración de surfactante en las soluciones acuosas a temperatura ambiente (20 °C).

Concentración de la solución (<i>cmc</i>)	(<i>ppm</i>)	Valor de tensión superficial (<i>mN/m</i>)
0 <i>cmc</i>	0	72.8
0.001 <i>cmc</i>	2	71.98
0.01 <i>cmc</i>	24	71.34
0.05 <i>cmc</i>	118	69.57
0.1 <i>cmc</i>	235	67.53
0.5 <i>cmc</i>	1175	50.63
0.8 <i>cmc</i>	1880	43.29
1 <i>cmc</i>	2350	38.45
2 <i>cmc</i>	4701	38.62
SDS y pentanol		28.36

De la tabla 4.2 se puede distinguir dos categorías de concentración de acuerdo a los valores de tensión superficial. Una región de baja concentración donde la tensión superficial disminuye aproximadamente 4 *mN/m* de un valor de concentración de 0.001*cmc*, hasta un valor de 0.1 *cmc* y otra de alta concentración donde se observan disminuciones de tensión superficial del orden de 9 *mN/m*, cuando hay cambios de concentración en la solución mayores a 0.1 *cmc*. De aquí se consideran estas dos regiones de concentración para realizar el análisis variación de tensión superficial.

En la figura 4.22 se muestra la gráfica del valor de tensión superficial medido en función de la concentración de surfactante en la solución acuosa en *ppm*.

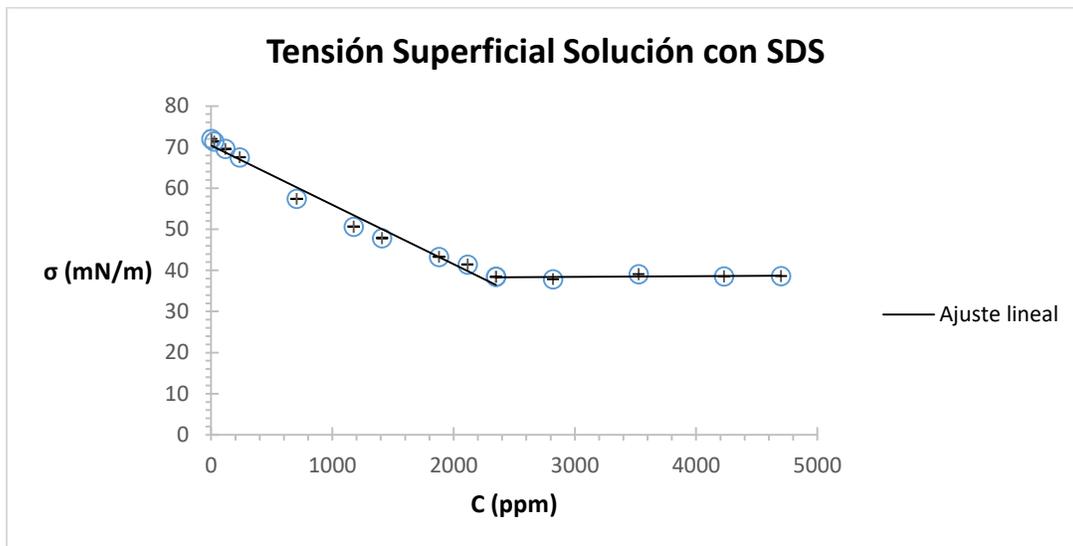


Figura 4.22 Gráfica de la tensión superficial (σ) *mN/m* en función de la concentración de surfactante en la solución (*C*) *ppm*

En la figura 4.22 se puede observar una tendencia de disminución de la tensión superficial, cuando se aumenta la concentración del surfactante SDS hasta alcanzar un valor fijo de tensión superficial de 38.5 mN/m , por más que se le agregue surfactante al agua su tensión superficial no disminuye más. Por tanto el valor mínimo de tensión superficial que se logró alcanzar fue de 38.5 mN/m de un valor de 72.8 mN/m , que es el valor de tensión superficial del agua. De las mediciones de tensión superficial se logró corroborar experimentalmente que efectivamente a una concentración de 2350 ppm o $8.15 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ es el valor de concentración micelar crítica, concentración a la cual a partir de la cual la tensión superficial se estabiliza sin importar si se sigue agregando surfactante a la solución, la tensión superficial no disminuye; es decir se estabiliza. Esto se puede visualizar en la gráfica por la intersección de las rectas de ajuste que ocurre cerca del valor de 2300 ppm en el eje de las abscisas

4.2.2 EFECTO DE LA DISMINUCIÓN DE TENSIÓN SUPERFICIAL EN LA CORONA DEL SPLASH.

Aquí se muestra el efecto que tiene disminuir la tensión superficial, en la formación de la corona del splash al usar una concentración de 1 cmc de SDS en la solución acuosa.

En la figura 4.23 se muestran dos imágenes de la formación de la corona del splash cuando recién impacta el disco en la superficie libre, en la primera se tiene agua con un valor de tensión superficial de 72.8 mN/m y en la segunda se usa una solución acuosa con un valor de tensión superficial de 38.45 mN/m .

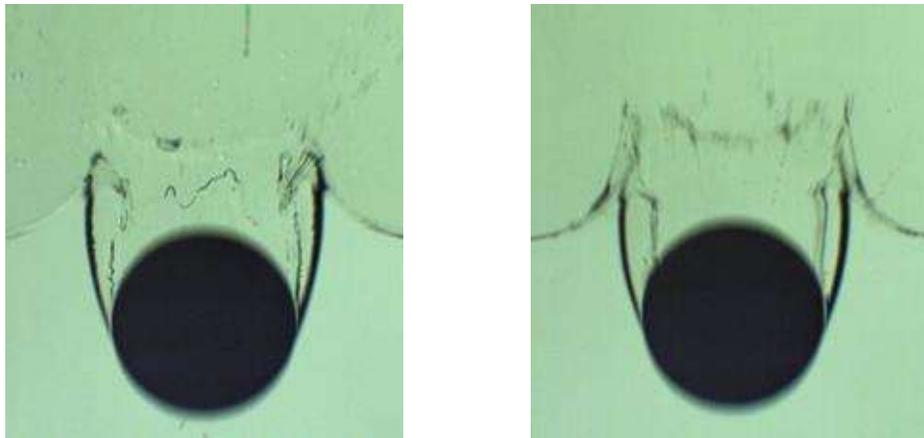


Figura 4.23 Imágenes de la formación de la corona para un disco de teflón de diámetro de $1''$ que impacta con una velocidad de 250 cm/s . Imagen izquierda agua pura con tensión superficial de 72.8 mN/m . Imagen derecha solución con SDS a 1 cmc con tensión superficial 38.45 mN/m .

De la figura 4.23 se observa de la imagen izquierda una corona del splash menos formada, la tensión superficial del agua es tal que las gotas no se rompen tan fácilmente y se mantienen más agrupadas. En comparación con la imagen derecha se puede ver fácilmente como se rompen las gotas y se dispersan con mayor libertad, formándose una corona más detallada por disminuir la tensión superficial del agua con el uso del SDS, también se puede

notar de la imagen derecha como los extremos de la corona tienen una mayor deformación, tanto vertical como horizontal en comparación con el de la izquierda donde solo se usa agua.

En la figura 4.24 se muestran dos imágenes con mismas condiciones de impacto, mismo tamaño de disco y soluciones solo que en un instante de tiempo avanzado donde la cavidad está por cerrarse.

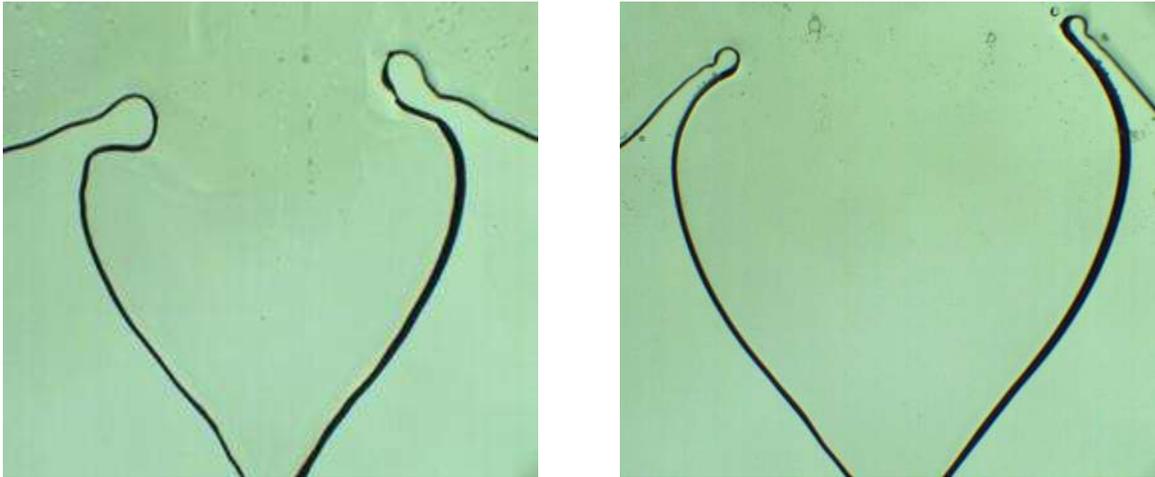


Figura 4.24 Imágenes de la corona del splash y su cavidad a instantes de cerrarse para un disco de teflón de diámetro de 1", que impacta con una velocidad de 250 *cm/s*. Imagen izquierda agua pura con tensión superficial de 72.8 *mN/m*. Imagen derecha solución con SDS a 1 *cmc* con tensión superficial 38.45 *mN/m*.

De la figura 4.24 se puede observar más claramente que el disminuir la tensión superficial del agua (imagen derecha) los extremos de la corona se alargan, se hacen más delgados y se desplazan en una dirección horizontal hacia fuera de la cavidad, es decir la cavidad se abre más, mientras que si la tensión superficial del agua tiene su valor normal (imagen izquierda) los extremos de la corona no se alargan se encuentran más anchos y se desplazan muy poco en dirección horizontal, la tensión superficial restringe su deformación.

4.2.3 EFECTO EN LA PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD AL VARIAR SUTENSIÓN SUPERFICIAL.

La profundidad de la cavidad en función de la velocidad de impacto del disco de teflón de diámetro 1", para bajas concentraciones se presenta en la figura 4.25. De acuerdo a lo observado en estos experimentos se estableció que la región de bajas concentraciones de surfactante SDS correspondería a valores menores o iguales a 0.1 *cmc*.

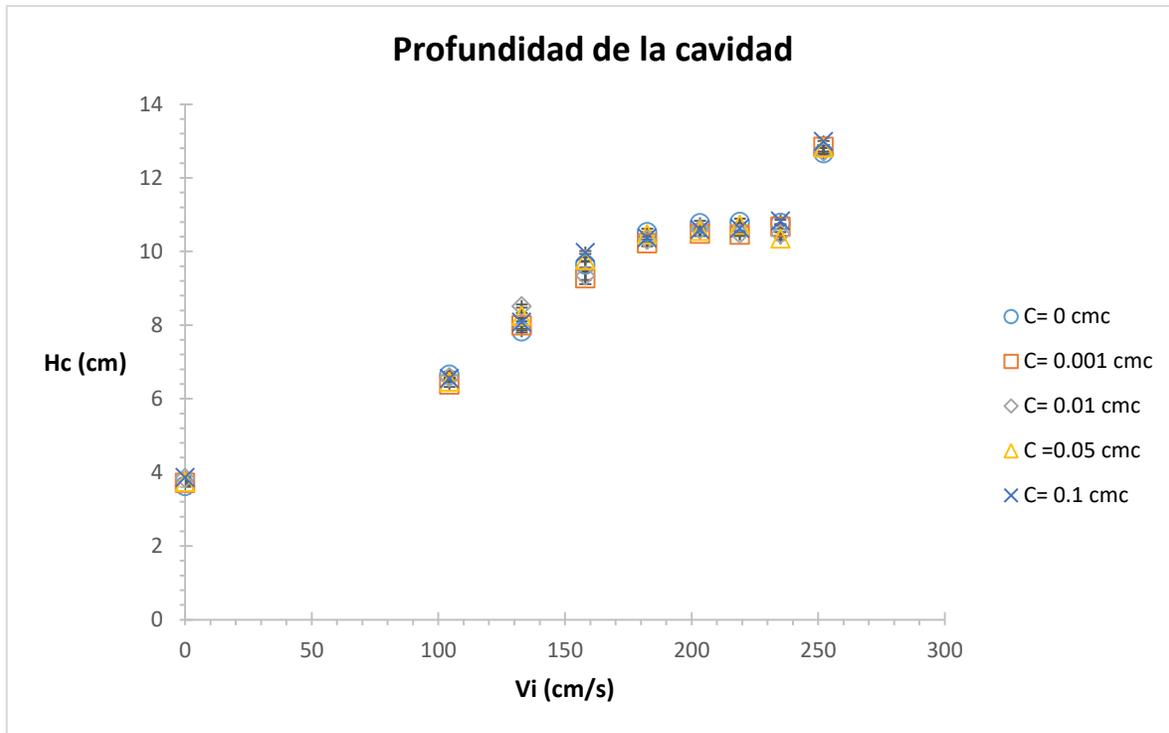


Figura 4.25 Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón diámetro de 1", para bajas concentraciones de surfactante en la solución acuosa.

En la gráfica de la figura 4.25 se observa que al aumentar la concentración de surfactante en la solución, hasta un valor de 0.1 *cmc* no se observan cambios significativos en la profundidad de la cavidad con los obtenidos para el caso de agua pura aumenta la profundidad de la cavidad en el rango de velocidades de impacto del disco empleadas en este estudio.

En la figura 4.26 se muestra la gráfica de la profundidad de la cavidad para el mismo rango de velocidades de impacto y mismo tamaño de disco, para altas concentraciones de surfactante en la solución.

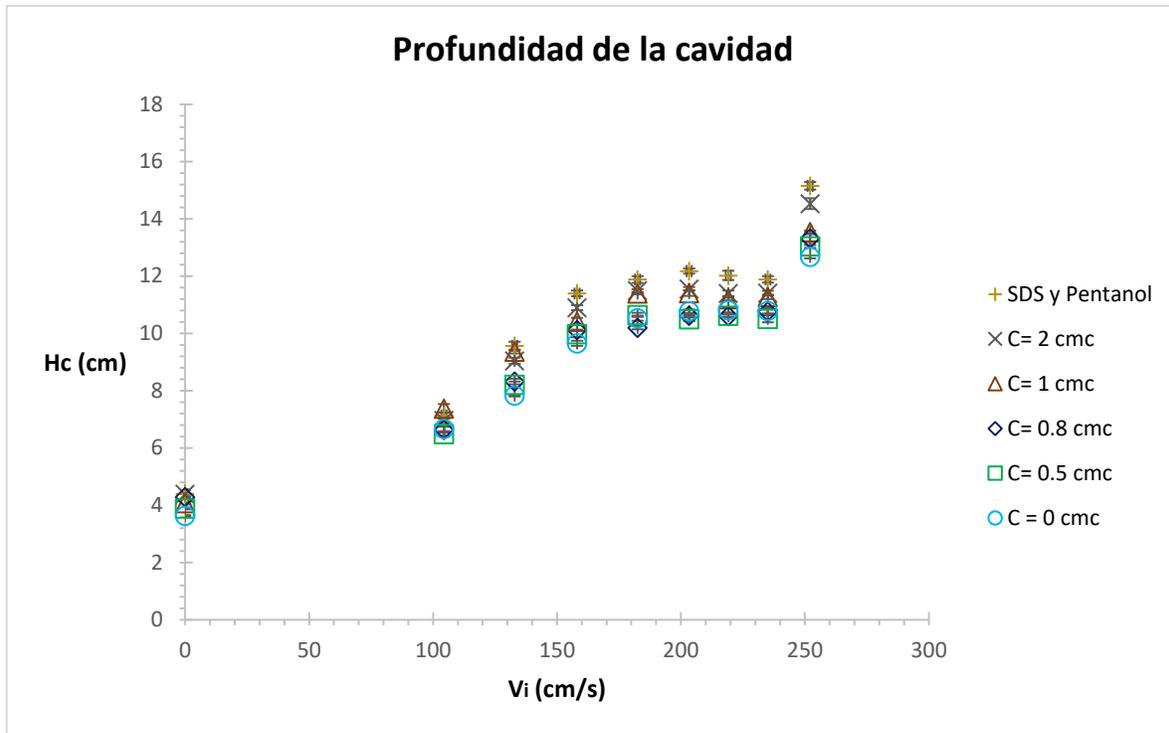


Figura 4.26 Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1'', para valores altos de concentración de surfactante en la solución acuosa.

De la figura 4.26 se puede observar que para valores altos de concentración de surfactante se logra apreciar un aumento en la profundidad de la cavidad, esto es debido a que la tensión superficial ha disminuido considerablemente y permite que la superficie libre del agua aumente su área interfacial, provocando que la profundidad de la cavidad aumente. Esto es más notorio para el caso de una concentración de 2 *cmc* y una velocidad de 250 *cm/s* donde la profundidad de la cavidad alcanza un valor de 14.53 *cm*, en comparación con el caso de agua destilada ($c = 0$ *cmc*) a una misma velocidad de impacto, en donde el valor alcanzado para la profundidad de la cavidad es de 12.67 *cm*. Para el caso de la solución SDS y pentanol se observa que la profundidad de la cavidad aumenta aún más al disminuir un poco más la tensión superficial con el uso del co-surfactante alcanzando un valor de 15.57 *cm* para la misma velocidad de 250 *cm/s*.

La profundidad de la cavidad en función de la velocidad de impacto del disco de teflón de 2'' para valores de concentración bajos es mostrada en la figura 4.27.

