



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL UNIDAD OAXACA**

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de  
Recursos y Naturales

(INGENIERÍA)

**Tesis**

**Evaluación de la segregación estática en concreto autoconsolidable  
utilizando un dispositivo basado en la ley de Stokes**

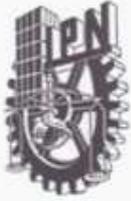
Para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:  
Juanito Carrasco Benítez

Directores de tesis:

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita  
Dr. Pedro Montes García

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Junio 2011.



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 02 del mes de JUNIO del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del Centro **Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **"Evaluación de la segregación estática en concreto autoconsolidable utilizando un dispositivo basado en la ley de Stokes "**

**Carrasco**  
Apellido paterno

**Benítez**  
materno

**Juanito**  
nombre(s)

Con registro: 

A	0	9	0	2	6	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

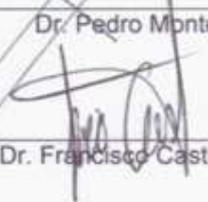
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

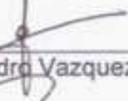
LA COMISION REVISORA  
Directores de tesis:

  
Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

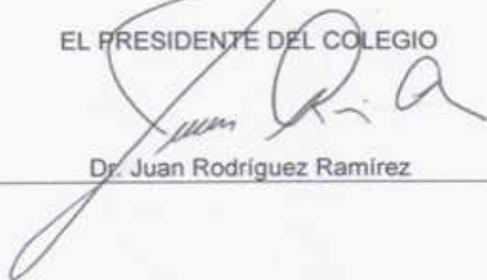
~~  
Dr. Pedro Montes Gracia~~

  
Dr. Andrés Pech Pérez

~~  
Dr. Francisco Castellanos León~~

  
Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
Dr. Juan Rodríguez Ramírez



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **02** del mes **junio del año 2011**, el (la) que suscribe **Juanito Carrasco Benítez** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A090266**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dres. Pedro Montes García y Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita y cede los derechos del trabajo titulado: **“Evaluación de la segregación estática en concreto autoconsolidable utilizando un dispositivo basado en la ley de Stokes”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación. Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradooax@ipn.mx](mailto:posgradooax@ipn.mx) ó [juanitocab@hotmail.com](mailto:juanitocab@hotmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

**Juanito Carrasco Benítez**



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

## **Resumen.**

En el presente trabajo se evaluó el desplazamiento de una partícula esférica para simular la segregación de agregados gruesos en concreto autoconsolidable. Para tal efecto se diseñó y construyó un dispositivo basado en la Ley de Stokes (DBLS) que permitió monitorear el movimiento de la partícula en fluidos opacos. Este dispositivo consta de un arreglo de poleas, un sistema para suspender una esfera, un sensor óptico para monitorear el desplazamiento de la esfera y un sistema de adquisición de datos. Se realizaron pruebas en pastas y morteros que contenían diferentes dosificaciones de aditivos superfluidificante y agente modificador de viscosidad para obtener la velocidad terminal de caída de la esfera. Los resultados indican que mediante el uso del DBLS fue posible simular el movimiento de un agregado grueso en pastas de cemento y morteros, determinar la dosificación de aditivos necesaria para garantizar un desplazamiento mínimo de dicha esfera en los fluidos. La información obtenida se utilizó para diseñar concretos los cuales se caracterizaron mediante las pruebas de extensibilidad y embudo en V, concluyendo que los concretos obtenidos poseen las características de flujo y resistencia a la segregación requeridos para este tipo de concreto.

### **Abstract.**

In the present study the displacement of a spherical particle, to simulate the segregation of coarse aggregate in self-compacting concrete, was evaluated. For this purpose, a Stokes' Law Based Device (SLBD), which allowed to monitor the movement of a particle in opaque fluids, was designed and built. This device contains an arrangement of pulleys, a system to suspend spheres, an optical sensor to monitor the spheres displacement, and a data acquisition system. Tests were performed on pastes and mortars containing different dosages of superplasticizer and viscosity modifying agent, in order to obtain the terminal velocity of the falling sphere. The results indicate that using the SLBD was possible to simulate the movement of an aggregate in cement pastes and mortars, and determine the dosage of additives necessary to ensure a minimum displacement of the sphere in the fluids. The obtained information was used to design concrete mixtures which were characterized by using the extensibility and V-funnel tests; as a result, concrete mixtures had adequate flow and segregation resistance characteristics required for this type of concrete.

## *Dedicatoria.*

*Dedico este trabajo a las personas que significan mucho en mi vida; a mi mamá Nicolasa Benítez Martínez, a mis hermanos Eleazar, Oswaldo y Jaime que han estado en esta etapa tan importante de mi vida. A mis abuelas Rutilia y Aurelia que siempre han estado en mi corazón.*

## *Agradecimientos.*

*Al Dr. Pedro Montes García por su apoyo, orientación y la experiencia compartida durante el desarrollo de este trabajo, además de conocimientos y horas que dedicó para llegar a buen término con este proyecto pero sobre todo por el apoyo recibido en la maestría.*

*Al Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita, por todo el apoyo que me ha brindado, por compartir todos sus conocimientos, tiempo y paciencia, pero sobre todas las cosas por brindarme su amistad y confianza.*

*Al Ing. Floriberto Díaz Díaz por el gran apoyo brindado en el diseño y construcción del dispositivo para monitorear el movimiento de las esferas en fluidos opacos.*

*A mis compañeros de la maestría en especial a Martha que compartimos tantos momentos de alegría y dificultades. A Luis Alberto, Eduardo, Diana Rocío, Elena Evelia, todos ellos que iniciamos esta maestría y caminamos juntos para llegar hasta la meta.*

*A mis compañeros del área de materiales para construcción especialmente Eddisson que compartimos gran parte de nuestro tiempo en el cubo, todas esas desveladas y fines de semana en el que trabajamos juntos. Fueron un gran apoyo sin duda alguna todos: Samuel, Fernando, Ulises, Frank Manuel, Erika y Filiberto. El maestro Valentín Juventino por los consejos y respaldo que me brindó durante*

*momentos difíciles, al maestro Rafael y al maestro Margarito por todos los consejos que me brindaron en el trabajo de laboratorio.*

*Para mi es también importante reconocer la amistad que me brindaron los maestros del área de mecánica, gracias al Maestro Bernabé por todos los consejos para poder desarrollar las distintas actividades en el taller y al maestro Reyes.*

*También para el área de ingeniería química que nunca tuvieron peros para apoyarme y a su generosa amistad que me brindaron en especial a la maestra Laura y la maestra Georgina.*

*Durante mi estancia en la maestría estuve rodeado de grandes personas que me brindaron su amistad y apoyo, que no me es imposible mencionar a todos, a los del área de mantenimiento, los jardineros, los del área de limpieza y las personas de seguridad, Gracias.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de maestría otorgada en el periodo del año 2008-2010.*

*A la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas (COFAA) del Instituto Politécnico Nacional, por la beca otorgada dentro del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI).*

*Al Conacyt y Herrozinc S. A. de C. V. por el apoyo al proyecto: Innovación y desarrollo de tecnologías para productos de concreto prefabricados, Clave 113169.*

*A la SSP del IPN por el apoyo otorgado al proyecto: Resonancia magnética nuclear para la evaluación no destructiva del desarrollo de propiedades mecánicas y refinamiento de porosidad en materiales basados en cemento, claves 20100391, 20110616y al proyecto: Estabilización química y mecánica del adobe compactado, claves 20090144, 20100266.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1.INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Antecedentes .....	3
1.4 Objetivo general .....	6
1.5 Objetivos específicos .....	6
1.6 Hipótesis.....	6
<b>CAPITULO 2. MARCO TEÓRICOY CONCEPTUAL</b> .....	7
2.1 Concreto autoconsolidable .....	7
2.2 Resistencia a la segregación.....	10
2.3 Ley de Stokes .....	10
2.4 Modelo de una partícula en un fluido Newtoniano.....	12
2.5 Partícula simple en un fluido plástico .....	13
2.6 Reología .....	14
2.6.1 Modelos reológicos para el concreto .....	15
2.6.2 Modelo plástico de Bingham .....	15
2.6.3 Modelo de Herschel–Bulkley.....	16
2.6.4 Sistema de esfera para la caracterización de fluidos conteniendo partículas en suspensión .....	18
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	21
3.1 Diseño Experimental.....	21
3.1.1 Fase 1. Movimiento de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes. ....	21
3.1.2 Fase 2. Diseño, construcción y validación de un dispositivo para evaluar la caída de una esfera en un fluido basado en la Ley de Stokes (DBLS) .....	22
3.1.2.1 Análisis comparativo de velocidades terminales obtenidas con y sin el DBLS .....	23
3.1.3 Fase 3. Estudio del movimiento de una esfera en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS.....	23
3.1.4 Fase 4. Evaluación de la segregación estática en concreto autoconsolidable (CAC) .....	24
3.2 Materiales y dispositivos utilizados .....	24
3.2.1 Fase 1. Movimiento de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes .....	24