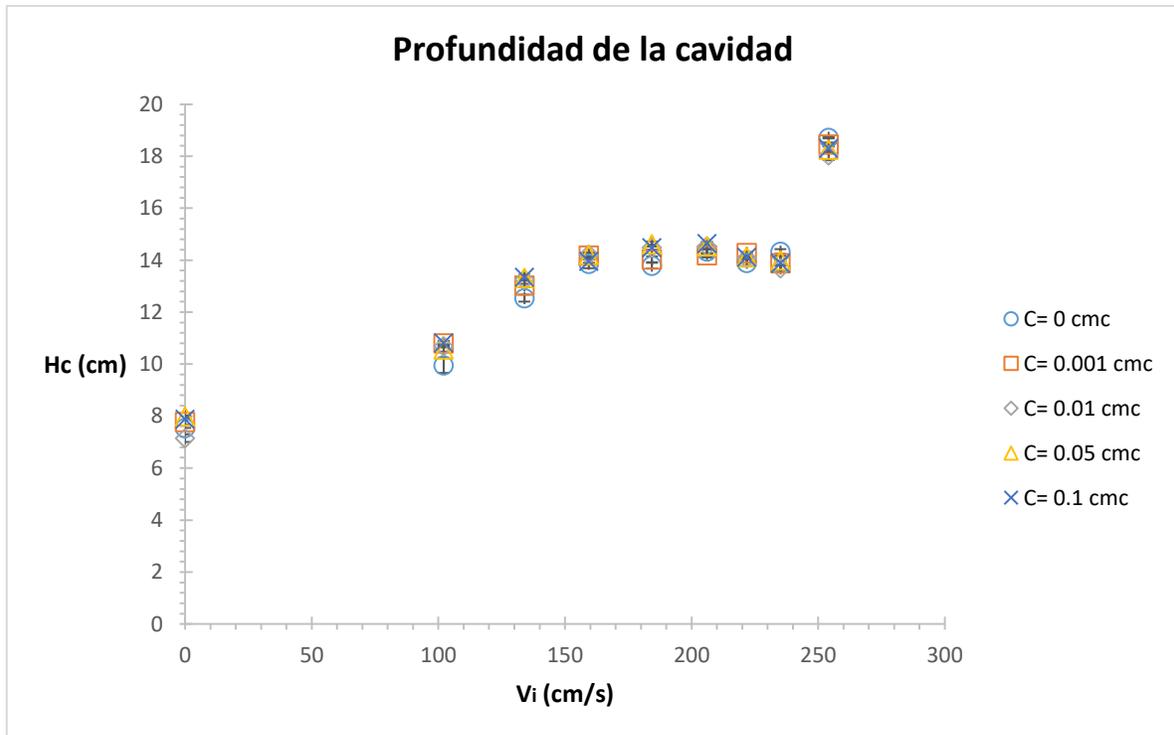


Figura 4.27. Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón con diámetro de 2'', para bajas concentraciones de surfactante en la solución acuosa.

En la figura 4.27 para un disco de teflón de diámetro de 2'', se observa que los valores obtenidos para la profundidad de la cavidad no difieren mucho de los obtenidos en agua pura cuando la concentración de surfactante en la solución acuosa es menor a 0.1 *cmc*.

La profundidad de la cavidad en función de la velocidad de impacto para el mismo disco de 2'' de diámetro, para concentraciones de surfactante con valores más altos y cercanos a 1 *cmc* se presenta en la figura 4.28.

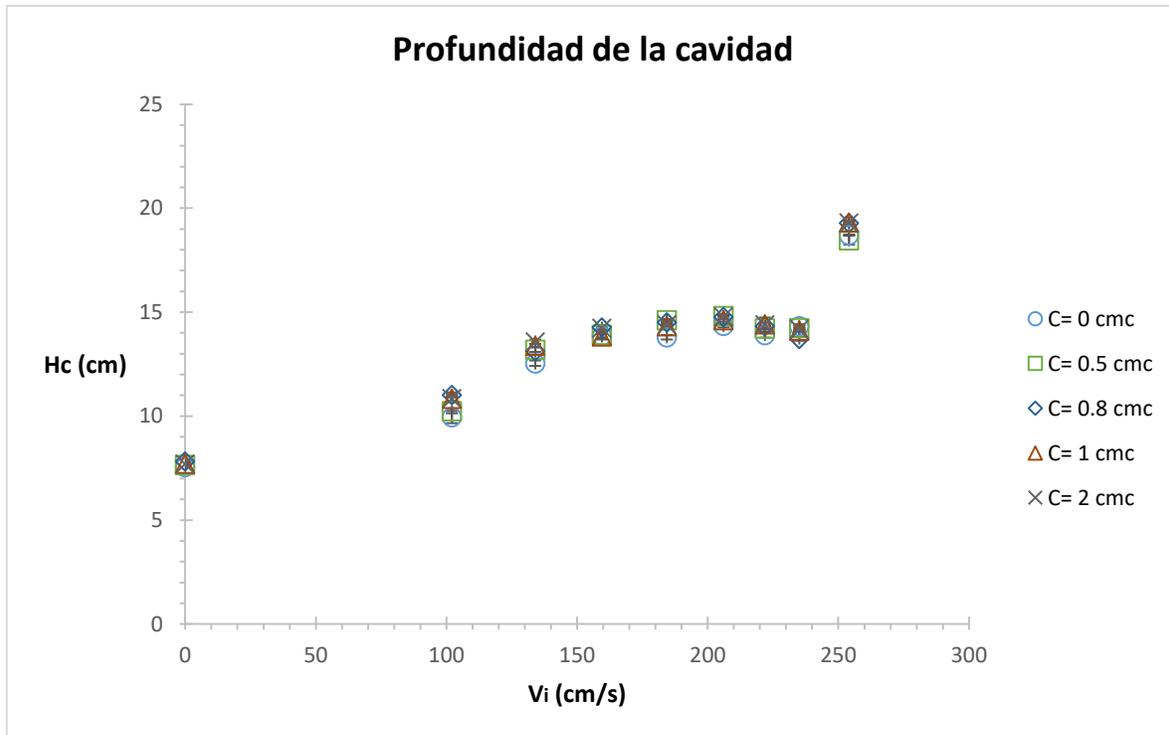


Figura 4.28. Gráfica de la profundidad de la cavidad (H_c) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón con diámetro de 2'', para altas concentraciones de surfactante en la solución acuosa.

En la figura 4.28 se ve un ligero crecimiento de la profundidad de la cavidad para los casos en que se empleó una solución con una concentración de 1 *cmc* y 2 *cmc*, los valores de concentración más altos empelados en este estudio. La profundidad de la cavidad aumenta cuando se tiene una disminución en la tensión superficial. En el caso del disco de 2'' las fuerzas inerciales dominan sobre las fuerzas de tensión superficial en la formación de la cavidad y no se observa un cambio apreciable en la profundidad de la cavidad cuando se disminuye la tensión superficial, a diferencia del caso del disco de diámetro de 1''.

4.2.4 EFECTO EN EL ÁNGULO DE LA CAVIDAD. AL VARIAR SU TENSIÓN SUPERFICIAL

El ángulo de la cavidad en función de la velocidad de impacto del disco de teflón de diámetro de 1'', para bajas concentraciones de surfactante en la solución es presentada en la figura 4.29.

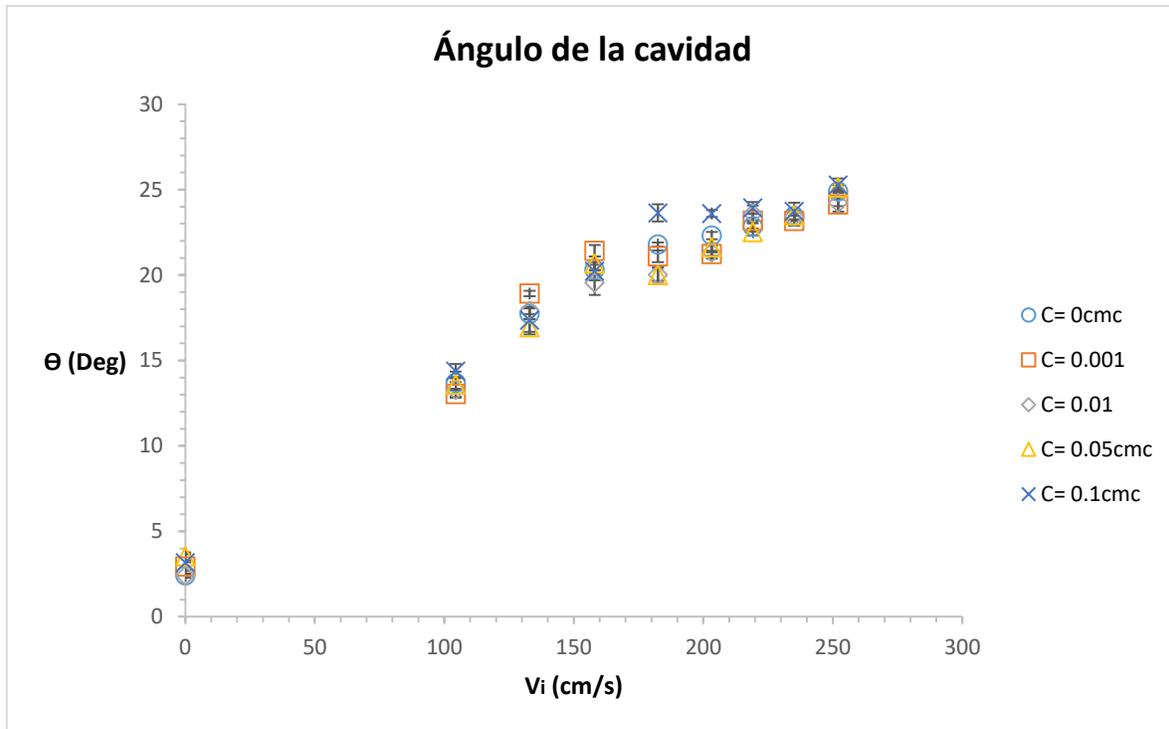


Figura 4.29 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores bajos de concentración de surfactante en la solución acuosa.

En la figura 4.29 se observa que valores bajos en la concentración de surfactante el ángulo de la cavidad, toma valores cercanos a los obtenidos en el caso de agua pura. En el caso de la concentración de 0.1 *cmc*, se logra apreciar que toma valores mayores en el ángulo de la cavidad con respecto al resto de las concentraciones graficadas, esto a partir de una velocidad de impacto de 180 *cm/s*, alcanzando una región estable para el valor del ángulo de la cavidad aun cuando la velocidad de impacto aumenta dentro de esta región.

La figura 4.30 muestra la gráfica del ángulo de la cavidad para el mismo tamaño de disco y mismo rango de velocidades, para concentraciones altas de surfactante en la solución acuosa.

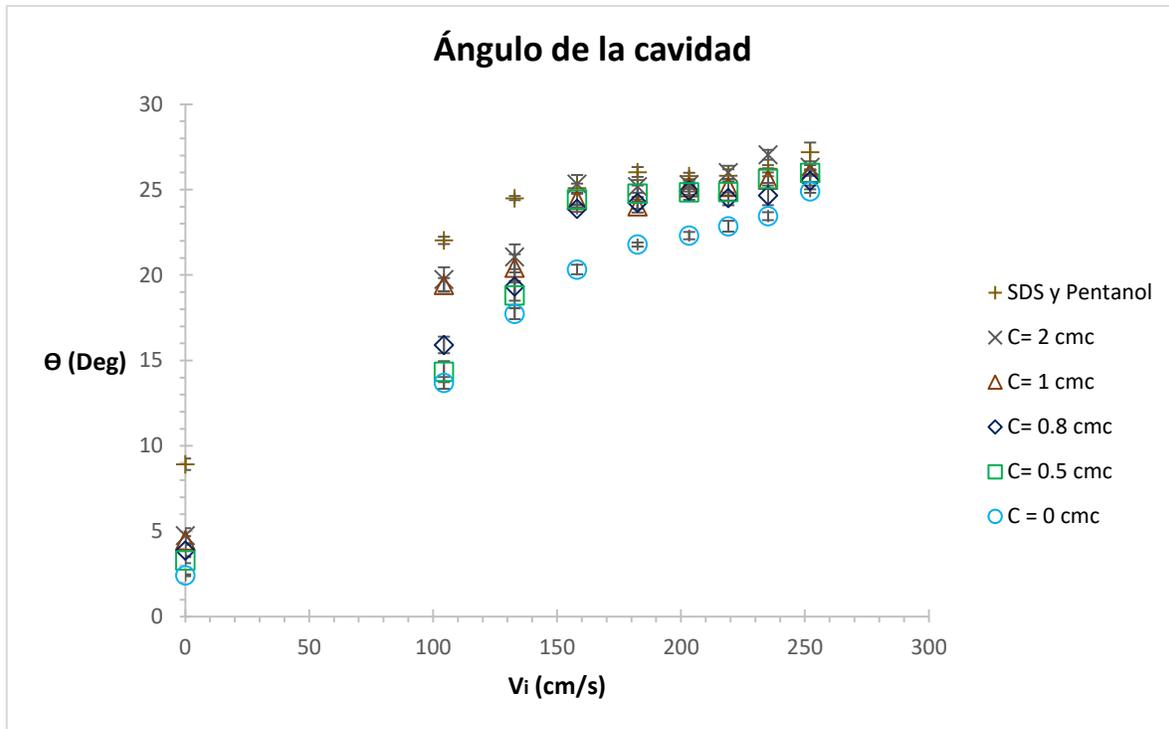


Figura 4.30 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores altos de concentración de surfactante en la solución acuosa.

En la figura 4.30 se observa para valores altos en la concentración de surfactante de la solución, el ángulo de la cavidad aumenta significativamente con respecto a los valores obtenidos para diferentes valores de la velocidad de impacto. La disminución en la tensión superficial permitió que el ángulo de la cavidad aumente y se logró observar en los experimentos que los extremos de la corona del splash se deforman aún más en la dirección horizontal, permitiendo con ello que la cavidad se abra más y se obtengan valores mayores en el ángulo de la cavidad. Se logra apreciar también que a partir de cierta velocidad de impacto en este caso a partir de 160 cm/s , el ángulo de la cavidad alcanza un valor estable, aun cuando se sigue aumentando la velocidad de impacto. Este comportamiento se observó a partir de concentraciones de 0.1 cmc de surfactante. En el caso de la solución con pentanol, se logra observar un aumento del ángulo de la cavidad mayor que en los casos de surfactante e incluso se ve que alcanza el valor de ángulo estable a una velocidad de impacto de 130 cm/s por una mayor reducción de la tensión superficial. Por lo tanto al disminuir la tensión superficial del agua, se logra aumentar la apertura de la cavidad dentro del rango de velocidades de impacto empleadas en el estudio.

El ángulo de la cavidad en función de la velocidad de impacto del disco de teflón de diámetro de 2", para bajas de concentraciones de surfactante en la solución se presenta en la figura 4.31.

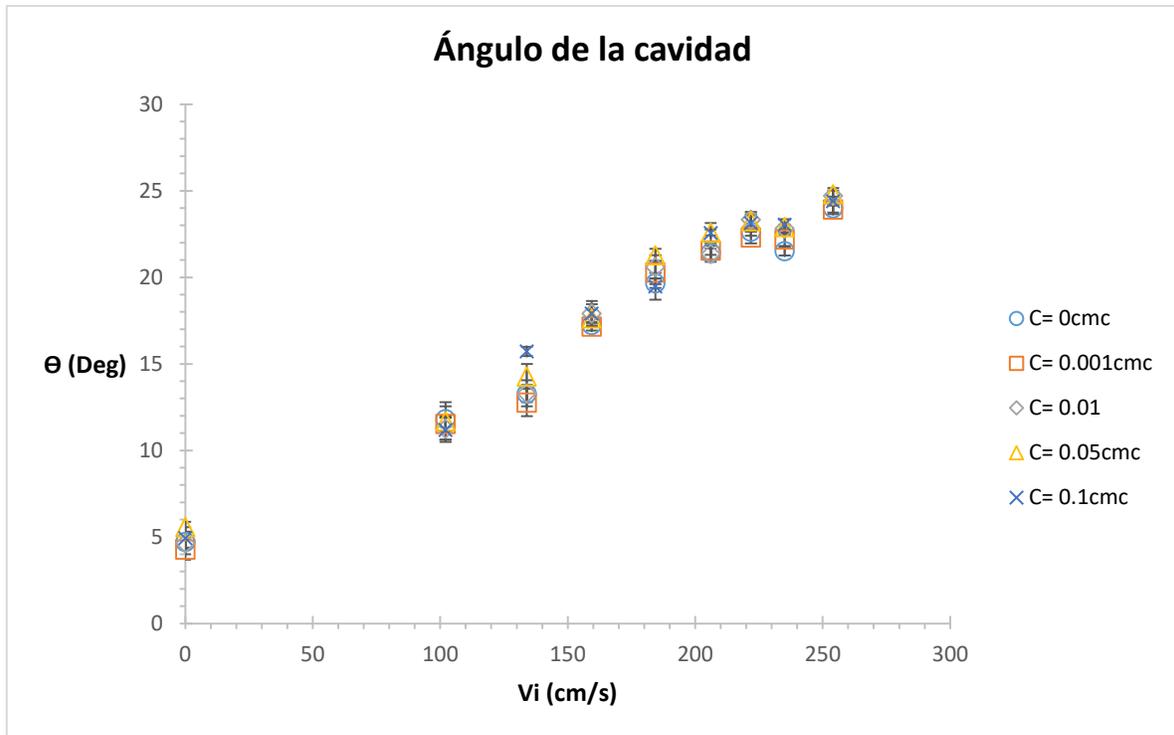


Figura 4.31 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2'', para valores bajos de concentración de surfactante en la solución.

En la figura 4.31 se puede observar que el ángulo de la cavidad no varía respecto al caso de agua pura al aumentar, la concentración de surfactante hasta un valor de 0.1 *cmc* de una solución acuosa con SDS, se obtienen valores muy similares del ángulo de la cavidad cuando la concentración de surfactante es baja en la solución.

En la figura 4.32 se muestran los resultados el ángulo de la cavidad en función de la velocidad de impacto para el disco de 2'', pero con valores altos de concentración de surfactante.

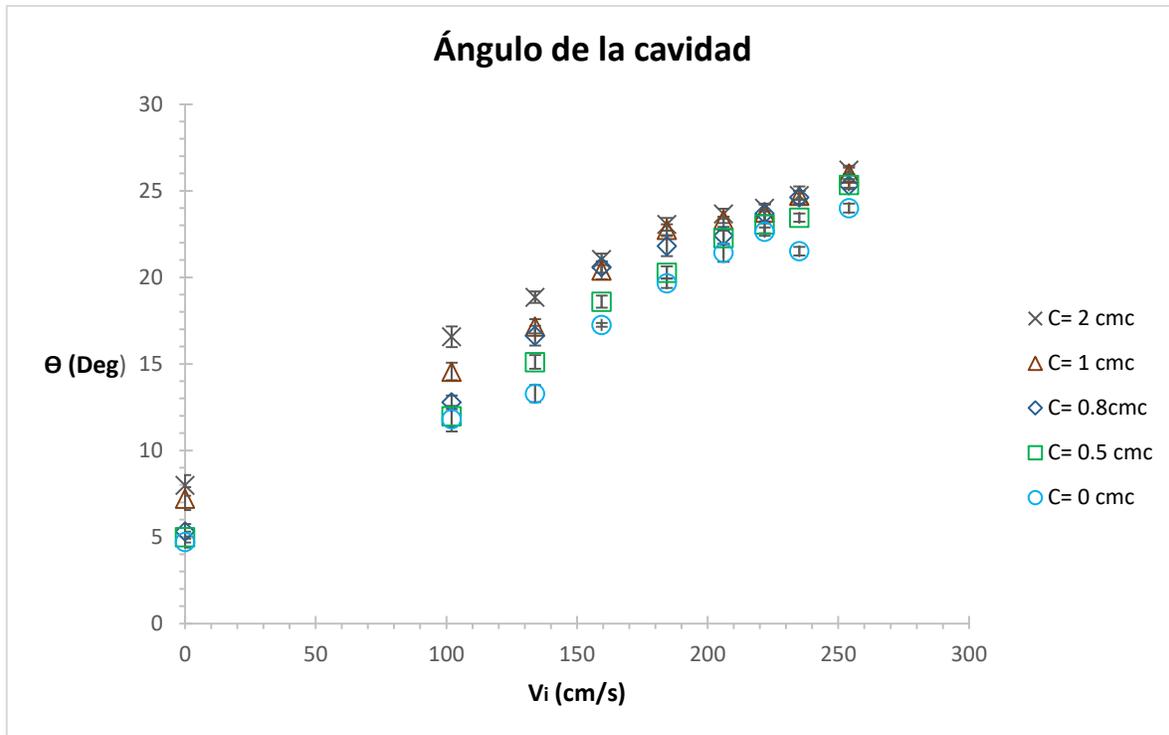


Figura 4.32 Gráfica del ángulo de la cavidad (Θ) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2'', para valores altos de concentración de surfactante en la solución.

En la figura 4.32 se puede observar que cuando se tienen valores grandes de concentración de surfactante, el ángulo de la cavidad aumenta de manera considerable; en comparación al caso de agua pura. Por ejemplo, para una velocidad de impacto de 130 cm/s en agua pura el ángulo alcanza un valor de 13.28° y para el caso de la solución con surfactante a 2 cmc el ángulo alcanza un valor de 18.85°. La disminución de tensión superficial del fluido por la alta concentración de surfactante en la solución permite que cuando se forma la corona por efecto del impacto, se extienda más la corona en una dirección horizontal y se alcancen ángulos de cavidad mayores. Se observa además en este caso, que para el disco de 2'', el ángulo de la cavidad no ha alcanzado un valor estable al aumentar la velocidad de impacto. Esto puede indicar que se necesita una velocidad de impacto mayor de las registradas aquí para que el ángulo de la cavidad varíe muy poco o quizás se requiera disminuir más el valor de tensión superficial del fluido.

Si se comparan los resultados obtenidos entre los dos tamaños de disco, en el caso del disco menor se obtiene una tasa de crecimiento mayor en el ángulo de la cavidad para concentraciones altas de surfactante, mientras que el disco de mayor tamaño su tasa de crecimiento es menor. Por ejemplo para el disco de 1'' de diámetro se alcanza un ángulo de cavidad de 25° a una velocidad de impacto de 150 cm/s para una concentración de surfactante de 2 cmc . Mientras que el disco de 2'' para alcanzar un ángulo de 25° requiere una velocidad de impacto de 250 cm/s para la misma concentración de surfactante.

4.2.5 EFECTO EN LA ALTURA DEL JET AL VARIAR SU TENSIÓN SUPERFICIAL.

La altura del jet en función de la velocidad de impacto del disco de teflón de diámetro de 1", para valores bajos de concentración de surfactante en la solución acuosa se muestra en la figura 4.33.

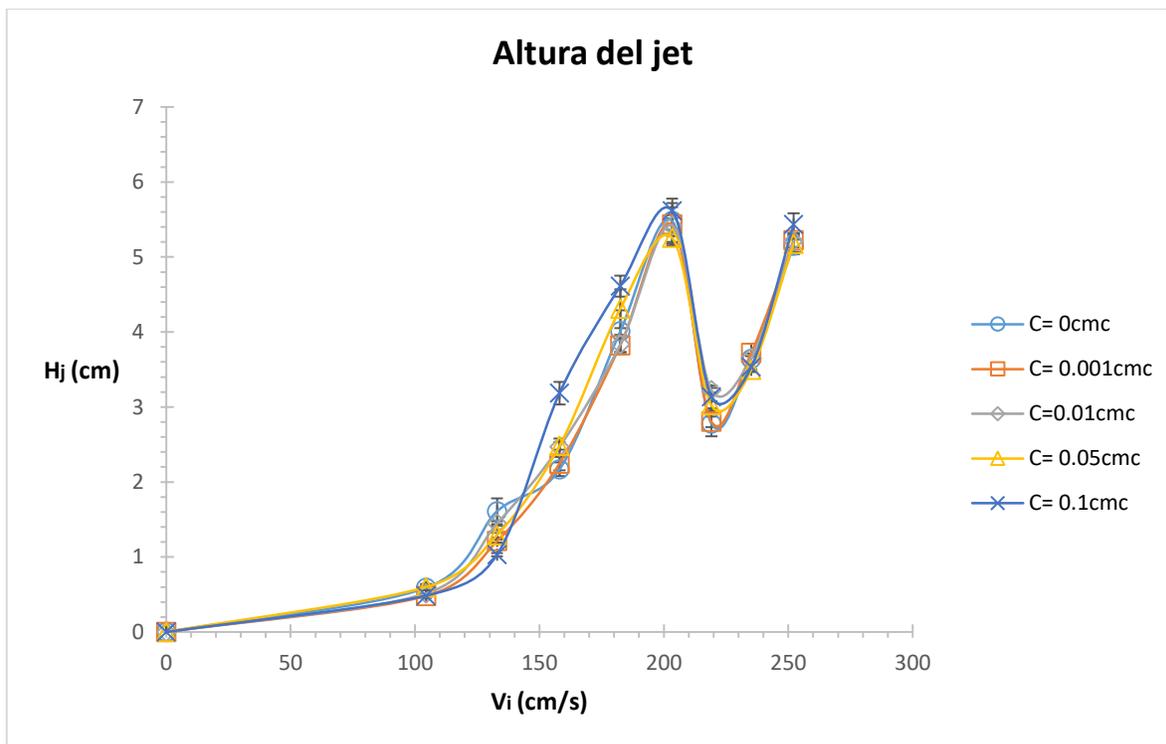


Figura 4.33 Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 1", para valores bajos de concentración de surfactante SDS en la solución acuosa.

En la figura 4.33 se puede apreciar que para bajas concentraciones de surfactante en la solución, no se observa una gran variación en la altura máxima del jet que se alcanza para un valor dado de la velocidad de impacto, con respecto a la altura del jet obtenido en agua pura. Cuando la concentración de surfactante es de 0.1 cmc comienza a observarse un incremento en la altura del jet, para velocidades de impacto de 150 cm/s en adelante.

En la figura 4.34 se muestra la gráfica de la altura del jet en función de la velocidad de impacto del mismo disco y rango de velocidades para valores altos de concentración de surfactante en la solución.

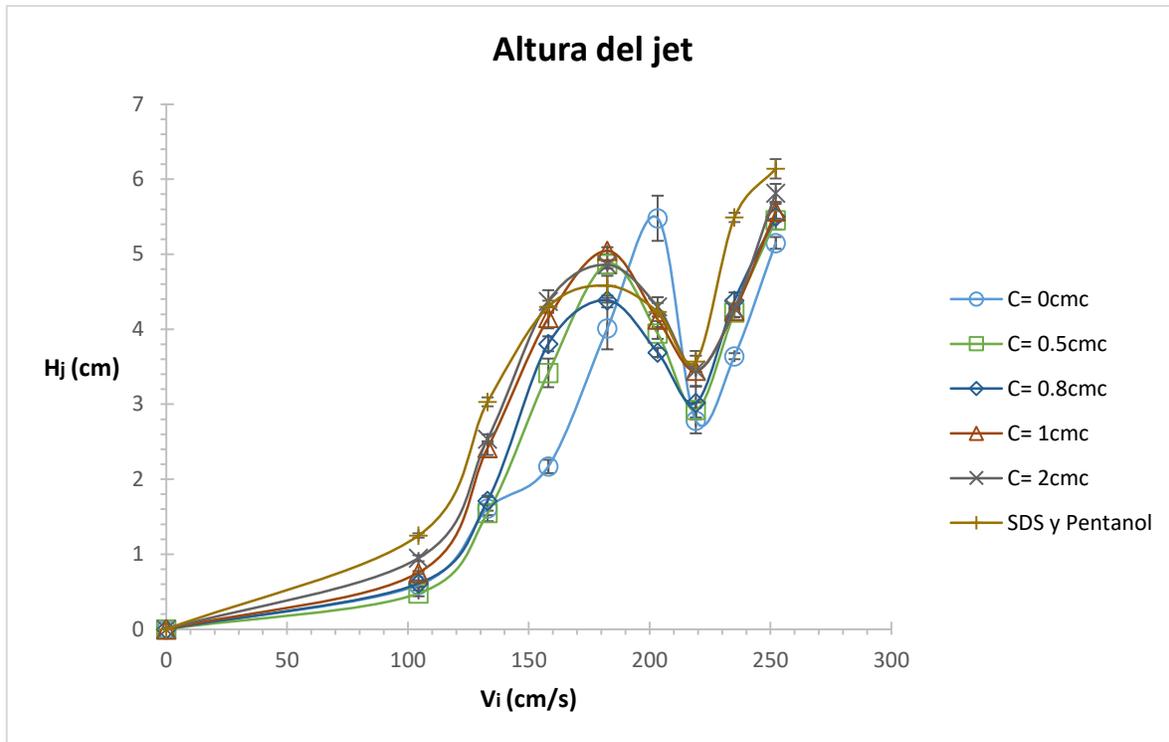


Figura 4.34 Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón con diámetro de 1", para valores altos de concentración de surfactante en la solución.

Se observa en la figura 4.34 un aumento de la altura del jet cuando se incrementa la concentración del surfactante en la solución, en comparación con el caso de agua pura, para la mayoría de valores de velocidad de impacto empleados. La disminución de la tensión superficial en el fluido permite que la interface pueda aumentar su área superficial, con menor energía transferida durante el impacto dando lugar a un aumento en la altura del jet. Se observan además varios cambios importantes en esta gráfica, por ejemplo aun cuando se sigue presentando el efecto de retroceso en las curvas, a partir de una concentración de 0.5 *cmc*, se observa que el máximo local en la altura del jet se recorrió a una velocidad de impacto de 180 *cm/s*, que es menor en comparación con el que se observó para el caso de agua pura sin surfactante ($c = 0 \text{ cmc}$), en donde el máximo local se presentó a una velocidad de impacto de 200 *cm/s*. Otro importante cambio es que la magnitud del retroceso disminuye cuando se aumenta la concentración de surfactante. Esto es en el caso de una concentración de surfactante de 2 *cmc* la magnitud del retroceso es de 1.43 *cm*, mientras que en el caso de agua pura es de 2.7 *cm*. Para el caso de la solución de SDS con pentanol la magnitud del retroceso disminuye aún más, tomando un valor de 1.07 *cm* en comparación con la solución de SDS a $c = 2 \text{ cmc}$. La reducción de tensión superficial en el fluido no sólo hace que aumente la altura del jet, además el efecto de retroceso, es decir la altura del jet en una solución con alta concentración, decae menos en comparación con el caso de agua pura, en donde el valor de la altura del jet en su máximo local es de 5.48 *cm* y decae a un mínimo local de 2.78 *cm* al aumentar la velocidad de impacto.

La altura del jet en función de la velocidad de impacto del disco de diámetro de 2'' para el caso de bajas concentraciones de surfactante se presenta en la figura 4.35.

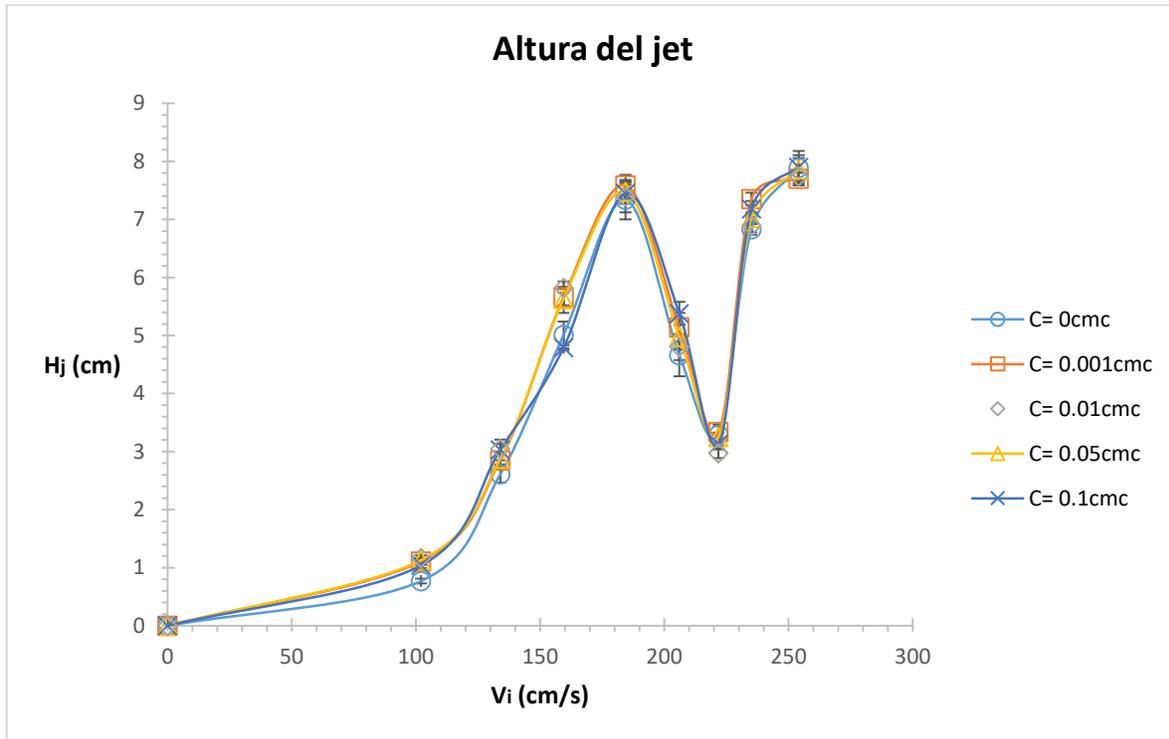


Figura 4.35 Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2'', para valores bajos de concentración de surfactante en la solución.

De la figura 4.35 se observa que para valores de la concentración de surfactante relativamente bajos en este caso menores o iguales a 0.1 cmc no se observa una gran variación de la altura del jet, con respecto al obtenido en agua pura para los diferentes valores de velocidades de impacto empleando un disco de diámetro de 2''.

En la figura 4.36 se gráfica la altura del jet para el mismo rango de velocidades y tamaño de disco de 2'' sólo que empleando valores de concentración de surfactante en la solución más altos, en el intervalo de 0.5 a 2 cmc .

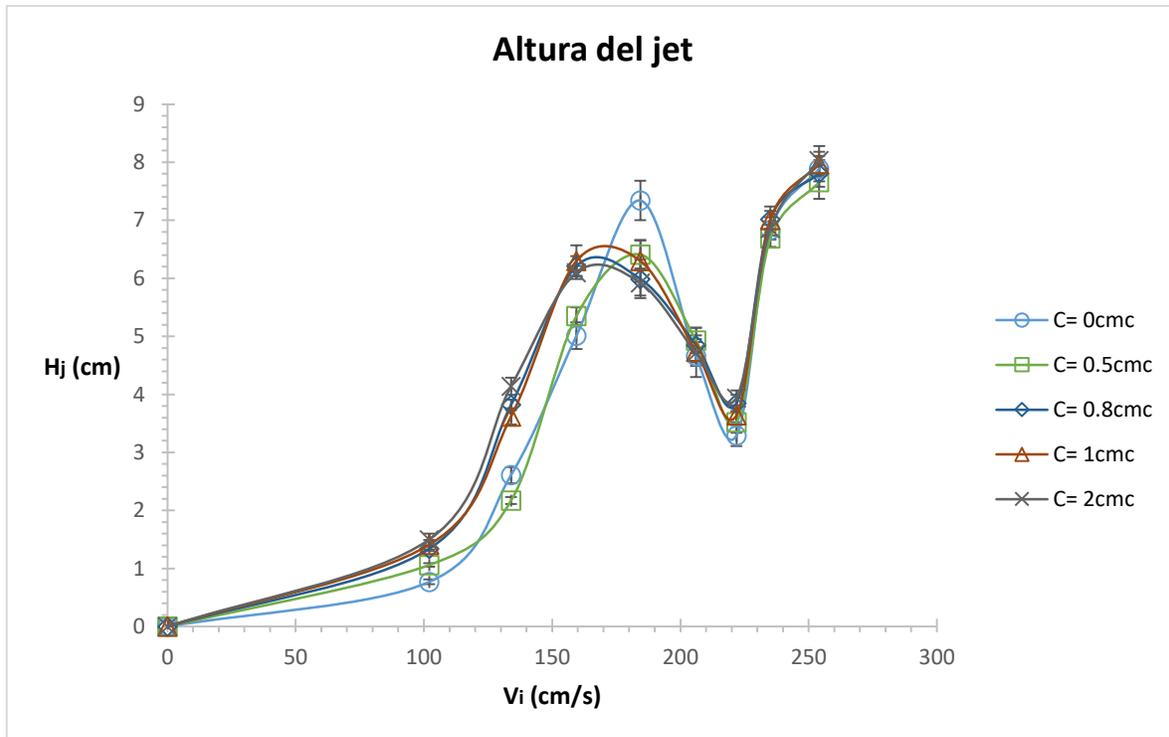


Figura 4.36. Gráfica de la altura del jet (H_j) en función de la velocidad de impacto (V_i) del disco de teflón de diámetro de 2'', para valores altos de concentración de surfactante en la solución.