3.2.2 Fase 2. Diseño y construcción del dispositivo basado en la ley de Stokes (DBLS) .....	26
3.2.2.2. Validación del DBLS en fluidos translúcidos .....	26
3.2.3 Fase 3. Estudio del movimiento de partículas en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS .....	27
3.2.3.1 Cemento .....	27
3.2.3.2 Caracterización de los aditivos.....	27
3.2.3.3 Caracterización del agregado fino.....	27
3.2.3.4 Dispositivos y Equipo. ....	28
3.2.4 Fase 4. Evaluación de la segregación del concreto autoconsolidable .....	29
3.2.4.1 Agregado grueso .....	30
3.2.4.2 Dispositivos para caracterización del concreto autoconsolidable.....	30
3.3 Metodología .....	31
3.3.1 Fase 1. Movimiento de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes .....	31
3.3.2 Fase 2. Diseño y construcción del dispositivo basado en la ley de Stokes (DBLS) .....	32
3.3.2.1 Validación del DBLS .....	32
3.3.3 Fase 3 Estudio del movimiento de partículas en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS .....	32
3.3.3.1 Obtención del punto de saturación del superfluidificante.....	32
3.3.3.2 Preparación de las pastas y morteros .....	34
3.3.3.3 Procedimiento de prueba.....	35
3.3.4 Fase 4. Evaluación de la segregación del concreto autoconsolidable .....	36
3.3.4.1 El procedimiento de mezclado.....	36
3.3.4.2 Prueba de capacidad de llenado y segregación .....	37
3.3.4.3 Prueba de extensibilidad .....	37
<b>CAPITULO 4. RESULTADOS</b> .....	38
4.1 Fase 1. Validación de la caída de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes.....	38
4.1.1 Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en agua .....	38
4.1.2 Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en glicerina.....	39
4.1.3 Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en miel de maíz .....	40
4.1.4 Análisis descriptivo y estadístico de los datos: .....	41
4.2 Fase 2. Diseño y construcción del dispositivo basado en la ley de Stokes (DBLS) .....	42

4.2.1 Análisis comparativo de velocidades terminales obtenidas con y sin el DBLS .....	43
4.3 Fase 3. Estudio del movimiento de partículas utilizando el DBLS en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico.....	45
4.3.1 Determinación del punto de saturación del aditivo superfluidificante y estudio del efecto del agente modificador de viscosidad en pastas de cemento .....	45
4.3.2 Determinación de la velocidad terminal de partículas en pastas y morteros de cementos portland .....	47
4.4 Fase 4 Evaluación de la segregación del concreto autoconsolidable.....	54
<b>CONCLUSIONES</b> .....	57
Recomendaciones.....	58
<b>REFERENCIAS</b> .....	59
<b>Anexo A</b> .....	62
A. Dispositivo Basado en la Ley de Stokes, partes y funcionamiento.....	63
A.1 Consideraciones generales del diseño y construcción del dispositivo .....	63
A.2 Procedimiento de ensamble del dispositivo .....	63
A.3 Sistema de adquisición de datos.....	63
A.4 Procedimiento de prueba del DBLS.....	65
A.5 Partes del Dispositivo basado en la ley de Stokes.....	65

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Comparación esquemática del proporcionamiento entre concreto auto-consolidable y concreto ordinario .....	8
<b>Figura 2.2</b> Método para lograr un concreto auto-consolidable. ....	9
<b>Figura 2.3.</b> Mecanismo para obtener la auto-compactación en el concreto. ....	10
<b>Figura 2.4.</b> Diagrama de fuerzas que actúan en la esfera. ....	11
<b>Figura 2.5</b> Modelo de Bingham, grafica de la ecuación y modelo reológico. ....	16
<b>Figura 2.6.</b> Gráfica de la ecuación de Herschel Bulkey y gráficas características para los diferentes tipos de concretos. ....	17
<b>Figura 2.7</b> Principio de un reómetro con el sistema de medición de esferas de acuerdo a Tyrach (2001). Esquema tomado de Leemann (2007). ....	18
<b>Figura 3.1.</b> Dispositivo DBLS. ....	26
<b>Figura 3.2.</b> Granulometría de la arena Banco Totolapan. MF=3.96 .....	28
<b>Figura 3.3.</b> Reómetro Anton Paar Physica MCR 301 con su sistema de esferas. ....	29
<b>Figura 3.4.</b> Curva granulométrica del agregado grueso .....	30
<b>Figura 3.5.</b> Embudo en V .....	31
<b>Figura 3.6.</b> Cono de Abrams .....	31
<b>Figura 3.7</b> Secuencia de mezclado de los materiales para la elaboración de pastas .....	34
<b>Figura 3.8.</b> Procedimiento de mezclado. ....	36
<b>Figura 4.1.</b> Comparación de la velocidad obtenida de las esferas de plástico en agua. ....	39
<b>Figura 4.2.</b> Comparación de la velocidad obtenida de las esferas de vidrio en glicerina. ....	40
<b>Figura 4.3.</b> Comparación de la velocidad obtenida de las esferas de acero en miel de maíz. ...	41
<b>Figura 4.4.</b> Diagrama de caja para la prueba de caída de esfera en agua. ....	41
<b>Figura 4.5.</b> Diagrama de caja para la prueba de caída de esfera en glicerina. ....	42
<b>Figura 4.6.</b> Diagrama de caja para la prueba de caída de esfera en miel de maíz. ....	42
<b>Figura 4.7.</b> Obtención del punto de saturación del aditivo Glenium. ....	46
<b>Figura 4.8.</b> Obtención del punto de saturación del aditivo Plastol 4000 .....	46
<b>Figura 4.9.</b> Obtención del punto de saturación del aditivo Eucon Precast. ....	46
<b>Figura 4.10.</b> Evaluación de la cantidad óptima del AMV con 6.5 ml de Glenium 3400 NV. .	47

<b>Figura 4.11.</b> (a) Desplazamiento de partículas en pastas con $a/c=0.5$ utilizando el DBLS para 5 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída.....	48
<b>Figura 4.12.</b> (a) Desplazamiento de partículas en pastas con $a/c=0.5$ utilizando el DBLS para 20 minutos después de mezclado, (b) Velocidad de caída.....	49
<b>Figura 4.13.</b> (a) Desplazamiento de partículas en pastas con $a/c=0.5$ utilizando el DBLS para 40 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída.....	49
<b>Figura 4.14.</b> (a) Desplazamiento de partículas en pastas con $a/c=0.55$ utilizando el DBLS para 5 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída.....	50
<b>Figura 4.15.</b> Desplazamiento de partículas en pastas con $a/c=0.55$ utilizando el DBLS para 20 minutos después de mezclado .....	50
<b>Figura 4.16.</b> (a) Desplazamiento de partículas en pastas con $a/c=0.55$ utilizando el DBLS para 40 minutos después de mezclado, (b) Velocidad de caída.....	51
<b>Figura 4.17.</b> (a) Desplazamiento de la esfera de acero en morteros con relación agua/cemento 0.5 y 0.55, (b) Velocidades de caída.....	52
<b>Figura 4.18.</b> (a) Desplazamiento de la esfera de vidrio en morteros con relación $a/c= 0.50$ y 0.55, (b) velocidades obtenidas.....	53
<b>Figura 4.19.</b> (a) Desplazamiento de esferas de acero y vidrio en morteros con relación $a/c=0.50$ y 0.55 en una columna de mortero de 35 cm con cantidad de AMV de óptimo-60%, (b) velocidades obtenidas.....	53
<b>Figura 4.20.</b> Extensibilidad del CAC con relación $a/c=0.50$ , conteniendo a) la cantidad óptima de AMV y b) la cantidad inferior de AMV optima-60 .....	54
<b>Figura 4.21.</b> Comportamiento del flujo de revenimiento y tiempo de paso en el embudo .....	55
<b>Figura 4.22.</b> Concreto autoconsolidable con la cantidad óptima de AMV en estado endurecido mostrando distribución homogénea de los agregados gruesos. ....	56
<b>Figura A.1.</b> Vista de la pantalla del programa Hyper Terminal durante la adquisición de datos .....	64
<b>Figura A.2</b> Partes del dispositivo. ....	68

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Diseño experimental para evaluar la velocidad de caída de una esfera en un fluido.....	22
<b>Tabla 3.2.</b> Diseño experimental para validar el DBLS.....	23
<b>Tabla 3.3.</b> Diseño experimental para las pruebas en pastas y mortero.....	24
<b>Tabla 3.4.</b> Diseño experimental para la evaluación de segregación del CAC.....	24
<b>Tabla 3.5.</b> Características de las esferas utilizadas en las pruebas de velocidad de caída.....	25
<b>Tabla 3.6.</b> Propiedades físicas de la arena.....	28
<b>Tabla 3.7.</b> Proporcionamientos de materiales utilizados para elaborar 50 litros de concreto...29	
<b>Tabla 3.8.</b> Propiedades del agregado grueso.....	30
<b>Tabla 3.9.</b> Detalles de los materiales utilizados para la obtención del punto de saturación del aditivo superfluidificante.....	33
<b>Tabla 3.10.</b> Detalles de los niveles del AMV.....	34
<b>Tabla 3.11.</b> Proporcionamientos para pastas a/c 0.50 y 0.55 para 10 litros.....	35
<b>Tabla 3.12.</b> Proporcionamientos para morteros a/c= 0.50 y 0.55 5 litros.....	35
<b>Tabla 3.13</b> Criterios de aceptación para concreto autoconsolidable.....	37
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en agua.....	38
<b>Tabla 4.2.</b> Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en glicerina.....	39
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en miel de maíz.....	40
<b>Tabla 4.4.</b> Pruebas comparativas de velocidad de caída en glicerina a 23.5 °C.....	43
<b>Tabla 4.5.</b> Pruebas comparativas de velocidad de caída glicerina a 31 °C.....	43
<b>Tabla 4.6.</b> Pruebas comparativas de velocidad de caída glicerina + agua con relación 3/1 a 17 °C.....	44
<b>Tabla 4.7.</b> Pruebas comparativa de velocidad de caída miel de maíz a 21 °C.....	43
<b>Tabla 4.8.</b> Pruebas comparativa de velocidad de caída miel de maíz a 35 °C.....	45
<b>Tabla 4.9.</b> Propiedades de las mezclas de concreto.....	54

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El beneficio del potencial del concreto fluido tal como el concreto autoconsolidable (CAC) es minimizar o eliminar el vibrado requerido para su colocación. Este concreto es capaz de fluir en el interior de la cimbra, pasando entre las barras de acero de refuerzo y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso (Okamura, 1997, Okamura y Ouchi 1999, Bui et al 2002, Ibrahim et al. 2003). Dado que presenta estas propiedades, también reduce el costo laboral (Nanthagopalan y Santhanam 2008). El CAC ha generado gran interés a nivel industrial debido a las oportunidades económicas que genera por reducir el trabajo y acelerar la construcción. Este concreto mejora la calidad y genera un ambiente amigable de trabajo (Lu et al. 2007).