De la figura 4.36 se puede observar que la altura del jet sigue una tendencia muy similar al caso donde el diámetro del disco es de 1''. Esto es, que en general la altura del jet aumenta al incrementar la concentración de surfactante en la solución, disminuyendo con ello su tensión superficial, lo que permite que el jet se estire un poco más al poder incrementar su área superficial. El máximo local obtenido para la altura del jet se presentó aproximadamente a una velocidad de 160 cm/s , siendo una velocidad menor que cuando el fluido es agua pura, en cuyo caso se obtuvo un máximo local en la altura del jet a una velocidad de impacto de 180 cm/s , para el disco de 2'' de diámetro. Además la magnitud del retroceso disminuye al aumentar la concentración de surfactante, ya que para el caso de agua pura la magnitud del retroceso observado fue de 4.05 cm , mientras que para una solución de 2 cmc la magnitud del retroceso 2 cm . En este caso la magnitud del retroceso disminuyó a la mitad cuando se empleó una solución de surfactante SDS con una concentración alta de 2 cmc y empleando un disco de 2'' de diámetro.

Se puede ver que la causa de este fenómeno de retroceso en la altura del jet es la tensión superficial, ya que a medida que se disminuye la tensión superficial presente en el fluido, el retroceso se sigue observando pero disminuye en su magnitud al aumentar la concentración de surfactante. En el rango de valores de concentración de surfactante SDS empleado en este trabajo se logró disminuir la tensión superficial del agua hasta un valor de 38.62 mN/m y con co-surfactante hasta un valor de 28.36 mN/m para una concentración en la solución de 2 cmc .

4.2.6 ANÁLISIS ADIMENSIONAL PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE.

Aquí se presentan resultados del análisis adimensional solo para el disco de teflón de diámetro de 1" debido a que los resultados del disco de 2" son muy similares, también solo se presentan los resultados para altas concentraciones ya que es donde se ven cambios apreciables en las formaciones del splash.

En la figura 4.37 se muestra la profundidad de la cavidad adimensional en función de la concentración de surfactante de la solución acuosa, para dos valores de velocidad de impacto empleando el disco de teflón de 1" de diámetro.

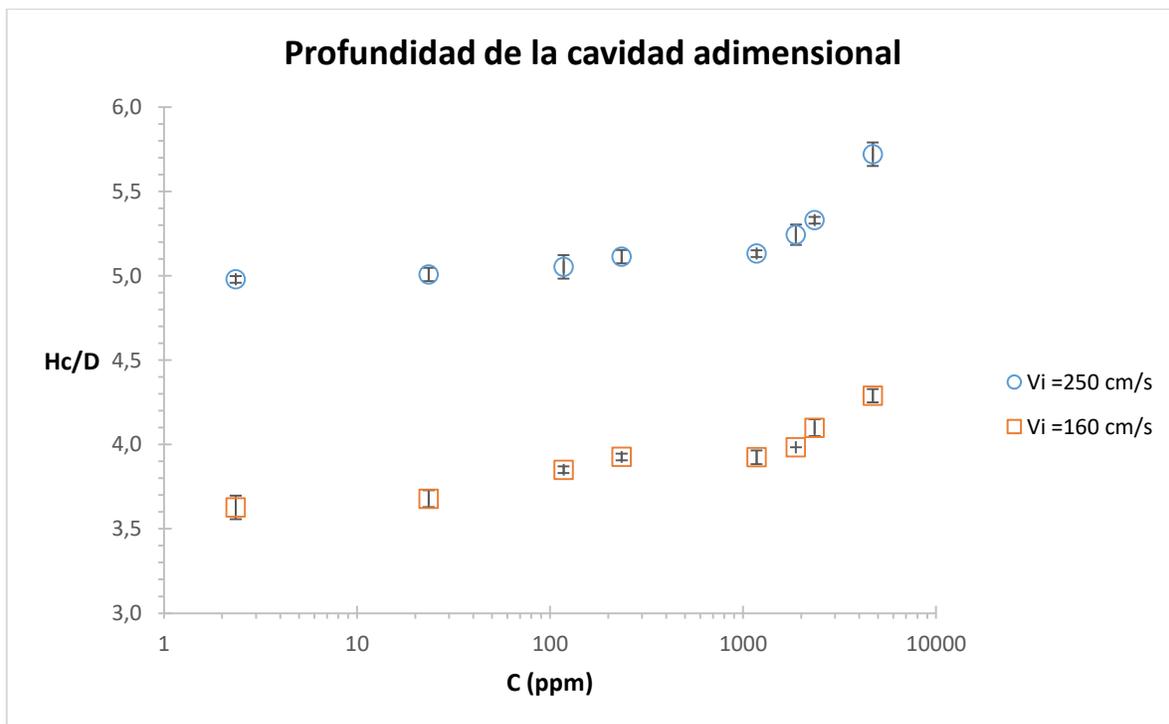


Figura 4.37 Gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función de la concentración (C) ppm de surfactante, para valores de velocidad de impacto de 160 y 250 cm/s empleando un disco de teflón de 1" de diámetro.

De la figura 4.37 se observa primero que la profundidad de la cavidad adimensional escalada con respecto al diámetro del disco, es mayor para la velocidad de impacto de 250 cm/s y toma un valor de 5, mientras que para la velocidad de impacto de 160 cm/s , inicia con un valor de 3.6. A concentraciones de surfactante de valores entre (2-1000) ppm la profundidad de la cavidad no aumenta se mantiene a un valor fijo para ambas velocidades de impacto del disco. Cuando la concentración de surfactante se aumenta a más de 1000 ppm la profundidad de la cavidad comienza a aumentar, esto es debido a la disminución de tensión superficial en la solución por una alta concentración de surfactante, la superficie líquida puede aumentar su área superficial cuando la tensión superficial disminuye aumentando así la profundidad de la cavidad. En el caso de la velocidad de impacto de 160 cm/s cuando la

concentración del surfactante se aumenta a 4700 ppm la profundidad de la cavidad adimensional se incrementa en un valor de 0.6, mientras que para la velocidad de impacto de 250 cm/s, al aumentar la concentración hasta el mismo valor se incrementa la profundidad de la cavidad adimensional en 0.72.

En la figura 4.38 se muestra la altura del jet adimensional escalada, con el diámetro D del disco en función de la concentración de surfactante en la solución, para dos valores de velocidad de impacto para el disco de teflón de diámetro de 1".

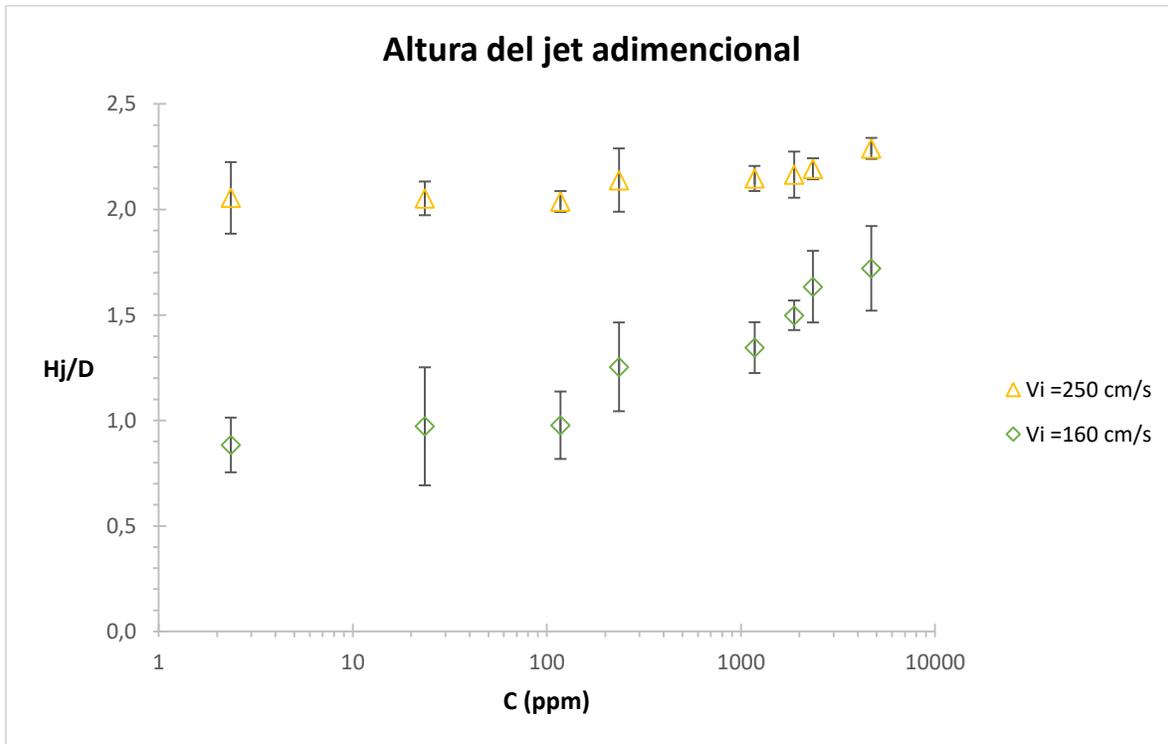


Figura 4.38 Gráfica de la altura del jet adimensional (H_j/D) en función de la concentración (C) ppm de surfactante de la solución, para valores de velocidad de impacto de 160 y 250 cm/s empleando un disco de teflón de diámetro de 1".

De la figura 4.38 se observa primeramente que para el caso de velocidad de impacto de 250 cm/s, se tiene una mayor altura del jet adimensional con un valor de 2, en comparación con el caso de velocidad de impacto de 160 cm/s con un valor de 0.9. A diferencia de la profundidad de la cavidad adimensional, en esta gráfica de la altura del jet adimensional se observa que a concentraciones de surfactante menores a 100 ppm, la altura del jet varía muy poco, pero a valores de concentración mayores que 100 ppm se logra apreciar que la altura del jet aumenta, de hecho lo hace a partir de concentraciones menores que lo observado en la profundidad de la cavidad adimensional. Esto indica que la altura del jet es más sensible a cambios en la concentración de surfactante al disminuir la tensión superficial. Para el caso de velocidad de impacto de 160 cm/s, al aumentar la concentración a un valor de 4700 ppm se obtiene un incremento en la altura del jet adimensional en 0.84, mientras que para la

velocidad de impacto de 250 *cm/s* a la misma concentración de la solución la altura del jet adimensional se incrementa en 0.26.

En la figura 4.39 se muestra la gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional contra el número de Froude para diferentes números de Bond.

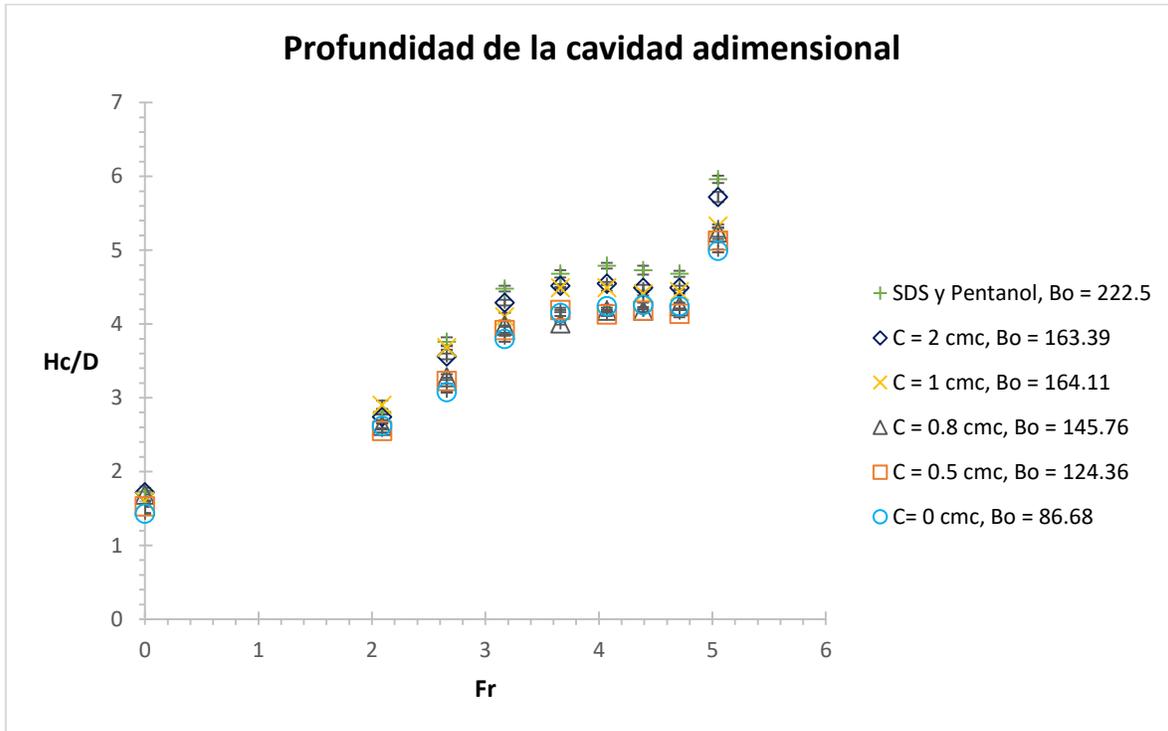


Figura 4.39 Gráfica de la profundidad adimensional en función del número de Froude para diferentes números de bond de un disco de teflón de diámetro de 1”.

De la figura 4.39 se observa que una tendencia de aumento en la profundidad de la cavidad adimensional cuando se aumenta el número de Froude ocasionado por la velocidad de impacto y un aumento de la profundidad de la cavidad para mayores números de Bond en especial para la solución de SDS con pentanol donde la tensión superficial del agua se ha disminuido bastante.

En la figura 4.40 se muestra el ángulo de la cavidad en función del número de Froude para diferentes números de Bond.

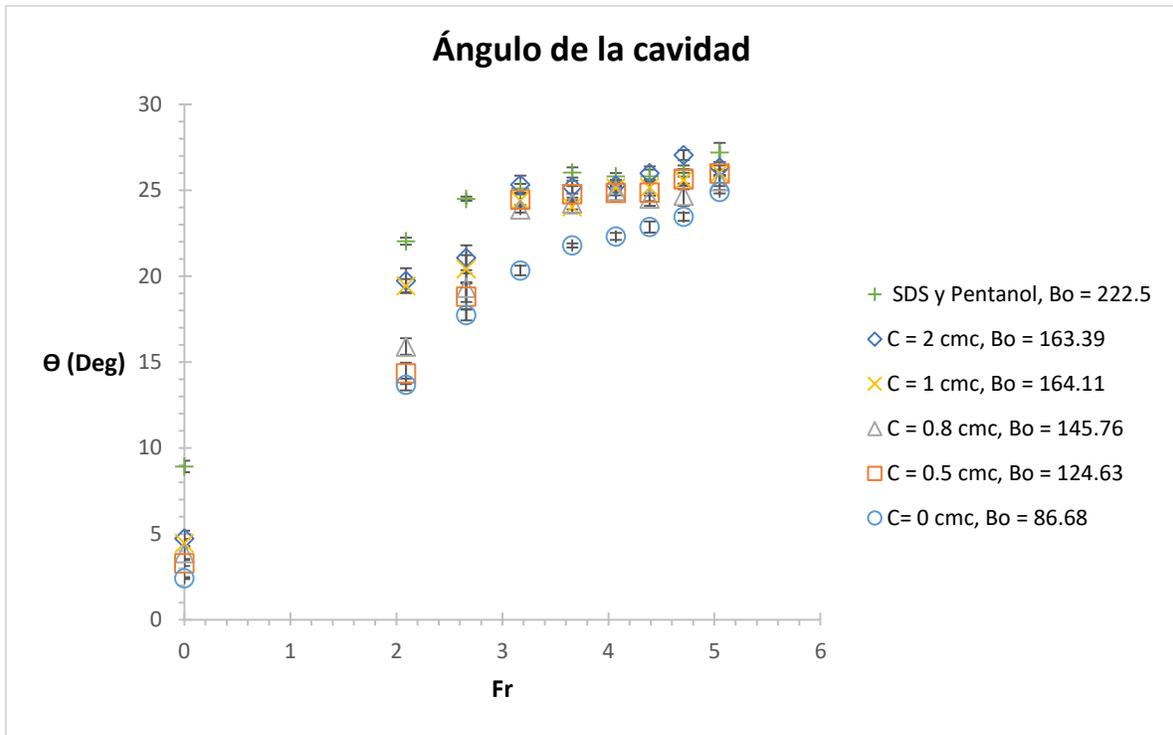


Figura 4.40 Gráfica del ángulo de la cavidad en función del número de Froude para diferentes números de Bond de un disco de teflón de diámetro de 1”.

En la figura 4.40 se puede ver que el ángulo de la cavidad aumenta cuando el número de Froude se incrementa, pero para números de Froude mayores que 88.68, el ángulo de la cavidad alcanza un valor fijo de 26° y a medida que el número de Bond se incrementa este ángulo fijo, se alcanza a un número de Froude menor. Esto indica que al disminuir la tensión superficial del agua, permite que para velocidades de impacto del disco cada vez menores se tengan ángulos de la cavidad mayores, en especial en casos donde la fuerza gravitacional domina en lugar de la fuerza inercial que es el caso de números de Froude bajos.