Por otra parte, para lograr las características especiales de este concreto es necesario el uso de aditivos que son parte importantes e integrales del concreto. La alta fluidez se logra con el uso de aditivos superfluidificantes y para incrementar la estabilidad del concreto se requiere el uso de alto contenido de finos, aditivos modificadores de viscosidad (AMV) o la combinación de ambos (Santhanam 2006).

Por otro lado, es importante conocer las propiedades de flujo del concreto en estado fresco mediante pruebas reológicas, debido a que el esfuerzo de fluencia y la viscosidad determinará en gran medida su comportamiento durante el flujo y su resistencia a la segregación. El esfuerzo de fluencia aumenta conforme se añade arena a la pasta y aumenta más al añadir grava al mortero (Mahaut et al. 2008, Erdogan et al. 2008).

En el CAC la resistencia a la segregación juega un papel importante, el cual contribuye a la estabilidad de todas las partículas en el concreto. La segregación es la tendencia de las partículas a separarse debido a diferencias en densidades lo cual ocurre una vez colocado el concreto y antes de su fraguado (Shen et al. 2009). Para evitar esto, es necesario conocer la estabilidad del mismo mediante pruebas de resistencia a la segregación para asegurar un concreto homogéneo. Es por esto que es importante tener un método de prueba que permita evaluar la resistencia a la segregación estática del CAC en estado fresco.

## 1.1 Planteamiento del problema

La resistencia a la segregación del concreto juega un papel importante, debido a que una pobre resistencia a la segregación genera poca deformabilidad, bloqueo alrededor del acero de refuerzo, así también diferentes resistencias a la compresión del concreto, sin embargo hay pocas publicaciones dedicados a los métodos para ensayar la resistencia a la segregación (Bui et al. 2002).

La segregación puede aumentar la porosidad en las estructuras y como consecuencia también la permeabilidad del concreto ante agentes agresivos. Además generará un cuerpo heterogéneo al haber partes con gran contenido de pasta y otras con alto contenido de agregados. Esta heterogeneidad aumenta la probabilidad de ocasionar gradientes de tensión interna, agrietamiento y porosidad (Roussel et al. 2007).

La segregación puede afectar a las propiedades de transporte y la durabilidad del concreto. Existe pocos estudios realizados para determinar el efecto de la resistencia a la segregación en la durabilidad del CAC, un estudio reciente ha indicado que la absorción de agua y la penetración de cloruro en el CAC que pueden ser afectados en virtud a una baja de la resistencia a la segregación. Sin embargo, son necesarias nuevas investigaciones para investigar el papel de la resistencia segregación sobre la durabilidad del CAC (Safiuddin et al. 2008).

Se ha utilizado agregados ligeros con diferentes densidades para estudiar la resistencia a la segregación. Los resultados obtenidos indican que se mejora la fluidez del concreto, pero de la misma manera la capacidad de resistencia a la segregación disminuye. Por otro lado, la diferencia de densidad del agregado grueso no afecta la capacidad de llenado. La resistencia a la compresión a los 28 días disminuye por el reemplazo de un 75% y 100 % de material ligero en un 10% y 20% respecto al uso agregado normal (Kima et al. 2009).

## **1.2 Justificación.**

Al tener un método que nos permita evaluar la resistencia a la segregación en pastas y morteros se podrá inferir el comportamiento de los agregados gruesos en el concreto, de esta manera no se requerirán necesariamente de la fabricación de mezclas de concreto para evaluar su resistencia a la segregación. Se podrá simular el movimiento de los agregados pétreos cuando el concreto está en reposo y conocer su resistencia a la segregación, basado principalmente en la caracterización de pastas de cemento y mortero.

Los CAC con alta resistencia a la segregación darán por resultado una estructura poco permeable y homogénea que ayudará a evitar el ingreso de agentes agresivos que puedan deteriorar su calidad e iniciar el deterioro. Al tener estructuras durables, se evita el consumo de cemento para reemplazar estructuras deterioradas, no se generan gases como el CO<sub>2</sub> que son liberados en el proceso de fabricación del cemento, con esto se mejora la calidad de vida humana evitando el efecto invernadero.

## **1.3 Antecedentes**

Shen et. al 2009 evaluaron la segregación estática midiendo el cambio de contenido de agregado grueso y utilizaron agregados esféricos para facilitar el cálculo. Debido a que la forma esférica es la misma para todos los agregados y solo varían los tamaños los agregados, el movimiento de estos fueron en la misma dirección, de tal manera que la segregación obtenida no refleja la realidad y por otro lado la velocidad de flujo generan segregación dinámica.

Para evaluar las estabilidad y las interacciones en el CAC (Bethmont et al., 2008) desarrollaron un dispositivo experimental con el fin de destacar y cuantificar los efectos combinados de los agregados gruesos pero no lograron explicar el efecto de la sedimentación.

Se han realizado estudios del efecto de la forma y rugosidad de las partículas en las propiedades reológicas de suspensiones de cementantes (Erdogan et al. 2008). Se observó la

forma del agregado afecta el comportamiento reológico del concreto. El estudio fue realizado utilizando agregados elaborados con mortero con formas esféricas y cuadradas con bordes redondeados con el objeto de obtener las gravedades específicas parecidas a la pasta. Se observó que la forma de los agregados muestra mayor efecto en la viscosidad plástica que la rugosidad en la fracción de volumen utilizada.

Dolz et al., en el (2003) diseñaron un montaje experimental que permite la medida directa de la fuerza de fricción que actúa sobre una esfera sumergida en un líquido en movimiento con números de Reynolds bajos usando una balanza electrónica. Mediante este experimento se demuestra la relación de proporcionalidad directa entre la fuerza y cada una de las variables implicadas (velocidad relativa esfera-fluido, radio de la esfera y viscosidad del fluido).

En el 2010 Nanthagopalan y Santhanam utilizaron un dispositivo para evaluar la dosis óptima de AMV a utilizar. Concluyeron que la dosis óptima para diferentes relaciones agua/cemento fue cuando la pasta comenzó a resistir el movimiento hacia abajo de caída de la esfera y que es posible evaluar la cantidad óptima de AMV mediante el uso del dispositivo de la esfera.

Abril y Vargas (n.d.) realizaron un trabajo de diseño y construcción de un viscosímetro de caída de esfera. Encontraron experimentalmente dos constantes para cada una de las esferas evaluadas; dichos valores al ser multiplicados por la ecuación propia del viscosímetro proporciona resultados de viscosidad dinámica muy confiables estadísticamente para ciertos rangos de viscosidad dinámica.

Bilgil en 2004 hallaron una relación entre la viscosidad y la segregación, mientras mayor es la viscosidad aumenta la resistencia a la segregación pero en general el principal parámetro para efectos de segregación es la relación entre los materiales utilizados en la elaboración del concreto fresco.

El movimiento que experimenta la esfera es de una fuerza resistiva que es explicado mediante la Ley de Stokes, pero esta ley se explica algunas veces de forma introductoria a

estudiantes y se presenta en su forma final y sin ninguna verificación experimental debido a la dificultad que representa (Dolz et al. 2003).

Cardenas et al. en el 2004, evaluaron mediante pruebas de caída variando la densidad de una esfera de ping-pong y se observaron que la velocidad de caída de la esfera varía con el cambio de densidad, si la densidad de la esfera es menor a la del fluido, la esfera genera un movimiento ascendente y si es mayor ocurre lo contrario, todas las pruebas son válidas cuando el número de Reynolds es menor a 0.1.

## **1.4 Objetivo general**

Estudiar la sedimentación de una partícula en pastas de cemento y morteros, con el objeto de evaluar la resistencia a la segregación estática de concreto autoconsolidable mediante el uso de un dispositivo basado en la ley de Stokes.

## **1.5 Objetivos específicos**

- Diseñar, construir y validar un dispositivo basado en la Ley de Stokes.
- Determinar mediante pruebas reológicas el punto de saturación de los aditivos super-plastificantes.
- Estudiar del movimiento de partículas utilizando el DBLS en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico.
- Evaluarla segregación del concreto auto-consolidable mediante las pruebas en estado fresco con el embudo en V y cono de Abrams.

## **1.6 Hipótesis**

Mediante el uso del dispositivo que se basa en la ley de Stokes para caracterizar pastas de cemento y mortero, es posible determinar la resistencia a la segregación de CAC.

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICOY CONCEPTUAL**

### **2.1 Concreto autoconsolidable**

El CAC resulta de investigaciones realizadas en concretos bajo el agua que se utilizó para rellenar áreas inaccesibles, y se define como un material capaz de fluir en el interior de la cimbra, rellenando de forma natural el volumen del mismo, pasando entre las barras de acero de refuerzo y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso sin compactación interna o externa (Ken 2006).

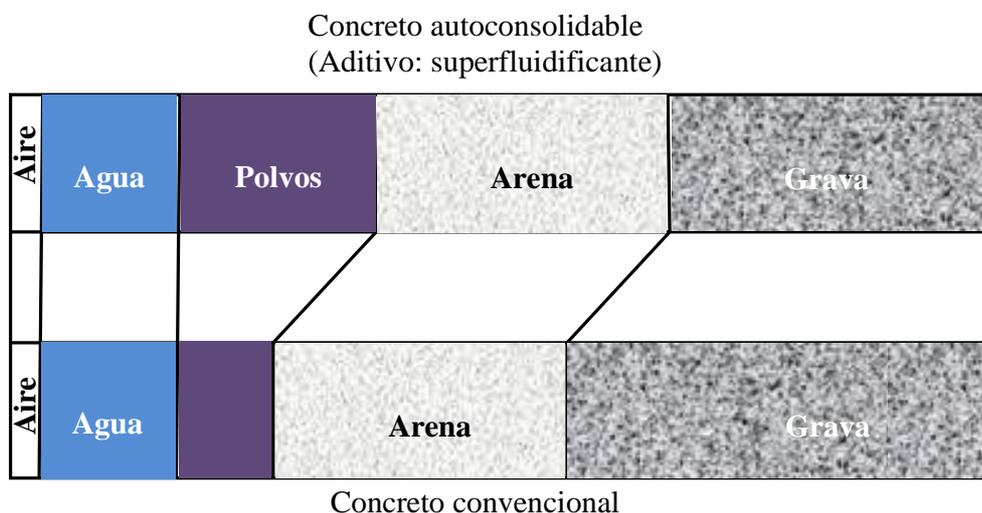
Los primeros estudios del concreto autoconsolidable empezaron en Japón en la época de los 80's, usando los materiales existentes en el mercado (Okamura, 1997). Este concreto mostró resultados satisfactorios tanto en su estado fresco como después de fraguado, las características que presentó el concreto autoconsolidable fueron:

- En su estado fresco, auto-consolidación.
- A edad temprana, evitar los defectos iniciales.
- En su estado endurecido, protección contra de agentes agresivos externos.

Actualmente la investigación sobre concreto autoconsolidable se ha incrementado tanto en el conocimiento de sus propiedades reológicas (Roussel, 2009), mecánicas, de durabilidad, estabilidad volumétrica, presión sobre las cimbras (Leemanet al., 2006) como del desarrollo de métodos para diseño. Un método para obtener la propiedad de autoconsolidable es incrementar significativamente la cantidad de finos (Okamura, 1997). Otro método consiste en utilizar agentes modificadores de viscosidad para aumentar la estabilidad del concreto (Rols et al., 1999). También es posible utilizar una combinación de los dos primeros métodos.

Encontrar un método para poder lograr un concreto autoconsolidable no solamente involucra obtener un alto grado de deformabilidad de las pastas o del mortero, sino también de una resistencia a la segregación entre el agregado grueso y el mortero cuando este fluye a través del armado del acero de refuerzo.

La proporción en la que se mezclan los ingredientes para concreto autoconsolidable cambia con respecto al concreto ordinario. La figura 2.1 muestra de manera esquemática los volúmenes que ocupan los ingredientes en ambos tipos de concreto.



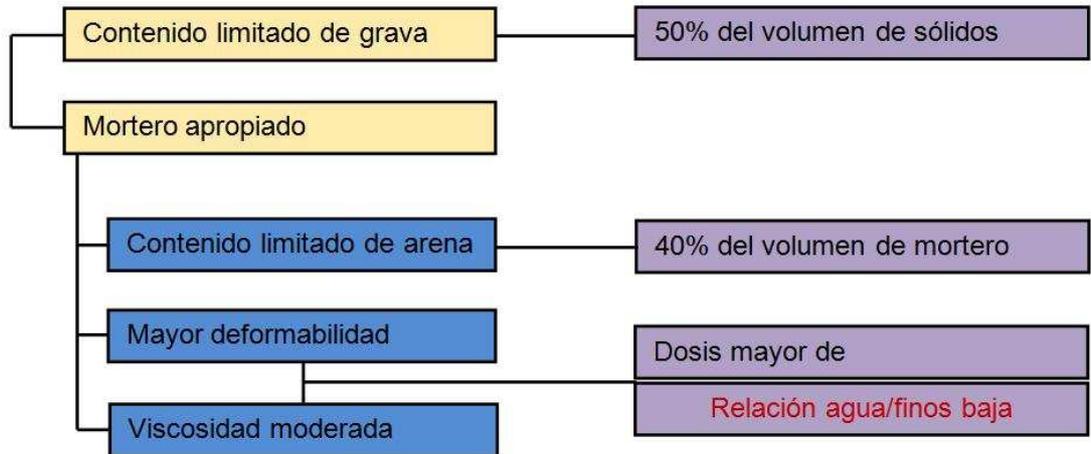
**Figura 2.1** Comparación esquemática del proporcionamiento entre concreto autoconsolidable y concreto ordinario

Se observa que el concreto autoconsolidable típico requiere un menor contenido de agregado grueso y un mayor contenido de pasta de cemento que el concreto ordinario.

Okamura and Ouchi (2003) desarrollaron el método mostrado en la Figura 2.2 para lograr un concreto autoconsolidable.

Puede observarse que se requiere:

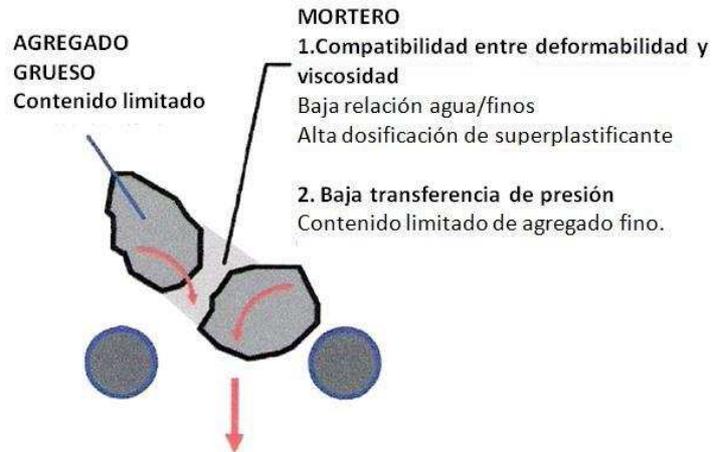
- 1.- Contenido limitado de agregado
- 2.- Baja relación agua/materiales cementantes.
- 3.- Uso de superfluidificante (reductor de agua de alto rango)



**Figura 2.2** Método para lograr un concreto autoconsolidable.

Es importante considerar que la frecuencia de la colisión y contacto entre las partículas del agregado puede incrementar a medida que la distancia entre partículas disminuye, y el esfuerzo interno incrementa cuando el concreto es deformado, particularmente cerca de obstáculos. La energía requerida para fluir es consumida por el incremento de esfuerzos internos, resultando en un bloqueo de las partículas del agregado. Limitando el contenido de agregado grueso cuyo consumo de energía es particularmente intenso, a un nivel menor de lo normal es efectivo para evitar este tipo de bloqueos.

También se requiere una pasta altamente viscosa para evitar los bloqueos del agregado grueso cuando el concreto fluye a través de obstáculos (Figura 2.3). Cuando el concreto es deformado, la pasta con alta viscosidad previene el incremento de esfuerzos internos debidos a la aproximación entre las partículas del agregado grueso. La alta deformabilidad puede ser lograda solo mediante el empleo de superfluidificante manteniendo una baja relación agua/materiales cementantes.



**Figura 2.3.** Mecanismo para obtener la auto-compactación en el concreto.

## 2.2 Resistencia a la segregación

Existe una clara distinción filosófica entre el fluido y el concreto autoconsolidable, aunque en la práctica no hay una línea divisoria entre los dos. La diferencia es el mecanismo por el cual la resiste a la segregación el CAC, y es que tiene un mecanismo de cohesión de la fracción de mortero en contraste con el concreto ordinario, pero si el diseño de mezcla no es adecuado, los agregados gruesos tienden a separarse cuando el concreto se encuentra en reposo (Ken 2006).

## 2.3 Ley de Stokes

Esta ley establece que la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento de una esfera a través de un fluido, es proporcional a la viscosidad del fluido, al diámetro de la esfera y a la velocidad de la misma en el seno del fluido. Un cuerpo alcanza la velocidad terminal cuando no puede aumentar su velocidad al anularse la fuerza gravitatoria con la fuerza resistiva del medio; así queda en un estado de movimiento uniforme (Ver figura 2.4).

Stokes estudió el flujo de un fluido alrededor de una esfera para valores del número de Reynolds muy pequeños y encontró que la fuerza de arrastre ejercida sobre la esfera por el flujo del fluido alrededor de ella es:

$$R = 3\pi d\eta v \quad \text{Ecuación.1}$$

Donde:

R: fuerza de arrastre.

d: diámetro

v: velocidad límite de la esfera en el fluido.

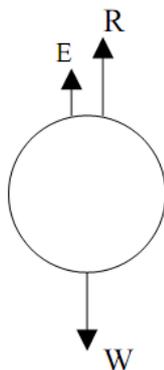
$\eta$ : Viscosidad dinámica

Cuando la velocidad de la partícula es baja, la fuerza de arrastre es controlada comúnmente por la viscosidad del fluido, este tipo de velocidades es caracterizado como flujo laminar cuando  $Re < 0.1$  (Byron et al. 1992 p. 221), para altas velocidades se genera turbulencias y son caracterizados como flujo turbulento  $Re > 2 \times 10^5$ , el criterio que define este tipo de flujos es denominado Número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{dv\rho_l}{\eta} \quad \text{Ecuación 2}$$

Al caer una esfera de un fluido en reposo, debe tenerse en cuenta que al alcanzar una velocidad de caída constante, la fuerza de empuje hidrostática más la fuerza de arrastre debe ser igual al peso, es decir:

$$E = R + W \quad \text{Ecuación (3)}$$



Donde:

W: peso del cuerpo.