En la figura 4.41 se muestra la altura del jet adimensional contra el número de Froude, para diferentes números de Bond.

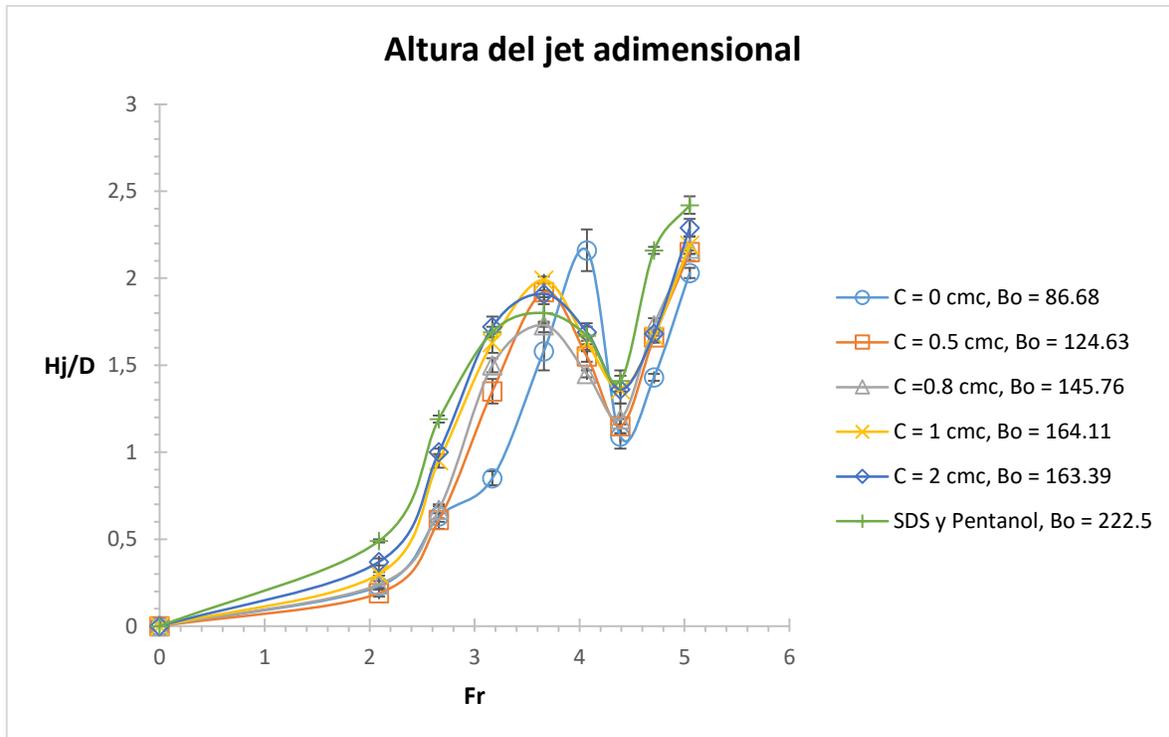


Figura. 4.41 Gráfica de la altura del jet adimensional en función del número de Froude, para diferentes números de Bond de un disco de impacto de teflón de diámetro de 1”.

En la figura 4.41 se puede observar una disminución del efecto de retroceso a medida que el número de Bond se aumenta, en comparación del caso de agua pura con un valor del número de bond de 86.68. En relación con el caso de la solución de SDS y pentanol con un número de bond de 222.5, se puede ver que la amplitud del retroceso es muy pequeña, su altura de jet adimensional disminuye de 1.8 a 1.4, se ha reducido bastante debido a una disminución de la tensión superficial. Se observa que la tensión superficial desempeña un papel muy importante en el efecto de retroceso en la altura del jet ya que al disminuir esta fuerza el jet se desarrolla más, no se decae tanto en altura como en el caso del agua.

4.3 RESULTADOS NUMÉRICOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS EN DUALSPHYISCS DEL SPLASH EN 2D.

4.3.1 COMPARACIÓN DE LAS DEFORMACIONES SUPERFICIALES OBTENIDAS EN LOS EXPERIMENTOS CON LAS OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN.

En la figura 4.42 se muestran imágenes de cada una de las formaciones del splash en el lado izquierdo se encuentran imágenes en físico y en el lado derecho imágenes de las simulaciones, de esta figura se observa que la simulación está reproduciendo cada una de las

formaciones de manera muy similar al caso real esto demuestra que el código DualSPHysics simula muy bien la deformación una superficie libre por impacto de un objeto sólido.

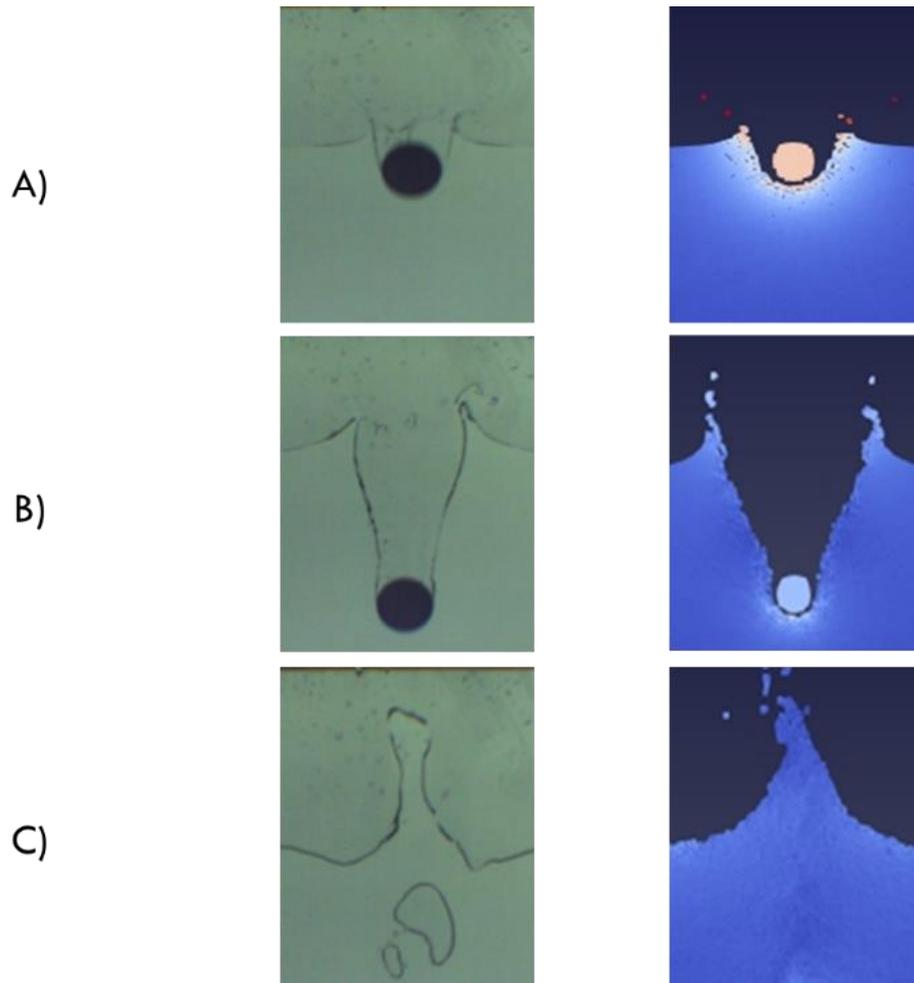


Figura 4.42 Etapas del splash en el experimento de laboratorio lado izquierdo y en la simulación realizada en DualSPHysics lado derecho. A) Formación de corona del splash.

B) Formación de la cavidad de aire. C) Formación del jet líquido.

4.3.2 RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO DEL DISCO EN LA SIMULACIÓN.

En la tabla 4.3 se muestra la velocidad de impacto del experimento y el nivel correspondiente en la simulación para reproducir una velocidad de impacto similar a los experimentos. Se observa de la tabla 4.3 hay una pequeña diferencia en las velocidades, esto se debe a que tanto en los experimentos de laboratorio y en las simulaciones se tienen ciertos errores, aun con esta diferencia se ve que las velocidades de los casos numéricos es muy cercana a los casos de los experimentos, es una muy buena aproximación.

Tabla 4.3 Comparación de velocidades de impacto experimental y numérico y nivel de líquido requerido para producir en la simulación la velocidad de impacto.

Velocidad de impacto Experimental (<i>cm/s</i>)	Nivel de líquido numérico (<i>cm</i>)	Velocidad de impacto numérica (<i>cm/s</i>)
248.15	20	250.07
234.62	23.34	235.38
215.43	27.48	220.68
199.7	30.88	193.28
181.62	34.78	181.45
153.69	40.81	147.14
127.99	43.58	127.52
103.42	46.36	107.2
0	52.73	0

4.3.3 RESULTADOS DE LA RESOLUCIÓN EN LA DISTANCIA ENTRE PARTÍCULAS

En la tabla 4.4 se muestran los resultados de la altura del jet para el caso del disco de diámetro de 1" que impacta con una velocidad de 250 *cm/s*, de los diferentes tamaños de partícula utilizados para encontrar resolución representativa del fenómeno de estudio. Se nota que para una resolución de partícula alta (0.0005 *m*), la altura del jet alcanza una altura de 12 *cm* la cual se aleja bastante del valor experimental; mientras que para una resolución de partícula baja (0.003 *m*) se acerca suficiente al valor real, Sin embargo ese tamaño de partícula puede no representar de manera adecuada el fluido como tal, entre más grande el tamaño de partículas menor es el número de partículas que puede estadísticamente representar al fluido, por tanto se determinó que la resolución de partícula para las simulaciones es la de 0.002 *m* la cual da resultados un poco más precisos de acuerdo a la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Casos de simulaciones realizadas con diferentes resoluciones y su respectiva altura del jet obtenida.

Casos	Resolución (<i>m</i>)	Altura del Jet (<i>cm</i>)
1	0.0005	12
2	0.001	8.26
3	0.002	5.66
4	0.003	5.76

4.3.4 RESULTADOS DE LA PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD Y LA ALTURA DEL JET EN LAS SIMULACIONES

La figura 4.43 se grafica la profundidad de la cavidad en función de la velocidad de impacto para un disco de teflón de un diámetro $D = 1$ " , para el caso experimental y el caso numérico.

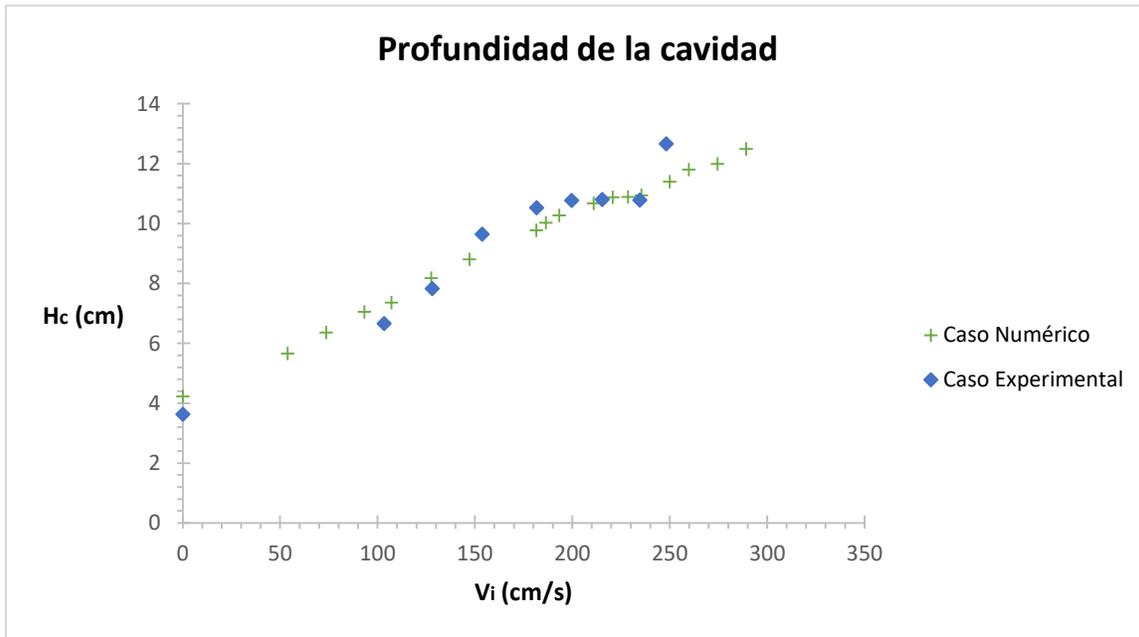


Figura 4.43 Profundidad de la cavidad (H_c) contra la velocidad de impacto (V_i) para el disco de teflón de 1" de diámetro tanto caso experimental y numérico.

Se observa de la figura 4.43 que la simulación numérica por DualSPHysics predice muy bien los valores de la profundidad de la cavidad de los experimentos, aunque con pequeñas diferencias. Se puede observar que en el caso experimental en intervalo de velocidades de (180-230 cm/s) la profundidad de la cavidad se mantiene a un valor de 10.8 cm , esto se debe a que en ese intervalo parte de la energía en el momento del impacto es absorbida en la formación y crecimiento de la corona del splash y la energía restante para formar la cavidad de aire no es la suficiente para causar un aumento en la profundidad de la cavidad. Esto no sucede en el caso numérico donde la profundidad de la cavidad tiene un comportamiento lineal y en ese intervalo de velocidad aumenta. Esto pudiera deberse a que en el código DualSphysics no se considera el efecto de las fuerzas de cohesión en el fluido, lo que ocasiona que en el momento del impacto del disco parte de la energía del mismo no se absorba por ausencia de estas fuerzas y este al momento de formar la cavidad posee más energía para aumentar la profundidad de la cavidad. Pese a una diferencia que alcanza un valor máximo de 10% entre los casos de velocidad de 250 cm/s , el caso numérico se acerca bastante al caso real.

Del caso numérico de la figura 4.43 se puede analizar en un rango de velocidades más amplio que en el caso experimental, a medida que se aumenta la velocidad de impacto para

el caso numérico, la profundidad de la cavidad sigue aumentando, alcanzándose un valor máximo de 12.5 cm para un valor de velocidad de impacto de 289.29 cm/s , mientras que para valores de velocidad menores de 100 cm/s se tienen valores de profundidad de la cavidad del orden de 6 cm , siguiendo un comportamiento lineal.

En la figura 4.44 se muestra la altura del jet en función de la velocidad de impacto para mismo diámetro del disco de teflón $D = 1''$, para ambos casos experimental y numérico.

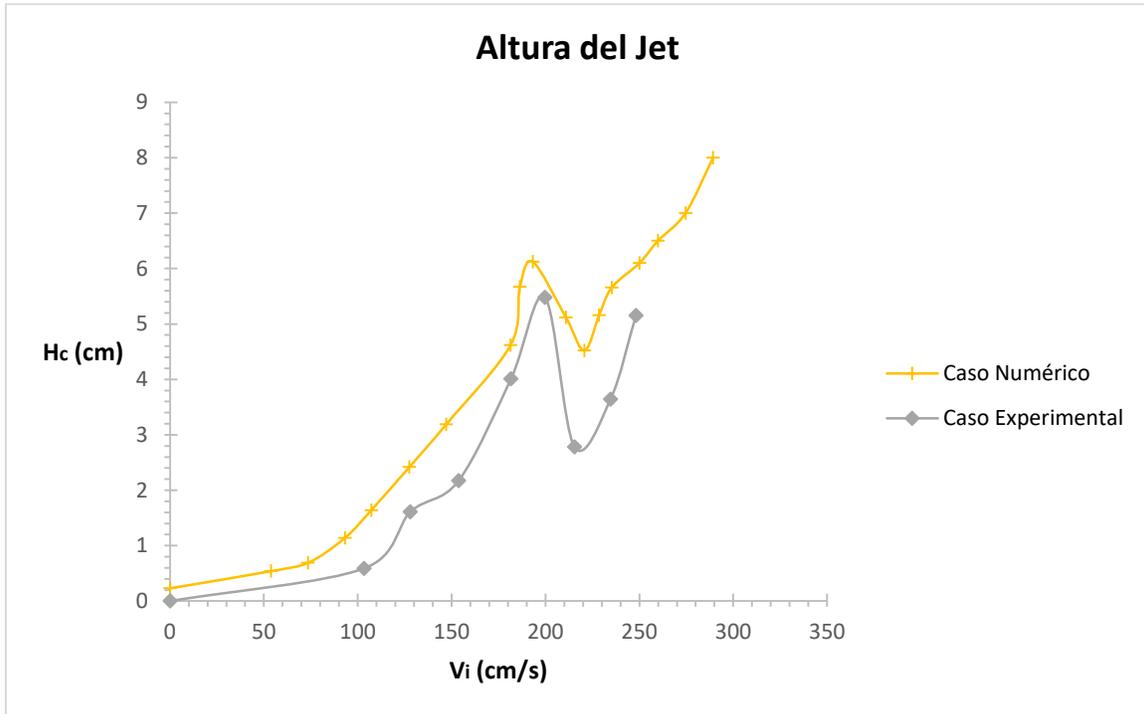


Figura 4.44 Altura del jet (H_j) contra velocidad de impacto (V_i) para disco de teflón de diámetro de $1''$ para casos experimental y numérico.

En la figura 4.44 se nota como el caso numérico sigue una tendencia muy similar al comportamiento del caso experimental, aparece también un efecto de retroceso aunque disminuido significativamente. A diferencia de la profundidad de la cavidad, en la altura del jet se presenta un error numérico mayor, la altura del jet es aproximadamente 1 cm mayor en el caso numérico que en el experimental, tal diferencia se debe a que en el código de DualSPHysics no se consideró emplear un modelo de dos fases (agua-aire) para simular la tensión superficial, sin esta fuerza limitante presente en la superficie del fluido las partículas fluidas salen dispersas más allá y por tanto el jet es mayor en la simulación que en los experimentos, además cerca de la superficie la kernel de suavizado no tiene un soporte total lo que introduce cierto error numérico en la simulación. Esta diferencia de 1 cm presente en la mayoría de los puntos de la curva del caso numérico viene siendo un 20% de error, lo cual es aceptable en un modelo SPH, de modo que DualSPHysics predice de un comportamiento de la altura del jet acertada.

Del caso numérico de la figura 4.44 permite analizar el comportamiento de la altura del jet aun rango de velocidades más amplio que en el caso experimental no se pudo alcanzar por limitaciones del sistema experimental. Se puede verificar que al aumentar la velocidad de impacto un valor mayor de 250.07 cm/s la altura del jet sigue creciendo, no se vuelve a presentar otro retroceso. En la figura 4.36 pareciese que el jet comenzara a alcanzar una altura máxima local a una velocidad de 250.07 cm/s pero al ampliar la región de velocidades se corrobora que la altura aumenta, alcanzando un valor máximo de 8 cm para una velocidad de 289.29 cm/s , mientras que para velocidades menores de 100 cm/s , el jet aumenta en altura lentamente a medida que la velocidad de impacto aumenta.

Adicionalmente se realizaron 9 simulaciones para un disco de teflón de diámetro $D = 1/2$ " y otro de diámetro $D = 2$ ", variando la velocidad de impacto de los discos con valores similares al disco de 1". En la tabla 4.5 se muestra la velocidad de impacto la profundidad de la cavidad y la altura del jet de los discos de $1/2$ ", 1" y 2".

Tabla 4.5 Valores numéricos de la profundidad de la cavidad y de la altura del jet para los discos de $1/2$ ", 1" y 2" en diferentes velocidades de impacto.

Vel. Imp. (cm/s)	$1/2$ "	1"	2"	$1/2$ " 1" 2"		
	Profundidad de la cavidad (cm)			Altura del Jet (cm)		
250.07	8	11.4	22	4.4	6.1	13
235.38	7.64	10.94	21.34	4.16	5.66	12.66
220.68	7.48	10.88	20.28	3.52	4.52	11.52
193.28	6.28	10.28	19.48	3.12	6.12	9.12
147.14	6.78	9.78	18.18	2.42	4.62	9.22
153.69	6.11	8.81	16.41	2.19	3.19	8.19
127.52	5.58	8.18	15.38	1.62	2.42	7.42
107.2	5.16	7.36	13.96	1.14	1.64	6.64
0	2.765	4.23	8.73	0.235	0.23	2.75

Con estos valores obtenidos de las simulaciones se realizaron gráficas de la profundidad de la cavidad adimensional. En la tabla 4.6 se muestran los valores de la profundidad de la cavidad adimensional para cada uno de los valores del número de Froude de los diferentes tamaños de disco.

Tabla 4.6 Valores numéricos de la profundidad de la cavidad adimensional para diferentes valores del número de Froude y diferentes tamaños de disco.

Disco					
1/2"	1"	2"	1/2"	1"	2"
Numero de Froude			Profundidad de la cavidad adimensional		
7.08	5	3.54	6.3	4.48	4.33
6.71	4.75	3.36	6.02	4.31	4.2
6.22	4.4	3.11	5.89	4.28	3.99
5.7	4	2.83	5.73	4.05	3.83
5.19	3.66	2.59	5.34	3.85	3.58
4.21	2.98	2.11	4.81	3.47	3.23
3.66	2.59	1.83	4.39	3.22	3.03
3.05	2.15	1.52	4.06	2.9	2.75
0	0	0	2.18	1.66	1.72

4.3.5 RESULTADOS ADIMENSIONALES EN LA SIMULACIÓN

En la figura 4.45 se muestra la gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional en función del número de Froude para el disco de diámetro $D = 1/2$ ".

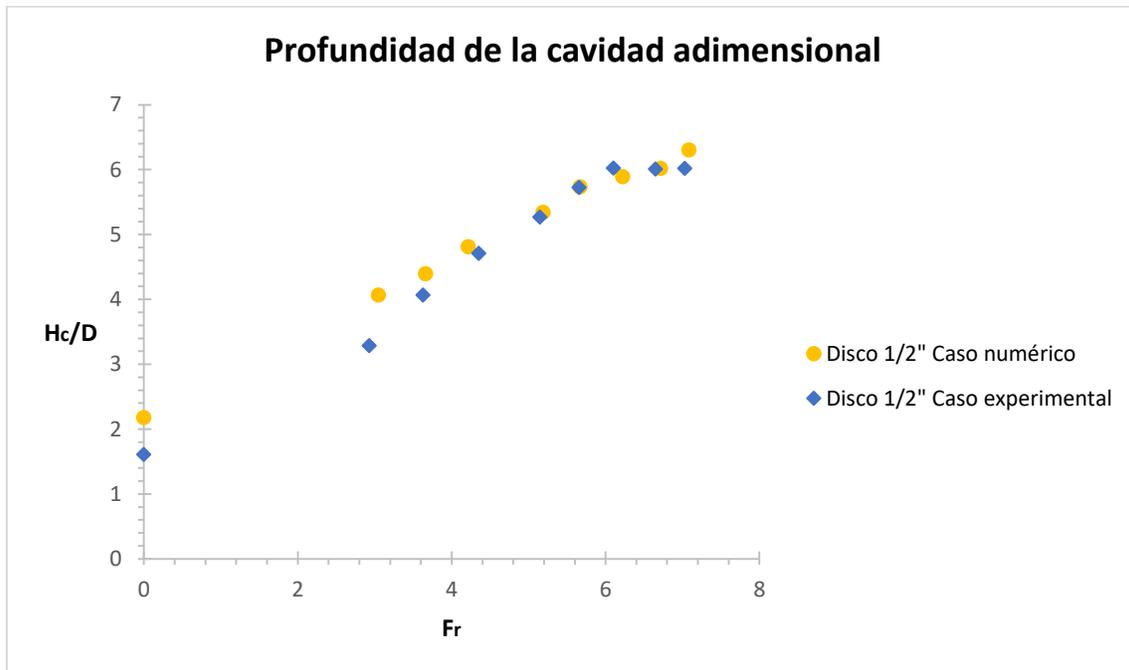


Figura 4.45 Profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función del número de Frode (Fr) para disco de diámetro $D = 1/2$ ".

En la figura 4.45 se puede observar que el caso numérico se acerca muy bien al caso experimental, en valores del número de Froude iguales o menores de 3.23 se desvía el caso numérico del experimental con una diferencia en porcentaje del 23.7% lo cual es aceptable, la diferencia no es muy grande. Para valores de número de Froude mayores a 4 se nota que el caso numérico se aproxima con bastante precisión al caso experimental, el modelo numérico está prediciendo muy bien los valores experimentales.

En la Figura 4.46 se presenta la gráfica de la profundidad de la cavidad adimensional contra el número de Froude para el disco de diámetro de $D = 1''$.

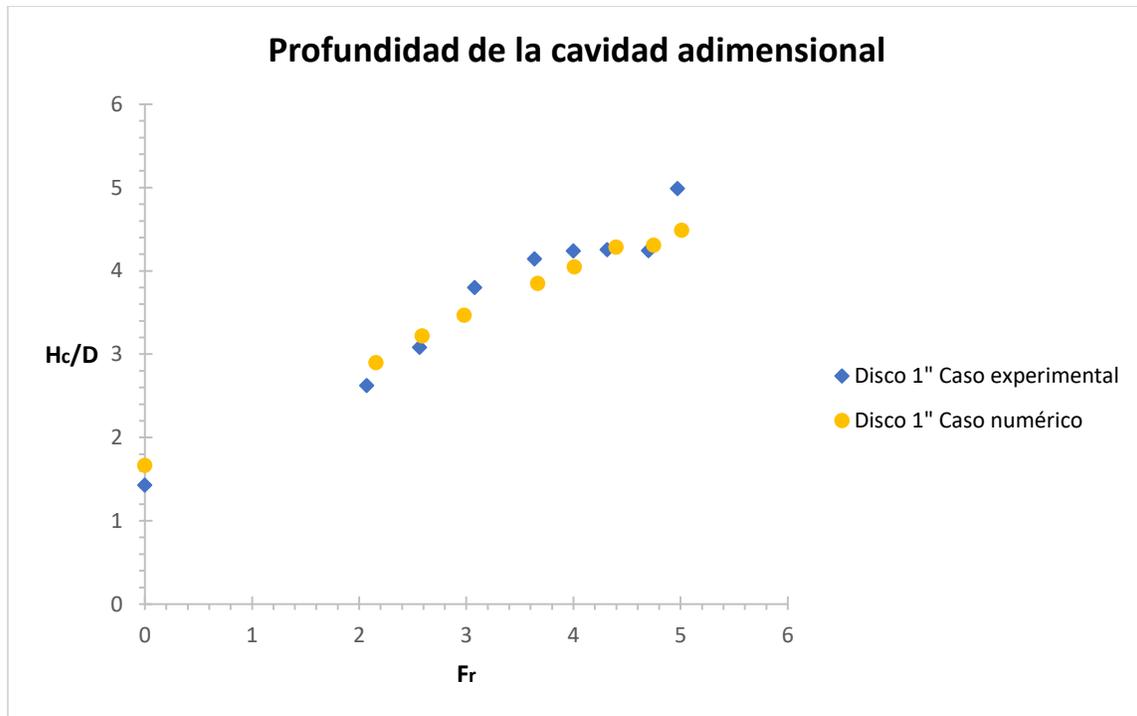


Figura 4.46 Profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función del número de Froude (Fr) para disco de diámetro $D = 1''$.

De la figura 4.46 se observa que los valores de profundidad de cavidad del caso numérico se acercan mucho a los valores experimentales, en comparación con el caso anterior del disco de diámetro $D = 1/2''$, donde a valores del número de Froude pequeños aumenta la diferencia, en este caso disminuye un poco aun valor del 16.9% .

En la figura 4.47 se muestra para el caso de disco con diámetro $D = 2''$, la profundidad de la cavidad en función del número de Froude.

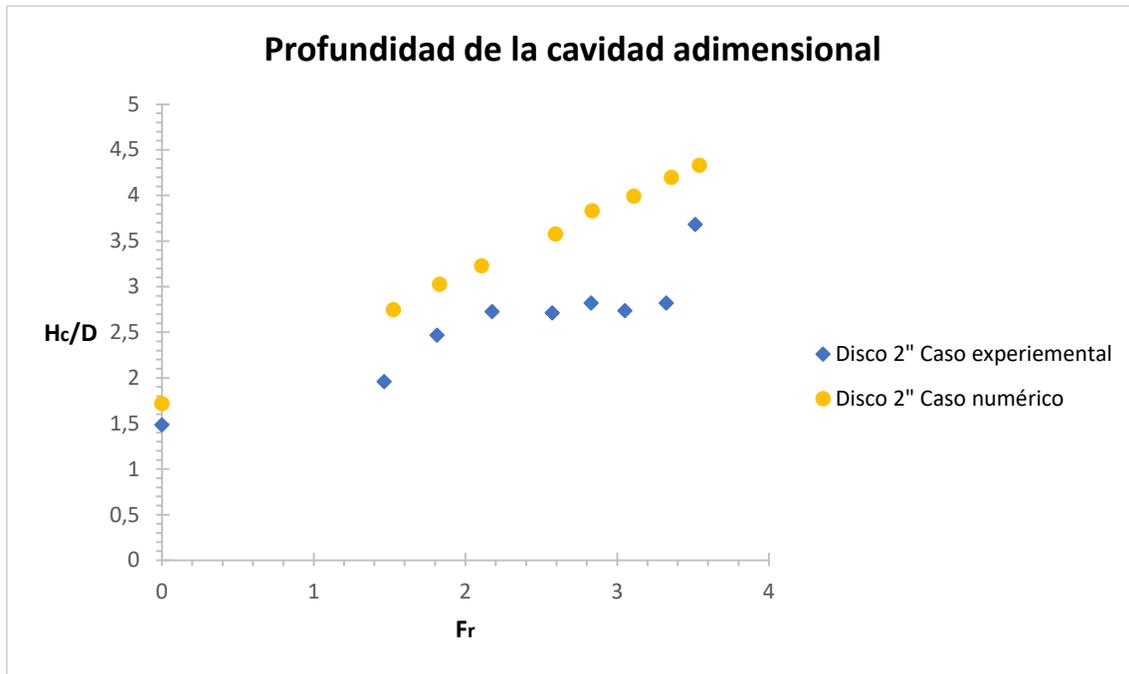


Figura 4.47 Profundidad de la cavidad adimensional (H_c/D) en función del número de Frode (Fr) para disco de diámetro $D = 2"$.

En la figura 4.47 se observa claramente una diferencia de valores de la profundidad de la cavidad bastante grande entre casos experimental y numérico, el caso experimental sobre estima el valor de la profundidad de la cavidad, esto se debe por un aumento considerable en el tamaño del disco en la simulación. En el momento del impacto el flujo que se desarrolla en la simulación es muy violento, provocando que las partículas tengan un mayor desplazamiento y por tanto una profundidad de la cavidad mayor. Esta versión del código de DualSPHysics no considera el efecto de las fuerzas de cohesión, esto permite que las partículas de fluido se muevan o desplacen a una posición más alejada de la que deberían, cuando se tiene un flujo violento.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de investigación en donde se resaltan los resultados más importantes obtenidos.

El sistema experimental desarrollado consistente de una celda rectangular cuasi-2D permitió caracterizar el comportamiento de la superficie de un líquido ante deformaciones inducidas para diferentes valores de tensión superficial.

Las deformaciones superficiales se generaron empleando un disco sólido que se libera desde la parte superior de la celda, el cual golpea la superficie de agua transfiriéndole energía cinética. Se identificaron la formación de 3 estructuras fluidas, de manera similar a las que se obtienen cuando una esfera sólida impacta una superficie líquida generando un splash en la superficie. Las estructuras que se formaron en la superficie líquida son: una corona del splash, una cavidad de aire y la formación de un jet.

Se logró reducir la tensión superficial del agua empleando el surfactante hidrofílico SDS variando su concentración.

Se programó un código en Matlab para el procesamiento de imágenes que permitió calcular la posición del disco de impacto, la velocidad del disco y algunas de las variables medibles en el splash. En este caso, se midió la profundidad de la cavidad, el ángulo de la cavidad y la altura del jet.

Como variables independientes se consideró la velocidad de impacto, el tamaño y densidad del disco sólido, así como la concentración de surfactante para modificar la tensión superficial del agua. Como longitud característica se empleó el diámetro del disco.

Como producto de una estancia de investigación en el IPN, se obtuvo un modelo numérico en 2D de la deformación de una superficie de agua al ser impactada por un disco sólido. Las simulaciones se desarrollaron empleando el software DualSPHysics que está basado en el método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics).

Debido a las diferentes variables consideradas en el estudio, se presentan las conclusiones divididas de la siguiente manera: Primero, las conclusiones obtenidas al deformar una superficie de agua pura y algunas tendencias empleando números adimensionales. Posteriormente se presentan las conclusiones relativas a soluciones acuosas que poseen un valor de tensión superficial inferior al del agua pura, por el efecto de la adición de surfactante hidrofílico. Finalmente, se incluyen algunas conclusiones relacionadas con los resultados de simulación obtenidos para el modelo en 2D de las deformaciones superficiales.

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

5.1.1 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES AL DEFORMAR UNA SUPERFICIE DE AGUA.

1. Al impactar con un disco sólido la superficie del agua dentro de una celda cuasi-bidimensional se generaron las 3 estructuras fluidas correspondientes a la corona del splash, la cavidad de aire y la formación de un jet.
2. La profundidad máxima de la cavidad y la altura máxima del jet aumentaron cuando se incrementó ya sea la velocidad de impacto, el tamaño del disco o la densidad del disco.
3. Un mayor aumento en el ángulo de la cavidad se presentó cuando se incrementaba la velocidad de impacto del disco. Al aumentar al doble la velocidad de impacto el ángulo aumentó 5.48° , para un disco de $\frac{1}{2}$ " de diámetro. A diferencia que cuando se empleó un disco del doble del diámetro, el ángulo aumentó 2.26° , para una velocidad de 100 cm/s .
4. Para velocidades de impacto bajas, el ángulo de la cavidad muestra dependencia con el tamaño del disco que al impactar sobre la superficie desplaza líquido y comienza a formar la cavidad. Sin embargo, se observó que al seguir incrementando la velocidad de impacto, el ángulo de la cavidad alcanza un valor máximo y se mantiene en ese valor, sin depender del tamaño del disco.
5. Se identificó un mínimo local en la altura máxima del jet al ir aumentando la velocidad de impacto. A esta variación en la altura máxima del jet se le denominó **efecto de retroceso**. Es una región de transición en donde la tensión superficial restringe el crecimiento del jet en su altura pero se observa un aumento en el ancho del jet.

5.1.2 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS AL VARIAR LA TENSIÓN SUPERFICIAL DEL AGUA.

1. Al disminuir la tensión superficial del agua se obtuvo un aumento en la profundidad máxima de la cavidad, en el ángulo de la cavidad y en la altura máxima del jet, en comparación de emplear agua pura, manteniendo las mismas condiciones experimentales.
2. Se observó que el ángulo de la cavidad y la altura del jet muestran mayor variación a cambios pequeños en la tensión superficial.
3. La reducción en la tensión superficial del agua provoca que el efecto de retroceso en la altura del jet se observe a velocidades de impacto menores al que se presentó en agua pura. Lo cual confirma que las fuerzas de tensión superficial son importantes para la observación del efecto de retroceso. Y por otra parte, indica que al reducir la tensión superficial se requiere de una menor energía para lograr un aumento en el área superficial. Por ello, se obtuvo un aumento en la profundidad de la cavidad y en la altura del jet.
4. Se logró reducir aún más el valor de tensión superficial mínimo alcanzado en el rango de concentraciones de surfactante SDS utilizados en este estudio. Esta reducción

adicional en la tensión superficial del agua se logró al adicionar pentanol. Este tipo de alcohol ha sido empleado por otros autores como co-surfactante de SDS para ayudar a reducción la tensión superficial del agua y formar microemulsiones. Sin embargo, se observó que para lograr una reducción apreciable en la tensión superficial del agua adicionando co-surfactante, la cantidad de reactivo necesario modificaba otras propiedades del agua como su densidad o viscosidad al favorecer la aparición de estructuras micelares complejas.