R: fuerza de arrastre.

E: empuje hidrostático.

**Figura 2.4.** Diagrama de fuerzas que actúan en la esfera.

$$W = \rho_s \cdot g \cdot Vol \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$E = \rho_l \cdot g \cdot Vol \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

$\rho_s$ : Densidad del sólido

$\rho_l$ : Densidad del líquido.

$Vol$ : es el volumen del cuerpo.

Volumen de un cuerpo esférico

$$Vol = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \quad \text{Ecuación (6)}$$

#### 2.4 Modelo de una partícula en un fluido Newtoniano

Cuando una partícula esférica es suspendida en un líquido en reposo experimenta dos fuerzas: fuerza de flotabilidad o empuje hidrostático y la fuerza viscosa resistente, si la densidad de la partícula es mayor que la densidad del fluido, esta se sedimentará y estará expresado por la ecuación 7.

Despejando R de la ecuación 3 y sustituyendo los valores de las ecuaciones 4,5 y 6 queda de la siguiente manera:

$$R = \frac{\pi \cdot d^3 g (\rho_s - \rho_l)}{6} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Igualando la ecuación 1 con la ecuación 7.

$$3\pi d\eta v = \frac{\pi \cdot d^3 g (\rho_s - \rho_l)}{6} \quad \text{Ecuación (8)}$$

La velocidad terminal de una partícula en un fluido donde el efecto de pared es despreciado, se puede encontrar al despejar la velocidad de caída  $v$  de la ecuación 8, queda de la siguiente manera.

$$V = \frac{d^2 g (\rho_s - \rho_l)}{18\eta} \quad \text{Ecuación (9)}$$

## 2.5 Partícula simple en un fluido plástico

En las ecuaciones anteriores se asumió que el fluido es Newtoniano y ya que no es aplicable para fluidos no-Newtonianos, se hace una modificación a la Ley de Stokes para evaluar la caída en las pastas de cemento ya que pertenece a los fluidos no-newtonianos y frecuente mente es descrita por el modelo de Bingham (Ver ecuación 20).

Para el desplazamiento de una partícula en un fluido plástico, la viscosidad aparente es ( $\tau/\dot{\gamma}$ ) esta produce la fuerza de arrastre  $R$ ,  $\eta$  de la ecuación 1 requiere ser reemplazado por la viscosidad aparente para la apropiada velocidad de deformación, si se divide cada parte de la ecuación 20 por la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), se le provee a la expresión de flujo de la viscosidad aparente de un fluido plástico.

$$\eta_{ap} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_{pl} \quad \text{Ecuación 10}$$

Reemplazando  $\eta$  de la ecuación 1 con  $\eta_{ap}$  se obtiene la fuerza de arrastre en el fluido plástico.

$$R = 3\pi d v \left( \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_{pl} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de corte alrededor de la partícula puede ser estimada como la velocidad  $v$  dividida por el diámetro de la partícula  $d$ , sustituyendo esta expresión en la ecuación 11 tenemos.

$$R = 3\pi d v \left( \frac{d\tau_0}{v} + \eta_{pl} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Cuando la fuerza de arrastre  $R$  de la ecuación 11 llega a ser igual a  $R$  de la ecuación 7, el lado derecho de la ecuación 12 puede ser igualado con  $R$  de la ecuación 7 quedando de la siguiente manera.

$$3\pi d v \left( \frac{d\tau_0}{v} + \eta_{pl} \right) = \frac{\pi d^3 g(\rho_s - \rho_l)}{6} \quad \text{Ecuación 13}$$

A partir de la ecuación 13 se sigue el procedimiento mostradas en las ecuaciones 14- 18 para obtener la velocidad terminal en un fluido plástico.

$$3\pi d v \left( \frac{d\tau_0 + n_{pl} v}{v} \right) = \frac{\pi d^3 g(\rho_s - \rho_l)}{6} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$3\pi d (d\tau_0 + n_{pl} v) = \frac{\pi d^3 g(\rho_s - \rho_l)}{6} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$d\tau_0 + n_{pl} v = \frac{\pi d^3 g(\rho_s - \rho_l)}{18\pi d} = \frac{d^2 g(\rho_s - \rho_l)}{18} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$n_{pl} v = \frac{d^2 g(\rho_s - \rho_l)}{18} - d\tau_0 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$n_{pl} v = \frac{d^2 g(\rho_s - \rho_l) - 18d\tau_0}{18} \quad \text{Ecuación 18}$$

La ecuación 19 de velocidad de caída, es una modificación mostrada por Shen et al., 2009, ya que la presenta carece de consistencia de unidades de velocidad.

$$v = \frac{d^2 g(\rho_s - \rho_l) - 18d\tau_0}{18n_{pl}} \quad \text{Ecuación 19}$$

## 2.6 Reología

La reología estudia el flujo y deformación de la materia sometidos a esfuerzos externos (Steffe 1992), la reología del concreto es una ciencia relativamente nueva; la medición de las propiedades reológicas del concreto son importantes para la industria de la construcción debido a que el concreto es colocado en su estado fluido, pero dada la compleja composición de materiales del concreto no permite establecer un método exacto para predecir su flujo.

Los líquidos y suspensiones diluidas pueden ser clasificados en 4 grandes categorías según sus propiedades las cuales son: a) Newtonianos, b) no-Newtonianos con comportamiento independiente del tiempo, c) no-Newtonianos con comportamiento dependiente del tiempo (a esta clasificación pertenece el CAC) y d) visco elásticos.

### **2.6.1 Modelos reológicos para el concreto**

Los modelos reológicos son relaciones matemáticas que nos permiten caracterizar la naturaleza de los fluidos y estudian la deformación a una tasa de corte específica.

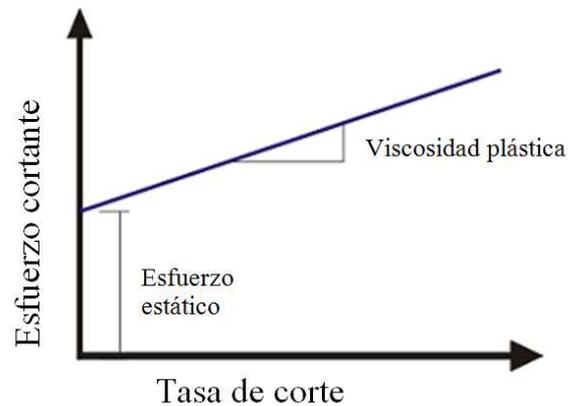
### **2.6.2 Modelo plástico de Bingham**

Los materiales basados en cemento se comportan como fluidos con un esfuerzo de fluencia, el cual es el mínimo esfuerzo para que ocurra el flujo. El comportamiento del concreto fresco es por lo tanto a menudo aproximado por el modelo de Bingham (Yahia and Khayat, 2003):

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte (Pa)  $\tau_0$  es el esfuerzo de fluencia o de deformación inicial (Pa),  $\mu_p$  es la viscosidad de corte ( $s^{-1}$ ), y  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de corte (Pa·s).

El modelo de Bingham es un modelo complejo y es la combinación de la ley de Newton y de Hooke acoplado a un carril de rozamiento que se denomina elemento de Saint Venant como se muestra en la Figura 2.5.



**Figura 2.5** Modelo de Bingham, grafica de la ecuación y modelo reológico.

Desde un punto de vista práctico, el esfuerzo de fluencia puede ser asociado con la capacidad de llenado y, de manera más general, si el concreto fluirá o no bajo un esfuerzo aplicado, mientras que la viscosidad plástica puede ser asociada con la velocidad a la cual un concreto dado fluirá una vez que el flujo es iniciado (Roussel, 2009).

El fluido Plástico de Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda el valor mínimo  $\tau_y$ . A partir de este punto el cambio en el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte y la constante de proporcionalidad es la viscosidad plástica ( $\mu_p$ ).

### 2.6.3 Modelo de Herschel–Bulkley

Otro modelo que describe el comportamiento de materiales basados en cemento es el de Herschel-Bulkley (HB), similar al de Bingham, excepto por la adición de un exponente a la velocidad de corte (Yahia and Khayat, 2003).

$$\tau = \tau'_0 + a\dot{\gamma}^b \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde  $a$  es la consistencia y  $b$  es un exponente que representa la desviación del comportamiento del modelo de Bingham, son constantes relacionadas con las propiedades del concreto que son el resultado de los datos graficados de la pruebas reológicas. Este modelo describe un fluido con esfuerzo de fluencia y una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y

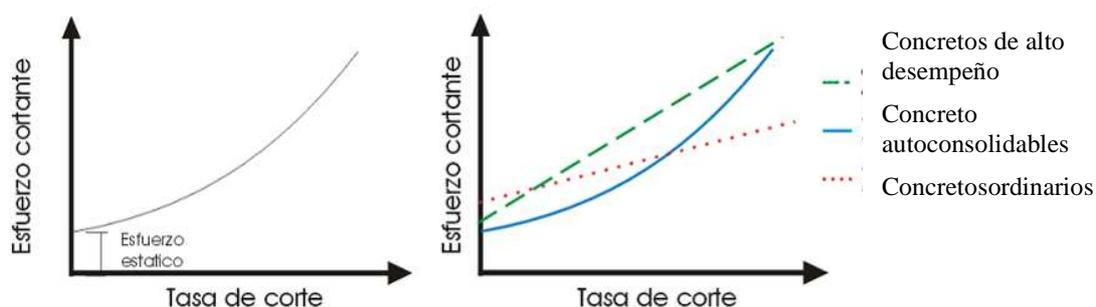
la velocidad de corte. Cuando el exponente (n) es menor o mayor de 1, el fluido exhibe comportamiento de fluido adelgazante o espesante, respectivamente. Cuando n=1 el modelo de Herschel-Bulkley es igual al modelo de Bingham donde la consistencia puede representar la viscosidad plástica.