5.1.3 CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EMPLEANDO NÚMEROS ADIMENSIONALES.

1. Al emplear números adimensionales, se obtuvo que la profundidad máxima de la cavidad escalada con el diámetro del disco, crece de manera lineal con respecto al número de Froude (comportamiento observado en el impacto de discos de manera frontal, reportado por (Glasheen y MacMahon, 1996)), con una tasa de crecimiento de 0.7469, el cual representa la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Por su parte, la altura máxima adimensional del jet crece al incrementar el número de Froude. Por lo tanto, para un tamaño de disco dado, los valores que se alcancen de profundidad de la cavidad y de la altura del jet estarán determinados principalmente por la velocidad de impacto.
2. Al aumentar el tamaño del disco el efecto de retroceso se desliza hacia números de Froude menores. Esto se debe a que al aumentar la masa del disco se está incrementando con ello la energía cinética que se transfiere al líquido al momento del impacto. Así también se produce un aumento en el área de contacto con la superficie del agua.
3. El ángulo de cavidad aumenta al incrementarse el número de Froude, ya que la abertura de la cavidad está dominada principalmente por las fuerzas inerciales.
4. Para el caso del agua pura que presenta una alta tensión superficial, el efecto de retroceso se hace más evidente cuando se reduce el tamaño de disco, ya que el número de Bond disminuye. Esto es porque al disminuir el tamaño del disco, los efectos de tensión superficial comienzan a tomar mayor fuerza. Por el contrario, en discos de mayor tamaño aumenta el número de Bond y las fuerzas gravitacionales son más dominantes que las fuerzas de tensión superficial.
5. Para un tamaño de disco pequeño (en este caso $D = 1''$), al disminuir la tensión superficial por el empleo de surfactantes, se está incrementando el valor del número de Bond. Por lo tanto, se logra observar que la amplitud del efecto de retroceso disminuye cuando decrece el valor de la tensión superficial.

5.1.4 CONCLUSIONES DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS EN EL MODELO 2D PARA LAS DEFORMACIONES SUPERFICIALES.

1. Se logró desarrollar un modelo numérico en donde se definió un volumen de líquido, fronteras con paredes sólidas y un objeto sólido en forma de disco empleando el software DualSPHysics. Se definió una altura a la cual el objeto sólido podía realizar un desplazamiento en caída libre e impactar con el volumen líquido. La simulación

se definió en 2D y se logró reproducir las deformaciones observadas en los experimentos. Los resultados numéricos se limitaron al caso del agua para la fase líquida.

2. Se realizó un análisis del tamaño de partícula para modelar el líquido, eligiendo aquel tamaño de partícula que generara la mejor aproximación en la altura del jet a partir de una velocidad de impacto de magnitud similar al utilizado en los experimentos.
3. De las simulaciones se obtuvieron valores de la máxima profundidad de la cavidad y la máxima altura del jet al generar valores de la velocidad de impacto del disco cercanos a los experimentales. Los resultados numéricos obtenidos muestran una buena aproximación a los resultados experimentales, lo cual permitió validar el código numérico generado en DualSPHysics.
4. El modelo numérico permitió predecir valores de la profundidad de la cavidad y de la altura del jet para un rango de velocidades de impacto más amplio que los obtenidos en los experimentos.
5. Las simulaciones numéricas lograron captar el efecto de retroceso en la altura máxima del jet, fenómeno observado en los experimentos.

5.2 RECOMENDACIONES

Para el desarrollo experimental del splash en una celda cuasi 2D debe tomarse en cuenta el efecto del confinamiento que ejercen las paredes, ya que durante las deformaciones el desplazamiento del líquido está restringido en una de sus dimensiones. Esta simplificación puede mostrar diferencias cuantitativas mas no cualitativas de lo que se obtendría en un plano de observación al impactar una esfera sólida en una celda en 3D. Sin embargo, el volumen de líquido empleado en la celda bidimensional fue aproximadamente de 1 L, un volumen que es significativamente menor al que se emplearía en una celda tridimensional de características similares, en la cual aumentaría el volumen en 2 órdenes de magnitud, es decir se emplearían aproximadamente 100 L de líquido como máximo.

Entre los cuidados que se deben tomar en cuenta al realizar los experimentos, son la liberación del disco para que éste impacte la superficie líquida de manera perpendicular. Las superficies de la celda deben secarse antes de realizar cualquier experimento para que el disco no se adhiera a las paredes durante su caída. Debe cuidarse que el nivel de líquido sea suficiente para que el splash se desarrolle de manera completa antes de que el disco logre alcanzar la base de la celda. Debe retirarse cualquier exceso de espuma que se genere al emplear soluciones con surfactante, entre otros cuidados.

Debido a las dimensiones finitas de la celda y a la metodología empleada para generar las velocidades de impacto, se alcanzaron valores máximos de velocidad de impacto de 250 cm/s para el nivel de líquido más bajo utilizado.

Los resultados numéricos se limitaron a reproducir las diferentes etapas del splash en un plano de observación en 2D. No se incluyeron efectos de confinamiento ni variación en la tensión superficial del agua. Se obtuvieron resultados preliminares del efecto de confinamiento a partir de un sistema en 3D, los cuales no fueron incluidos en este trabajo.

5.3 PERSPECTIVAS A FUTURO

Las variables que se midieron principalmente en este trabajo fueron: la profundidad de la cavidad, el ángulo de la cavidad, la altura del jet, la tensión superficial de soluciones acuosas con surfactante y la del agua destilada. Como trabajo a futuro se podría considerar medir la altura y deformación de la corona de splash en 2D al variar la tensión superficial. Otro aspecto que se podría incluir, sería ampliar el rango de velocidades de impacto en la celda experimental al adaptarle algún dispositivo o extensión.

Otro trabajo a futuro sería considerar el impacto de objetos con geometrías más complejas de acuerdo a alguna aplicación específica o modificar las propiedades viscosas del líquido empleando la celda cuasi 2D. La metodología experimental utilizada en este trabajo de investigación, podría emplearse en interfaces líquidas inmiscibles.

Otro trabajo que se podría desarrollar sería el análisis de la dinámica del fluido en cada una de las etapas del splash empleando la técnica de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) y comparar con los resultados que se están obteniendo en las simulaciones numéricas por el método SPH empleado en esta tesis.

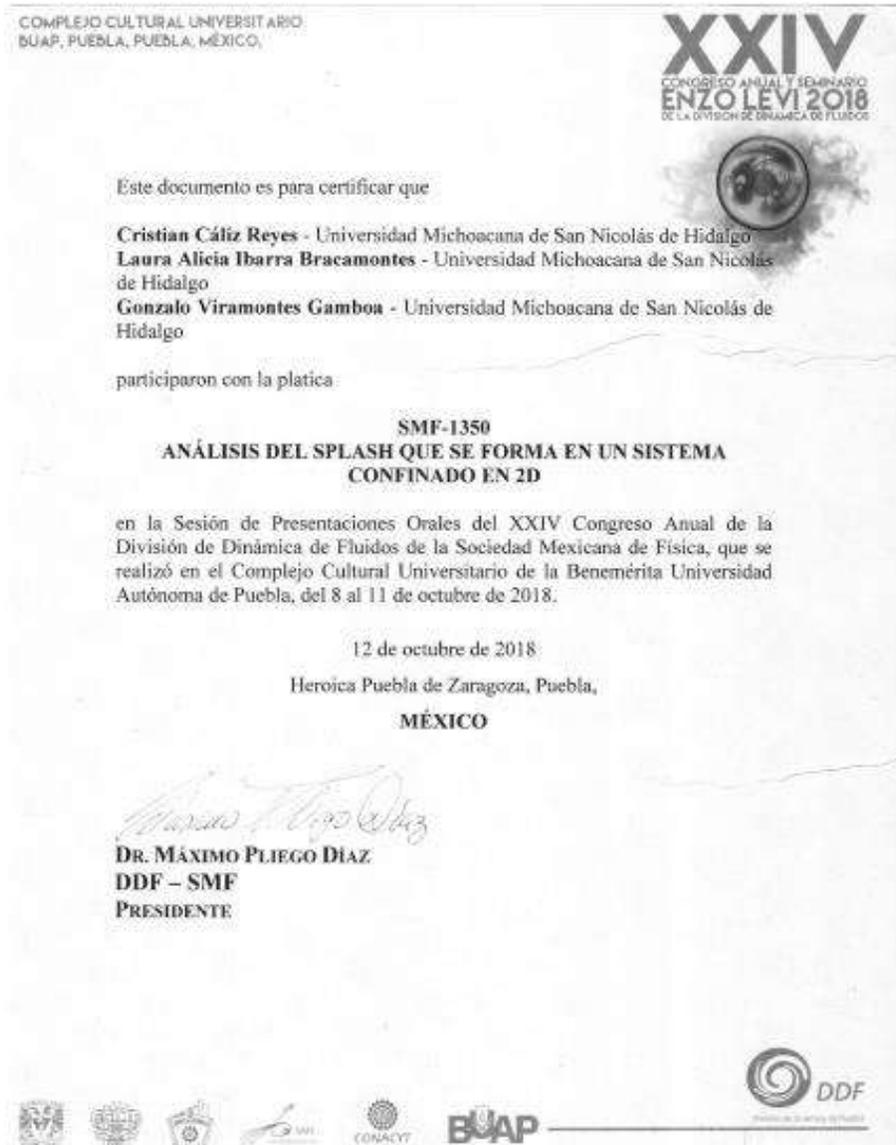
ACCIONES DE DIFUSIÓN

En esta sección se presentan las acciones de difusión que se le dieron al trabajo de investigación, que fue presentación en congresos y la escritura de un artículo y su respectiva presentación.

- ❖ Se presentó el trabajo de investigación en XXIII Congreso de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Mexicana de Física realizado en Puerto Ángel, Oaxaca.



- ❖ Se presentó el trabajo de investigación en el XXIV Congreso Anual de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Mexicana de Física Realizado en la ciudad de Puebla, Puebla.



- ❖ Se presentó y publico un artículo del trabajo de investigación en el Congreso Internacional de Investigación de Academia Journals del año 2018 en la ciudad Celaya, Guanajuato.



Análisis de la deformación de una superficie de agua al ser impactada por un disco sólido empleando análisis de imágenes

Ing. Cristian Calix Reyes¹, Dra. Laura A. Ibarra Bracamonte²
y Dr. Gonzalo Viramontes Gamboa³

Resumen—Para analizar la resistencia a la deformación de una superficie de agua, se realizaron una serie de experimentos en donde se libera un objeto sólido que golpea de manera perpendicular a la superficie de agua. Para simplificar el sistema de estudio, se empleó una célula rectangular transparente con espesor reducido de tal manera que permita la observación del fenómeno en un plano vertical. Para deformar la superficie de agua se emplearon discos de diversos diámetros y materiales, empleando diferentes velocidades de impacto. Durante la deformación de la superficie se pudieron identificar 3 etapas: desprendimiento de líquido al momento del impacto, la formación de una cavidad de aire debido a la entrada del disco y finalmente la formación de un jet por el cierre de la cavidad. Los resultados muestran cuantitativamente cómo aumenta la profundidad de la cavidad y cómo varía la altura del jet al aumentar la velocidad de impacto.

Palabras clave—splash, deformación superficie de agua, velocidad impacto, cavidad de aire, jet líquido.

Introducción

La deformación generada en una superficie líquida generada por el impacto de un objeto, ya sea sólido o líquido, se le conoce comúnmente como splash. Es un fenómeno muy común en la naturaleza y se presenta también en industrias que manejan líquidos (Vincent et al., 2015). Los primeros estudios del splash se remontan a inicios del siglo XX. El fenómeno del splash se puede entender en términos de la mecánica de fluidos y muestra la respuesta de una superficie líquida a la cual se le ha transferido energía por el impacto de un objeto. Controlar el splash es de gran interés en la industria de impresoras por inyección de tinta. Se han encontrado otras aplicaciones en la arquitectura naval (Laviery, 2004), en el área militar para el desarrollo de misiles (Lee et al., 1997), e incluso el análisis del splash e inspirado a comprender cómo es que algunos lagartos basiliscos y aves de costa pueden caminar sobre la superficie libre del mar (Glasheen y McMahon, 1996).

Asociados al splash se puede identificar toda una serie de movimientos principalmente en la superficie de un líquido. Entre ellos se puede observar primero que el impacto de un objeto sobre la superficie líquida provoca un desplazamiento y desprendimiento de líquido en la parte superior del nivel del líquido, formando lo que se le conoce como una corona. Posteriormente al impacto, el objeto se desplaza continuando con su trayectoria y comienza a formar una cavidad de aire dentro del seno del líquido. Finalmente, una vez que el objeto rompe la interfase y continúa desplazándose por gravedad, el líquido desplazado trata de recuperar su configuración estable y al ir cerrando la cavidad se genera un jet líquido que sale expulsado sobre el nivel del agua. Cada una de estas etapas se pueden ir observando a medida que un objeto sólido, después de impactar la superficie líquida, continúa descendiendo al interior del líquido.

Por el pasar de los años una gran variedad de estudios experimentales, numéricos y teóricos se han realizado para entender este fenómeno complejo del splash.

Entre los primeros trabajos teóricos que analizan el impacto de esferas en superficies de agua se encuentran el trabajo de Lee et al. (1997) a altas velocidades de impacto y el trabajo de Laviery (2004) para el cálculo del coeficiente de impacto. Por su parte, Nigam y Walters (2001) realizaron experimentos de impacto de cilindros sobre superficies de fluidos viscosos para el análisis de la altura del jet, mientras que Akers y Belmonte (2006) experimentaron con esferas que impactan sobre líquidos viscoelásticos. Alam et al. (2007) emplearon la técnica numérica MPS para modelar la deformación de la corona de splash, mientras que Wang et al. (2015) empleando la técnica numérica BUE para estudiar la entrada vertical de una cuña en la superficie libre de agua.

En este trabajo se muestra un análisis de las deformaciones que presenta una superficie de agua cuando es impactada por un disco en un sistema confinado cuasi-2D. Se muestran los resultados de cómo varía la profundidad

¹ Ing. Cristian Calix Reyes es estudiante del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México calixreys-cris@outlook.com

² Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamonte es Profesora e Investigadora en el Posgrado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo México lalibras@unahm.mx (autor correspondiente)

³ Dr. Gonzalo Viramontes Gamboa es Profesor e Investigador en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México gviramon@unahm.mx

- ❖ Se realizó una estancia de investigación en el IPN SEPI ESIA en la ciudad de Mexico con la investigadora Dra. Rosanna Bonasia del estudio del modelo Lagrangiano de Partículas Suavizadas DualSPHysics para realizar simulaciones numéricas del splash.

Ciudad de México, 17/12/2018

Estancia de Cristian Cáliz Reyes

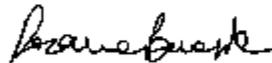
Dr. Luis Bajar Gómez
Coordinador del Programa de Maestría en
Ciencias en Ingeniería Mecánica
Universidad Michoacana, de San Nicolás de Hidalgo

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que el Ing. Cristian Cáliz Reyes, estudiante de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y con número de matrícula 1650964C, ha terminado su estancia de investigación en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA) del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco (Ciudad de México), cumpliendo con los objetivos del tema "Estudio del modelo numérico DualSPHysics, modelo Lagrangiano de partículas suavizadas".

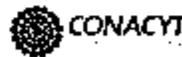
Se realizaron simulaciones numéricas en dos dimensiones de diferentes casos del fenómeno de "splashing" y los resultados se compararon con los resultados de los experimentos de laboratorio anteriormente realizados por el estudiante. La comparación resulta satisfactoria, comprobando la fiabilidad del modelo numérico.

La estancia se llevó a cabo del 18 de septiembre de 2018 al 18 de diciembre de 2018.

Rosanna Bonasia



MÉXICO
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS



ROSANNA BONASIA

Catedrático Conacyt-Instituto Politécnico Nacional,
SEPI-ESIA, UZ

Av. Miguel Alemán, Edificio de Posgrado e Investigación
Del Gustavo A. Madero C.P. 07738 Ciudad de México
Tel. (55) 5729-6000 ext. 53145
rbonasia@conacyt.mx

APÉNDICE

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos sobre los cuales está basado DualSPHysics y su funcionamiento general cuando se realizan simulaciones.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE DUALSPHYSICS

DualSPHysics es un código el cual se origina del código SPHysics y este se encuentra basado en el modelo de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH).

El método SPH discretiza un continuo usando un conjunto de partículas materiales, cuando es usado para la simulación de fluidos dinámicos, las ecuaciones de Navier Stokes discretizadas son integradas en la localización de cada una de estas partículas acorde a las propiedades de las partículas de los alrededores. El conjunto de partículas vecinas es determinado por una función de distancia, pudiendo ser circular (dos dimensiones) o esférica (tres dimensiones), con una asociada longitud característica conocida como longitud de suavizado y denotada como h . En cada paso de tiempo nuevas cantidades físicas son calculadas para cada partícula y entonces cada partícula se mueve de acuerdo a los valores adaptados.

Las leyes de conservación del fluido continuo son transformadas de su forma diferencial parcial a una forma adecuada para partículas usando ecuaciones integrales basadas en una función de interpolación, la cual da valores estimados en un punto específico.

FORMULACIONES SPH.

Función Integral de Interpolación.

La función de interpolación es expresada de la siguiente manera:

$$F(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} F(\mathbf{r}')W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)d\mathbf{r}' \quad (\text{Ec. A.1})$$

La función $F(\mathbf{r})$ asigna un valor a una partícula ubicada por \mathbf{r} en base a los valores de las otras partículas ubicadas en \mathbf{r}' , $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)$ es lo que se conoce como Kernel de suavizado y da una ponderación al valor de $F(\mathbf{r}')$ basado en una función de probabilidad.

La función F definida en la ec. A.1 puede ser aproximada en una forma discreta basada en un conjunto de partículas. En tal caso la función es interpolada en la partícula i , mediante la sumatoria de todas las partículas vecinas alrededor de i , dentro de la región de soporte compacto definido por la longitud de suavizado:

$$F(\mathbf{r}_i) \approx \sum_j F(\mathbf{r}'_j)W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j, h) \Delta V_j \quad (\text{Ec. A.2})$$

Donde el subíndice j denota a todas las partículas alrededor de i , ΔV_j es el incremento de volumen de la partícula j .