El modelo de HB es el modelo más aceptado por varios investigadores (Lu et al. 2007, Bilgil et al. 2004). Sin embargo la viscosidad plástica no puede ser calculada de manera directa mediante la ecuación de HB ya que solo calcula el esfuerzo de fluencia, por lo tanto la viscosidad se calcula mediante la ecuación 22.

$$\mu = \frac{3a}{b+2} \gamma_{max}^{b-1} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:  $\mu$  es la pendiente de la línea de la gráfica,  $\gamma_{max}^{b-1}$  es la velocidad máxima de deformación de corte obtenida durante la prueba, a y b son los parámetros calculados por la ecuación de HB (Bilgil et al. 2004).

La Figura 2.6 muestra el comportamiento del fluido de acuerdo al modelo de Herschel – Bulkley (HB).

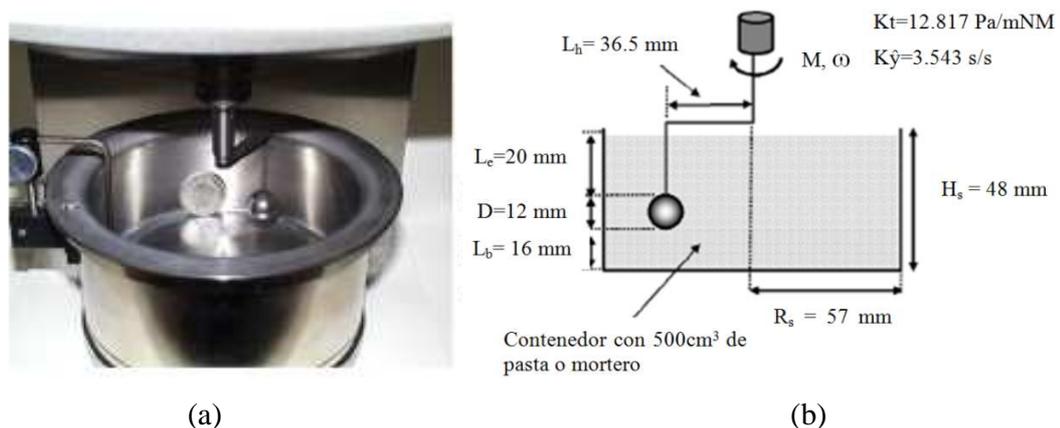


**Figura 2.6.** Gráfica de la ecuación de HerschelBulkley y gráficas características para los diferentes tipos de concretos.

## 2.6.4 Sistema de esfera para la caracterización de fluidos conteniendo partículas en suspensión

El reómetro Anton Paar Physica MCR 301 utilizado, emplea un sistema de esferas desarrollado especialmente para pastas y morteros (Physica, 1999). Permite la medición de suspensiones con un tamaño máximo de partículas de 4 mm y también es utilizado en otros campos como el flujo de materiales (Schatsmann, 2003).

El principio de medición de este sistema se muestra en la Figura 2.7 En lugar de un flujo laminar como en otras geometrías como placa-placa o cilindros concéntricos, se produce un flujo de desplazamiento por una esfera rotando excéntricamente. La esfera se mueve en el fluido a lo largo del límite del contenedor cubriendo un segmento de aproximadamente 300°. Durante este movimiento la velocidad de la esfera se incrementa y se mide el torque.



**Figura 2.7**(a) Foto del sistema de medición de esfera del reómetro, (b) características del sistema de medición de acuerdo a Tyrach (2001). Esquema tomado de Leemann (2007).

De acuerdo a Physica (1999) y Schatsmann (2003), las ecuaciones que gobiernan el sistema de medición de esferas son como sigue.

El movimiento de la esfera a través de un fluido Newtoniano para números de Reynolds  $Re < 1$  se pueden expresar por la ecuación de Stokes, asumiendo que la ecuación de Stokes es también válida en el caso de un fluido no-Newtoniano como la pasta de cemento o mortero:

$$F = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v \cdot D \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde  $F$  es la fuerza;  $\eta$  es la viscosidad dinámica del fluido;  $v$  es la velocidad de la esfera; y  $D$  es el diámetro de la esfera.

El torque y la velocidad de la esfera están dadas por:

$$M = F \cdot L_h \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$v = \omega \cdot L_h \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde  $M$  es el torque;  $L_h$  es la distancia entre la esfera y el centro del contenedor; y  $\omega$  es la velocidad angular.

De la ecuación (24) el torque  $M_1$  está dado como sigue:

$$M_1 = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \omega \cdot D \cdot L_h^2 \quad \text{Ecuación (26)}$$

De la auto-rotación de la esfera resulta un torque adicional  $M_2$ :

$$M_2 = \pi \cdot \eta \cdot \omega \cdot D^3 \quad \text{Ecuación (27)}$$

El torque total  $M$  es

$$M = M_1 + M_2 = \pi \cdot \eta \cdot \omega \cdot (3 \cdot L_h^2 \cdot D + D^3) \quad \text{Ecuación (28)}$$

La viscosidad dinámica está dada por:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Ecuación (29)}$$

De las ecuaciones (28) y (29) la relación lineal para velocidad de cortante y esfuerzo cortante se deriva

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi \cdot \tau}{M} \cdot (3 \cdot D \cdot L_h^2 + D^3) \cdot \omega = K_{\dot{\gamma}} \cdot \omega \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{\pi \cdot \omega} \cdot \frac{1}{3 \cdot D \cdot L_h^2 + D^3} \cdot M = K_{\tau} \cdot \omega \quad \text{Ecuación (31)}$$

Esta relación lineal fue verificada por Tyrach (2001) usando diferentes soluciones de polímeros. Los factores de proporcionalidad están relacionados con la geometría del sistema (influencia de la barra delgada que sostiene la esfera, la pared y fondo del contenedor, etc.).

El sistema de medición de esferas tiene varias ventajas comparadas con sistemas convencionales (por ejemplo cilindros concéntricos o placa-placa), cuando se usa para materiales de construcción: deslizamiento en la pared y la sedimentación inducida por cortante se minimizan.

## **CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 Diseño Experimental**

El concreto autoconsolidable está conformado por una mayor cantidad de pasta comparada con el concreto ordinario (Ver figura 2.1), de manera que se minimiza el contacto directo entre los agregados pétreos. Por otra parte, las propiedades reológicas de la pasta tienen una gran influencia en las características de flujo y resistencia a la segregación de este tipo de concreto. Suponiendo que se mantiene constante la cantidad de pasta y las proporciones de los agregados pétreos, es válido suponer que obteniendo una pasta o un mortero con las propiedades reológicas adecuadas nos permitirán a su vez producir concreto autoconsolidable. El trabajo de laboratorio requerido para obtener una pasta adecuada es menor que el necesario para obtener un mortero y la obtención de este requiere menor esfuerzo que la obtención de concreto autoconsolidable. Es por esto que en este trabajo se evaluó el desplazamiento de una partícula en pastas y morteros las cuales son partes importantes del concreto autoconsolidable. Conociendo las velocidades de partículas en pastas y morteros podremos inferir el comportamiento de los agregados en el concreto final elaborado.

#### **3.1.1 Fase 1. Movimiento de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes.**

Para estimar la velocidad de caída de una esfera en un fluido se utilizaron esferas con diversas dimensiones y densidades, y los fluidos que se utilizaron fueron agua, glicerina y miel de maíz. Dependiendo del tipo de fluido se seleccionaron el número de niveles y características dimensionales y densidad de las esferas, ya que es de esperarse que en fluidos más viscosos disminuya la variabilidad de los resultados.

En el caso de la caída de las esferas en agua se utilizaron 12 niveles con 3 réplicas, esto con el fin de poder analizar los datos estadísticamente. Las esferas utilizadas fueron de plástico debido a que materiales con densidades mayores no permiten medir el tiempo de caída con exactitud, debido a las altas velocidades de caída.

Para la glicerina se utilizaron 8 niveles y esferas de vidrio para evitar el fenómeno de flotación se descartaron las esferas de plástico, debido a que éstas tienen densidades menores a la de la glicerina.

Finalmente, para las pruebas en miel de maíz, la cual tiene viscosidad elevada, se decidió utilizar esferas de aceros con diámetros pequeños. En la Tabla 3.1 se presenta el diseño experimental para esta fase.

**Tabla 3.1.** Diseño experimental para evaluar la velocidad de caída de una esfera en un fluido.

Fluido	Variables	Niveles	Respuesta
Agua	Peso	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	Velocidad terminal
	Volumen		
	Diámetro		
Glicerina	Peso	1,2,3,4,5,6,7,8	
	Volumen		
	Diámetro		
Miel de maíz	Peso	1,2,3,4	
	Volumen		
	Diámetro		

### 3.1.2 Fase 2. Diseño, construcción y validación de un dispositivo para evaluar la caída de una esfera en un fluido basado en la Ley de Stokes (DBLS)

La necesidad de evaluar el desplazamiento de partículas en fluidos opacos condujo al diseño y construcción de un dispositivo basado en la Ley de Stokes. El dispositivo fue diseñado de tal manera que fuera fácil de maniobrar y trasladar, por lo cual es un dispositivo compacto en el que se pueden realizar pruebas en pastas y morteros.

Para lograr el diseño final del dispositivo, se pasaron varias pruebas que permitieron definir las partes adecuadas y con mejor desempeño para las pruebas. Los detalles de la construcción de este dispositivo se muestran en el anexo 1.

### 3.1.2.1 Análisis comparativo de velocidades terminales obtenidas con y sin el DBLS

Con el objeto de validar los resultados del DBLS se realizaron pruebas comparativas de caída de esfera de manera manual. Éstas pruebas se llevaron a cabo en fluidos translúcidos que permitieron observar el desplazamiento de la esfera; los fluidos utilizados fueron glicerina comercial y miel de maíz marca Karo® a diferentes temperaturas con la finalidad de observar el cambio de caída al variar la viscosidad de los fluidos. En estas pruebas se tomó el tiempo que tomaba la esfera en desplazarse una distancia de 20 cm y con el valor obtenido se calculó la velocidad terminal. Se realizaron 11 réplicas para las pruebas en glicerina a 23.5 °C y 8 réplicas para 31 °C, 7 réplicas para las pruebas en glicerina + agua, 16 réplicas para las pruebas en miel de maíz a 21 °C y 11 réplicas a 35 °C, ver tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Diseño experimental para validar el DBLS.

Fluido	Temperatura (°C)	Niveles	Respuesta
Glicerina	23	2	Velocidad terminal
	31		
Miel de maíz	21	2	
	35		
Agua+glicerina	17	1	

### 3.1.3 Fase 3. Estudio del movimiento de una esfera en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS

En esta fase se considera el análisis de las velocidades de caída de una esfera en pastas y morteros de cemento con relaciones agua/cemento de 0.5 y 0.55. Para evaluar el movimiento de la esfera en las mezclas, ya sea pastas o morteros, se utilizó el DBLS desarrollado en la fase anterior. En la Tabla 3.3 se presenta los detalles del experimento en forma resumida.

**Tabla 3.3.** Diseño experimental para las pruebas en pastas y mortero.

<b>Variab</b> les	<b>Niveles</b>	<b>Resultados</b>
Relación agua/cemento	0.50 y 0.55	Velocidad de caída (cm/s)
AMV	VO, VO-20%	
VO=valor óptimo de AMV, VO-20%=valor óptimo menos 20% de AMV. En el caso de morteros se consideró adicional a lo anterior el valor óptimo menos 60% de AMV, con el objeto de observar el movimiento de la esfera.		

Debido a la diferencia de viscosidades entre pastas y morteros el movimiento de las partículas fue significativamente diferente, por lo tanto para el caso de las pastas se hicieron tres repeticiones en cada nivel, y para los morteros solo una.

#### **3.1.4 Fase 4. Evaluación de la segregación estática en concreto autoconsolidable (CAC)**

En la Fase 4 de esta investigación se utilizó todo el conocimiento generado en las fases anteriores para la evaluación del fenómeno de la segregación estática del agregado grueso de dos mezclas de concreto autoconsolidable. Las relaciones a/c utilizadas en esta fase fueron idénticas a aquellas caracterizadas en pastas y morteros de la Fase 3. Para la caracterización de la segregación estática se llevaron a cabo las pruebas de capacidad de llenado, segregación y de extensibilidad. Los detalles del experimento se muestran en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Diseño experimental para la evaluación de segregación del CAC.

Factor	Nivel	Respuesta
a/c	0.5, 0.55	Capacidad de llenado y segregación (s) Extensibilidad (cm)

### **3.2 Materiales y dispositivos utilizados**

#### **3.2.1 Fase 1. Movimiento de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes**

Se utilizó agua potable, glicerina comercial y miel de maíz marca Karo. Un recipiente transparente con las siguientes dimensiones: 100 cm de alto y de 10x10 cm de base. Una probeta con capacidad de un litro, un cronómetro, una cámara de video, un termómetro graduado hasta 150 °C, una balanza analítica con capacidad de 4 kg y resolución de 0.001 g,

un vernier con carátula digital, esferas de plástico, vidrio y de acero, las características de las esferas se muestran en la tabla 3.5.

**Tabla 3.5.** Características de las esferas utilizadas en las pruebas de velocidad de caída.

Característica de la esfera	No. De Esferas	Peso	Diámetro	Volumen	Densidad
Esferas de plástico	1	(g)	(cm)	(cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
	2	0.93	1.18	0.85	1.09
	3	0.91	1.17	0.83	1.1
	4	0.94	1.17	0.84	1.12
	5	0.95	1.17	0.84	1.13
	6	0.91	1.17	0.84	1.08
	7	0.9	1.17	0.84	1.08
	8	0.92	1.17	0.84	1.09
	9	0.92	1.17	0.84	1.09
	10	0.93	1.18	0.86	1.08
	11	0.88	1.18	0.85	1.03
	12	0.88	1.18	0.86	1.03
Esferas de vidrio	13	3.77	1.41	1.46	2.58
	14	3.95	1.44	1.55	2.56
	15	3.73	1.4	1.45	2.58
	16	3.54	1.38	1.37	2.59
	17	6.3	1.67	2.43	2.59
	18	5.95	1.64	2.3	2.59
	19	5.98	1.64	2.31	2.59
	20	6.52	1.69	2.52	2.59
Esferas de acero	21	1.05	0.63	0.13	7.94
	22	0.7	0.55	0.09	7.85
	23	0.45	0.47	0.06	8.03
	24	0.25	0.39	0.03	7.89

### **3.2.2 Fase 2. Diseño y construcción del dispositivo basado en la ley de Stokes (DBLS)**

Las características del diseño y construcción del dispositivo se muestran en el anexo 1, en la figura 3.1 se presenta el dispositivo utilizado para las pruebas en pastas y morteros.



**Figura 3.1.** Dispositivo DBLS.

#### **3.2.2.2. Validación del DBLS en fluidos translúcidos**

Los materiales y dispositivos que se utilizaron para realizar la validación de la velocidad de caída de una esfera en un fluido fueron los siguientes: glicerina comercial, mezcla de glicerina + agua con relación (3/1)), miel de maíz, un cronómetro, una cámara de video, una probeta con capacidad de un litro, un termómetro, un vernier con carátula digital, una balanza analítica, esfera de vidrio y de acero, una lap top, cable con puerto serial-usb, un DBLS, la balanza utilizada en la sección anterior.

### **3.2.3 Fase 3. Estudio del movimiento de partículas en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS**

Los materiales y dispositivos utilizados para el desarrollo de esta fase se describen a continuación.

#### **3.2.3.1 Cemento**

El cemento utilizado para la preparación de pastas y morteros fue el Cemento Portland Ordinario HolcimApasco Clase 30RR S.

#### **3.2.3.2 Caracterización de los aditivos**

Los aditivos superfluidificantes utilizados fueron: Glenium 3400 NV® aditivo reductor de agua de alto rango a base de polycarboxilatos modificados cumple con la especificación ASTM C 494 para aditivos reductores de agua tipo A y aditivos reductores de agua de alto rango tipo F, Plastol 4000® aditivo superfluidificante a base de polycarboxilatos y cumple con la norma ASTM- 494 tipo F de la marca Euclid y Eucon precast AE® a base de polycarboxilatos el cual cumple con la norma ASTM-494 como tipo A y F de la marca Euclid®. El AMV utilizado fue Viscrol® de la marca Euclid®.

El aditivo modificador de la viscosidad fue VISCTROL®, cuya composición es de 40 al 70% de agua, 30-60 % de sulfonato de naftaleno, 7-13 % de goma Welan.

#### **3.2.3.3 Caracterización del agregado fino**

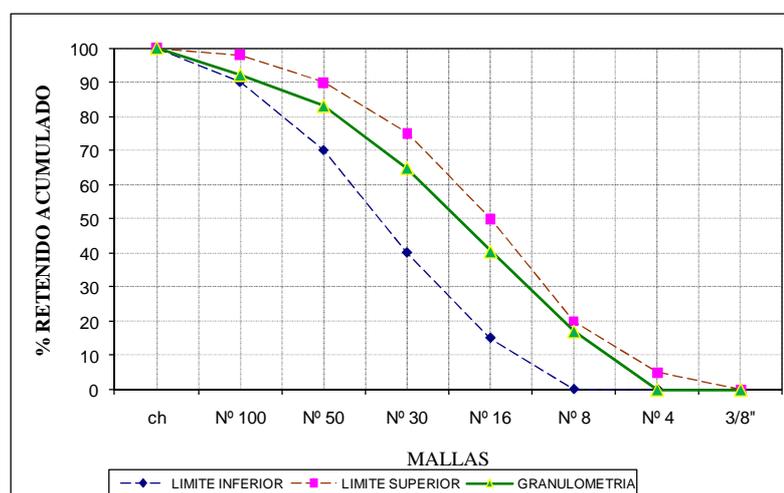
La arena se obtuvo del banco de material ubicado en la comunidad de Totolapam, Oaxaca, México. La Tabla 3.6 muestra los resultados de la caracterización de los agregados pétreos. La NMX-C-077-1997 considera que el MF de una arena adecuada para producir concreto debe estar entre 2.0 y 3.0, donde un valor menor que 2.0 indica una arena demasiado fina, de 2.5-3.0 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa. De los resultados obtenidos cumple con las características de la finura media y con los límites granulométricos que requiere la norma mencionada (ver Figura 3.2).