En la figura A.1 se muestra un esquema de los elementos de la función de integral de interpolación considerados para el cálculo del valor de esa función en la partícula i . El valor de la función de interpolación en la partícula i se determina a partir del valor de las partículas vecinas j , comprendidas dentro de una región definida por la longitud h . La kernel de suavizado $W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}'_j, h)$ da una ponderación a la función de interpolación basándose en una función de probabilidad. Entre más cercana una partícula vecina se encuentre de la partícula de interés, mayor influencia tiene en el cálculo.

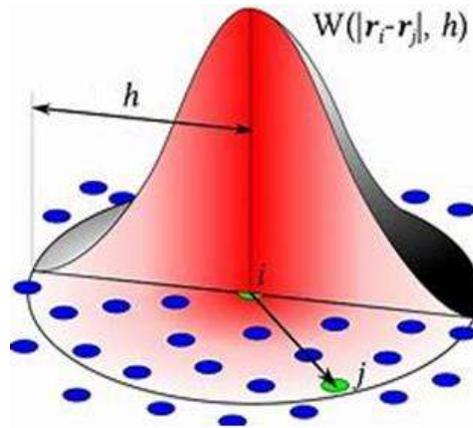


Figura A.1 Esquema de los elementos de la función de interpolación para el cálculo de la función en la partícula i [2].

✚ Kernel de Suavizado.

El desempeño de un modelo SPH depende fuertemente de la kernel de suavizado. Las kernels son expresadas normalmente en función de una distancia adimensional $q = \frac{r}{h}$, donde r es la distancia entre dos partículas dadas i, j y h el parámetro (longitud de suavizado) controla el tamaño del área de la región alrededor de la partícula, a partir del cual las partículas pertenecientes serán consideradas. De entre las kernel de suavizado que mejor funcionan en un modelo SPH se tienen la cuadrática, interpolación cubica y quintica.

Las Kernel que usan DualSPHysics son:

- Interpolación Cubica (Monaghan y Lattanzio, 1985)

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2 - q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & 2 \leq q \end{cases} \quad (\text{Ec. A.3})$$

Donde α_D es igual $\frac{10}{7\pi h^2}$ para caso 2D e igual a $\frac{1}{\pi h^3}$ para el caso 3D

➤ Quintica (Wendland, 1995)

$$W(r, h) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^4 (2q + 1) \quad 0 \leq q \leq 2 \quad (\text{Ec. A.4})$$

Donde α_D es igual $\frac{7}{4\pi h^2}$ para caso 2D e igual a $\frac{21}{16\pi h^3}$ para el caso 3D

✚ Ecuación de continuidad.

En toda la duración de una simulación SPH donde el fluido se considera débilmente compresible, la masa de cada partícula permanece constante y su asociada densidad fluctúa. Los cambios de densidad son calculados resolviendo la ecuación de conservación de masa en forma discreta:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (\text{Ec. A.5})$$

Donde:

ρ_a ; densidad de la partícula que se quiere calcular (kg/m^3)

m_b ; masa de la partícula vecina (kg)

\mathbf{v}_{ab} ; velocidad relativa de la partícula a con respecto de la partícula b (m/s)

$\nabla_a W_{ab}$; operador nabla aplicado sobre el kernel de suavizado para la ponderación del cálculo de la partícula.

✚ Ecuación de estado.

DualSPHysics considera al fluido ligeramente compresible y una ecuación de estado es usada para determinar la presión del fluido basado en la densidad de la partícula. El uso de una ecuación de estado en lugar de una ecuación de Poisson permite que el tiempo de cálculo se reduzca. La compresibilidad es ajustada de manera que la velocidad del sonido puede ser artificialmente disminuida, esto se traduce en un valor razonable del tamaño del paso de tiempo ya que este es determinado basado en la concurrente velocidad del sonido para todas las partículas. Tal ajuste sin embargo restringe la velocidad del sonido a ser al menos 10 veces más rápido que la máxima velocidad del fluido manteniendo variaciones de densidad menores que 1% y por tanto no introduciendo mayores desviaciones de la consideración de fluido incompresible.

DualSPHysics utiliza la ecuación de estado Tait:

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma - 1 \right] \quad (\text{Ec. A.6})$$

Donde:

P ; presión de la partícula (N/m^2)

ρ_0 ; densidad de referencia, en el caso del agua ($1000 kg/m^3$)

c_0 ; velocidad del sonido en la densidad de referencia $c_0 = \sqrt{\partial p / \partial \rho} |_{\rho_0}$, (m/s)

ρ ; densidad de la partícula (kg/m^3)

γ ; coeficiente politrópico, en el caso del agua $\gamma = 7$.

✚ Ecuación de momento (Navier Stokes).

DualSPHysics ofrece diferentes opciones para modelar la viscosidad del fluido:

- Esquema de Viscosidad Artificial.

Este esquema propuesto por (Monaghan, 1992) es el método común para la simulación del fluido en SPH debido a su simplicidad. En SPH la ecuación anterior puede ser escrita:

$$\frac{D\mathbf{v}_a}{Dt} = - \sum_b \left(m_b \frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} + \Pi ab \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} \quad (\text{Ec. A.7})$$

Donde:

P_k ; presión en la correspondiente partícula k (N/m^2)

ρ_k ; densidad en la correspondiente partícula k (kg/m^3)

$$\Pi ab; \text{ término viscoso dado por: } \Pi ab = \begin{cases} \frac{-\alpha \overline{c_{ab}} \mu_{ab}}{\overline{\rho_{ab}}} & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} > 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. A.8})$$

El termino viscoso, se anula cuando las partículas a y b se alejan y ejerce una aceleración opuesta al gradiente de presiones entre partículas que se aproximan (disipa energía cinética)

Donde:

$$\mu_{ab} = \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta^2)}, \text{ (m/s)}$$

$$\eta = 0.01 h^2, \text{ m}^2$$

$\overline{c_{ab}}$; velocidad media del sonido (m/s)

$\overline{\rho_{ab}}$; densidad media de las partículas a y b (kg/m^3)

α , es un coeficiente con un valor de 0.01 que necesita ser afinado para introducir una apropiada disipación.

- Esquema de viscosidad laminar y la escala de sub-partícula (SPS).

Los esfuerzos laminares viscosos en la ecuación de momento de acuerdo (Lo y Shao, 2002) se expresan:

$$(\mathbf{v}_0 \nabla^2 \mathbf{v})_a = \sum_b m_b \left(\frac{4 \mathbf{v}_0 \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) \mathbf{v}_{ab} \quad (\text{Ec. A.9})$$

Donde:

\mathbf{v}_0 ; viscosidad cinemática, en el caso del agua ($1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Resultando la ecuación de momento en SPH:

$$\frac{D\mathbf{v}_a}{Dt} = - \sum_b \left(m_b \frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} + \sum_b m_b \left(\frac{4\nu_0 \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) \mathbf{v}_{ab} \quad (\text{Ec. A.10})$$

El concepto de Escala de Sub-Partícula (Sub-Particle Scale, SPS) fue introducido primeramente por (Gotoh et al. ,2001) para representar los efectos de la turbulencia en su modelo de Movimiento de Partícula Semi-implícita (MPS).

(Dalrymple y Rogers, 2006) modelaron el Tensor de esfuerzos SPS mediante la asunción de la viscosidad de Eddy, usando la notación indicial de Einstein el tensor se define:

$$\frac{\tau_{ij}}{\rho} = \nu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} C_I \Delta^2 \delta_{ij} |S_{ij}|^2 \quad (\text{Ec. A.11})$$

Donde:

τ_{ij} ; tensor de esfuerzos de Sub-Partícula

$\nu_t = [(C_s \Delta l)]^2 |S|$; viscosidad de Eddy turbulenta

k ; energía cinética turbulenta SPS

C_s ; contante de Smagorinsky con un valor de 0.12

$C_I = 0.0066$;

Δl ; espacio entre partículas

$|S| = 0.5(2S_{ij}S_{ij})$;

S_{ij} ; elemento del tensor de esfuerzos SPS

La ecuación de Momento para la turbulencia en SPH queda establecida:

$$\begin{aligned} \frac{D\mathbf{v}_a}{Dt} = & - \sum_b \left(m_b \frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} + \sum_b m_b \left(\frac{4\nu_0 \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right) \mathbf{v}_{ab} \\ & + \sum_b m_b \left(\frac{\tau_{ij}^b}{\rho_b^2} + \frac{\tau_{ij}^a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} \end{aligned} \quad (\text{Ec. A.12})$$

✚ Pasos de tiempo.

DualSPHysics incluye dos esquemas numéricos integrales para determinar la configuración del sistema en cada paso de tiempo, las ecuaciones de momento (\mathbf{v}_a), densidad (ρ_a) y la posición (\mathbf{r}_a) se escriben:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = \mathbf{F}_a \quad (\text{Ec. A.13})$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \mathbf{D}_a \quad (\text{Ec. A.14})$$

$$\frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \mathbf{v}_a \quad (\text{Ec. A.15})$$

Estas ecuaciones son integradas respecto del tiempo usando el esquema simple Verlet o el esquema de dos etapas Symplectic que es más numéricamente estable pero intensivo.

➤ Paso de tiempo variable.

Con los esquemas de integración explícitos, el paso de tiempo depende de la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL), la fuerza por unidad de masa sobre las partículas y el término de difusión viscosa. Un paso de tiempo variable Δt es determinado de acuerdo a (Monaghan et al. ,1999) usando:

$$\Delta t = CFL \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv})$$

$$\Delta t_f = \min_a \left(\sqrt{\frac{h}{|f_a|}} \right) \quad (\text{Ec. A.16})$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \frac{h}{c_s + \max_b \left| \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right|}$$

Donde Δt_f está basado en la fuerza por unidad de masa ($|f_a|$) y Δt_{cv} combina los controles de paso de tiempo Courant y el termino viscoso.

FUNCIONAMIENTO GENERAL DE DUALSPHYSICS

El Código DualSPHysics es el resultado de una óptima implementación usando el mejor enfoque en precisión, robustez y confiabilidad para el CPU y GPU. Simulaciones numéricas en SPH realizadas en código DualSPHysics pueden ser divididas en tres pasos principales; generación de la lista de vecinos, cálculo de las fuerzas de interacción entre partículas vecinas (resolviendo las ecuaciones de continuidad y momento) y la adaptación de las cantidades físicas en el siguiente paso de tiempo. Cuando se corre una simulación se ejecutan estos tres pasos de manera iterativa:

1. Lista de partículas vecinas.
 - El dominio es dividido en celdas cuadradas de tamaño $2h$ (o el tamaño del dominio del kernel)
 - Una lista de partículas ordenada es generada, de acuerdo a la celda a la cual ellas pertenecen.
 - Todos los arreglos con variables físicas pertenecientes a las partículas son reordenadas de acuerdo a la lista de partículas.
2. Cálculo de fuerzas.
 - Partículas de la misma celda y adyacentes de otras celdas son candidatas a ser vecinas.
 - Cada partícula interactúa con todas sus vecinas (a una distancia $< 2h$)

3. Adaptación del sistema.
 - Un nuevo paso de tiempo es calculado.
 - Cantidades físicas para el siguiente paso son adaptadas iniciando de los valores de las variables físicas en el presente o previo paso de tiempo usando la interacción de partículas.
 - Información de partículas (velocidad y densidad) son almacenadas en el disco local (disco duro) en tiempos definidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akers B, Belmonte A. 2006. Impact dynamics of a solid sphere falling into a viscoelastic micellar fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 135, 97-108.

Alam A, Kai H, Susuki K. 2007. Two-dimensional numerical simulation of water splash phenomena with and without Surface tension. *Journal of Marine Science and Technology*, 12, 59-71.

Bandyopadhyay R. 2013. Novel experimentally observed phenomena in soft matter. *Pranama-Journal of physics*, 81(1), 3-34.

Cengel Y, Cimbala J. 2012. *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. Segunda Edición. México. Mc Graw Hill, ISBN 978-607-15-0779-2.

Cheny J. M, Walters K. 1996. Extravagant Viscoelastic effects in the Worthington jet experiment. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 67, 125-135.

Cheny J. M, Walters K. 1999. Rheological influences on the splashing experiment. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 86, 185-210.

Chen T, Huang W, Zhang W, Qi Y, Guo Z. 2019. Experimental investigation on trajectory stability of high speed water entry projectiles. *Ocean Engineering*, 175, 16-24.

Dalrymple R. A and Rogers B. D. 2006. Numerical modelling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53, 141-147.

Dyment A. 2019. Violent water entry of spheres. *European Journal of Mechanics/B Fluids*, 74, 331-341.

Gaudet S. 1998. Numerical simulation of circular disks entering the free surface of a fluid. *Physics of Fluids*, 10(10), 2489-2499.

Glasheen J.W, McMahon T.A. 1996. Vertical water entry of disks at low Froude numbers. *Physics of Fluids*, 8(8), 2078-2083.

Gotoh H, Shao S, Memita T. 2001. SPH-LES model for numerical investigation of wave interaction with partially immersed break-water. *Coastal Engineering Journal*, 46(1), 39-63.

Huang W, Zhang W, Ren P, Guo Z, Ye N, Li D.C, Gao Y.B. 2015. An experimental Investigation of Water-Filled Tank Subjected to Horizontal High Speed Impact. *Experimental Mechanics*, 55, 1123-1138.

Kormakz F, Güzel B. 2017. Water entry of cylinders and spheres under hydrophobic effects; Case for advancing contact angles. *Ocean Engineering*, 129, 240-252.

Kubota Y, Mochizuki O. 2011. Influence of head shape of solid body plunging into water on splash formation. *Journal of vision*, 14, 111-119.

Lavery S. 2004. Master's Thesis: Experimental Hydrodynamics of Spherical Projectiles Impacting on a Free Surface Using High Speed Imaging Techniques. Department of Ocean Engineering. Massachusetts Institute of Technology. United States.

Lee M, Longoria R.G, Wilson D.E. 1997. Cavity dynamics in high-speed water entry. *Physics of Fluids*, 9(3), 540-550.

Leng L.J. 2001. Splash formation by spherical drops. *Journal of Fluid Mechanics*, 427, 73-105.

Mataix C. 2012. *Mecánica de fluidos y Máquinas hidráulicas. Segunda Edición. México. Alfa Omega, ISBN 978-970-15-1057-5.*

Monaghan J. J and Lattanzio J. C. 1985. A refined method for astrophysical problems. *Astron. Astrophys*, 149, 135-143.

Monaghan J. J. 1992. Smoothed particule hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 543-574.

Monaghan J. J and Kos A. 1999. Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal Engineering*, 125, 145-154.

Monaghan J. J, Cas, R. A. F, Kos A. M, Hallworth M. 1999. Gravity currents descending a ramp in a stratified tank. *Journal of Fluid Mechanics*, 379, 39-70.

Nigen S, Walters K. 2001. On the two-dimensional splashing experiment for Newtonian and slightly elastic liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 97, 233-250.

Randy L, Vander W, Gordon M, Berger S. D, Mozes. 2006. The Combined influence of a rough surface and a thin fluid film upon the splashing threshold and splash dynamics of a droplet impacting onto them. *Experiments in Fluids*, 40, 23-32.

Rosen M.J. 2004. *Surfactants and Interfacial Phenomena. The City University of New York. Third Edition. Surfactant Research. Institute Brooklyn College, ISBN 978-047-16-7056-8.*

Russo S, Jalalisendi M, Falcucci G, Porfiri M. 2018. Experimental Characterization of oblique and asymmetric water entry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92, 141-161.

Russo S, Biscarini C, Facci A.L, Falcucci G, Janelli E, Ubertini S. 2018. Experimental assessment of bouyant cylinder impacts through high speed image acquisition. *Journal of Marine Science and Technology*, 23, 67-80.

Stevens C.S 2014. Scaling of the splash threshold for low-viscosity fluids. *Europhysics Letters*, 106(2), 24001.

Thoroddsen S.T, Shen A. 2001. Granular Jets. *Physics of Fluids*, 13 (1), 4-6.

Thoroddsen S.T. 2002. The ejecta sheet generated by the impact of a drop. *Journal of Fluid Mechanics*, 451, 373-381.

Thoroddsen S.T, Etoh T.G, Takehara K. 2006. Crown Break up by Marangoni instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 557, 63-72.

Thoroddsen S.T, Etoh T.G and Takehara. 2008. High Speed Imaging of Drops and Bubles. *Annual. Review.of Fluid Mechanics*, 40, 257-285.

Tomé M.F, McKee S and Walters K. 2010. A computational study of some rheological influences on the “splashing experiment”.*Jornal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165, 1258-1264.

Vincent L, Xiao T, Yohann D, Jung S, Kanso E. 2018. Dynamics of water entry. *Journal Fluid Mechanics*, 846, 508-535.

Wang J, Lugni C, Faltinsen O.M. 2015. Experimental and numerical investigation of a freefall wedge vertically entering the wáter Surface. *Applied Ocean Research*, 51, 181-203.

Wendland H. 1995. Piecewiese polynimial, positive definite compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances on Computacional Mathematics*, 4, 389-396.

Wu W.T, Yang Y.M, and Maa J.R. 1995. Enhancement of Nucleate Boiling Heat Tranfer and Depression of Surface Tension by Surfactant Additives. *ASME Journal of Heat Transfer*, 117, 526-529.

RECURSOS ELECTRÓNICOS

[1] Recurso Electrónico: Tensión superficial, (2017) [en línea] Disponibilidad: <http://www.portalgraf.com/impresion/tension-superficial-del-agua-la-imprensa-offset-y-el-medio-ambiente>, (Fecha de consulta 19-Julio-2017).

[2] Recurso Electronico: Smoothed-Particle hydrodynamics (2019) [en-línea] Disponibilidad:

https://en.wikipedia.org/wiki/Smoothed-particle_hydrodynamics, (Fecha de consulta 20-Marzo-2019).