**Tabla 3.6.** Propiedades físicas de la arena.

Material	Absorción (%)	Densidad	PVSS (Kg/m <sup>3</sup> )	PVSC (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Finura (MF)
Arena Banco Totolapam	2.50	2.62	1671.86	1733.43	2.97

PVSS= Peso Volumétrico Seco Suelto  
 PVSC= Peso Volumétrico Seco Compacto  
 MF= Módulo de Finura

En la producción de concreto autoconsolidable se prefieren arenas que sean de finas a medias, ya que contribuyen a mejorar las propiedades reológicas del concreto.



**Figura 3.2.** Granulometría de la arena Banco Totolapam. MF=2.97

### 3.2.3.4 Dispositivos y Equipo.

Durante la realización de las pruebas en pastas y morteros se utilizaron los siguientes dispositivos:

Dispositivo Basado en la Ley de Stokes (DBLS), balanza analítica con capacidad de 4 kg y con capacidad de 14 kg, agua potable, cemento CPO 30 RRS, AMV Viscrol, aditivo súper plastificante Plastol 4000, batidora industrial, esfera metálica y esferas de vidrio, laptop, recipientes para pesar los materiales, espátula, cámara digital, termómetro, 3 moldes de acero

para colar cilindros de 7.5 x 15 cm. reómetro Marca Anton Paar Linea física MCR Modelo 301 (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Reómetro Anton Paar Physica MCR 301 con su sistema de esferas.

#### **3.2.4 Fase 4. Evaluación de la segregación del concreto autoconsolidable**

Los materiales utilizados en esta fase, tales como cemento y aditivos fueron los mismos que se usaron en la fase de pastas y morteros. Sin embargo, la arena y grava empleadas fueron aquellas proporcionadas por una empresa como parte del proyecto: “Innovación y desarrollo de tecnologías para productos de concreto prefabricados“, el cual fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Los agregados se caracterizaron de acuerdo a la norma NMX-C-030-ONNCCE-2004, y sus propiedades se describen en los siguientes apartados. Las cantidades de materiales utilizadas para la elaboración de los concretos se resumen en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7.** Proporcionamientos de materiales utilizados para elaborar 50 litros de concreto.

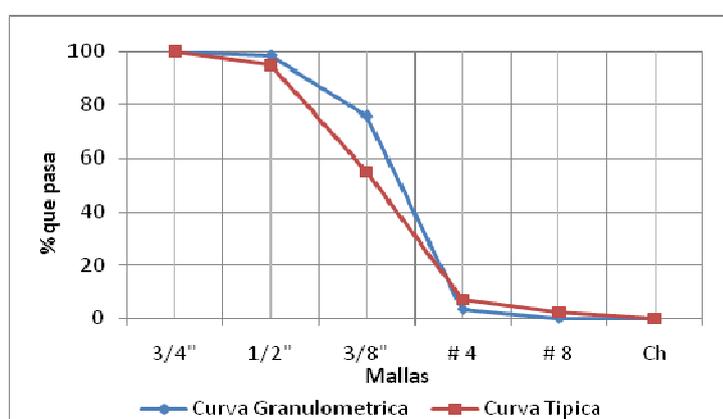
Materiales	a/c = 0.50	a/c = 0.55
Arena (kg)	45.46	44.85
Grava(kg)	36.75	36.69
Cemento (kg)	20.70	20.00
Agua (L)	11.31	11.95
AMV(ml)	48.50	31.00
Superfluidificante (ml)	223.56	135.01

### 3.2.4.1 Agregado grueso

El agregado grueso consistió de partículas de roca triturada, se consideró el material que pasaba por la malla de ¾" (19 mm) y como límite inferior el retenido en la malla No.4. Las propiedades del agregado grueso se resumen en la Tabla 3.8 y en la figura 3.4 se presenta la curva granulométrica.

**Tabla 3.8.**Propiedades del agregado grueso

Material	Absorción (%)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	PVSS(Kg/m <sup>3</sup> )	PVSC(Kg/m <sup>3</sup> )
Grava	5.56	2.60	1425.55	1460.96



**Figura 3.4.**Curva granulométrica del agregado grueso

### 3.2.4.2 Dispositivos para caracterización del concreto autoconsolidable.

Los dispositivos utilizados para evaluar la segregación de los agregados en el concreto fueron el cono de Abrams y el embudo en V los cuales son de uso común. En la Figura 3.5 y 3.6 se muestran los dispositivos. Los detalles de su utilización proporcionan en la sección de metodología del presente Capítulo.



**Figura 3.5.** Embudo en V



**Figura 3.6.** Cono de Abrams

### **3.3 Metodología**

#### **3.3.1 Fase 1. Movimiento de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes**

Se hicieron pruebas para determinar la distancia necesaria para que una esfera llegara a una velocidad límite constante, después de varias pruebas de caída en agua se encontró que después de 30 cm de desplazamiento llegó a una velocidad límite constante. Con base a lo anterior se decidió utilizar 30 cm de desplazamiento de la esfera que es necesario para que garantizar que las pruebas se realizan en velocidad terminal, este mismo procedimiento se realizó para obtener la velocidad terminal en la glicerina. Para la miel de maíz se realizó un procedimiento similar pero en un recipiente con capacidad de un litro, la distancia necesaria

que necesita desplazarse la esfera dentro de ella para obtener la velocidad terminal fue de 15 cm, y la distancia utilizada para tomar el tiempo de caída fue de 20 cm.

### **3.3.2 Fase 2. Diseño y construcción del dispositivo basado en la ley de Stokes (DBLS)**

Para esta sección es necesario ver el anexo 1 donde se detallan de las partes del dispositivo y algunos criterios para su construcción.

#### **3.3.2.1 Validación del DBLS**

Se realizaron pruebas comparativas de caída de esfera utilizando la velocidad obtenida mediante el uso del dispositivo y la velocidad obtenida de manera visual obtenida con el uso de un cronómetro. Éstas pruebas se realizaron en fluidos translúcidos que permitieron observar el desplazamiento de la esfera, los fluidos utilizados fueron miel de maíz marca Karo y glicerina comercial a diferentes temperaturas con la finalidad de observar el cambio de caída al variar la viscosidad de los fluidos. Para tener pruebas con viscosidades más bajas, se hizo una mezcla de glicerina agua (3/1).

### **3.3.3 Fase 3 Estudio del movimiento de partículas en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS**

En esta Fase se describen los procedimientos necesarios para estudiar el movimiento de partículas en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico utilizando el DBLS; sin embargo, antes de proceder es necesario considerar la interacción que ocurre entre el cemento y los aditivos al mezclarse. Esto es importante, porque la existencia o no existencia de compatibilidad entre dichos ingredientes influye de manera determinante en las propiedades en estado fresco de las pastas. La prueba más comúnmente utilizada es la de determinación del punto de saturación del aditivo, la cual se detalla a continuación. Esta prueba no se incluyó en el diseño experimental para evitar la pérdida de fluidez en el documento.

#### **3.3.3.1 Obtención del punto de saturación del superfluidificante**

Para estimar el punto de saturación del aditivo superfluidificante en pastas de cemento se hicieron pruebas reológicas. Se estudiaron tres aditivos súper plastificantes y la relación

agua cemento fue de 0.40. Los rangos propuestos para cada aditivo fueron de acuerdo a los recomendados en las fichas técnicas de los fabricantes. Los detalles de los aditivos superfluidificantes se muestran en la Tabla 3.9.

Posteriormente se evaluó el efecto de un agente modificador de viscosidad en las propiedades de las pastas que contenían la cantidad de superfluidificante necesaria para lograr su punto de saturación. Los detalles del agente modificador de viscosidad se muestran en la Tabla 3.10.

El procedimiento consistió en preparar pastas de cemento con las cantidades de superfluidificante mencionadas. En el proceso, el agua de mezclado se dividió en dos partes (aproximadamente  $\frac{3}{4}$  y  $\frac{1}{4}$  de la cantidad total). En la primera parte del agua se le adicionó el superfluidificante y se mezcló con el cemento durante 3 minutos; posteriormente el agua restante se mezcló con el AMV y se agregó a la pasta mezclando por dos minutos más. La pasta obtenida se vació en el recipiente contenedor del reómetro y para la prueba reológica se empleó la geometría de bola BM 12. Se realizó un ciclo de rampas de velocidad de corte el cual incluyó una rampa lineal de ascenso de velocidad de corte de  $0.001 \text{ s}^{-1}$  a  $50 \text{ s}^{-1}$  y una rampa de descenso similar a la de ascenso de arriba a abajo en un rango de velocidad de corte lineal de  $50 \text{ S}^{-1}$  a  $0.001 \text{ S}^{-1}$  lo cual es recomendado por Sping (2007, p. 32) y Fernández y Casanova (2006) para evaluar el efecto tixotrópico de la pasta.

Los valores de esfuerzo de fluencia de las pastas fueron calculados mediante el software ReoPlus del programa del reómetro utilizando el modelo de Herschel-Bulkley. El programa también calcula los parámetros a y b necesarios para el cálculo de la viscosidad ya que el modelo de Herschel-Bulkley no proporciona la viscosidad.

**Tabla 3.9.** Detalles de los materiales utilizados para la obtención del punto de saturación del aditivo superfluidificante.

Variable	Niveles (ml/kg cemento)	Respuesta
Glenium 3400 NV®	2.27,2.6,2.92,3.25,3.57,3.9,4.22,4.55,4.87	Esfuerzo de fluencia en (Pa) Viscosidad (Pa.s)
Plastol 4000®	1.3,2.6,3.9,5.2,6.5,7.8,9.1	
EuconPrest AE®	1.3,2.6,3.9,5.2,6.5,7.8,9.1,10.4,11.7,13.0	

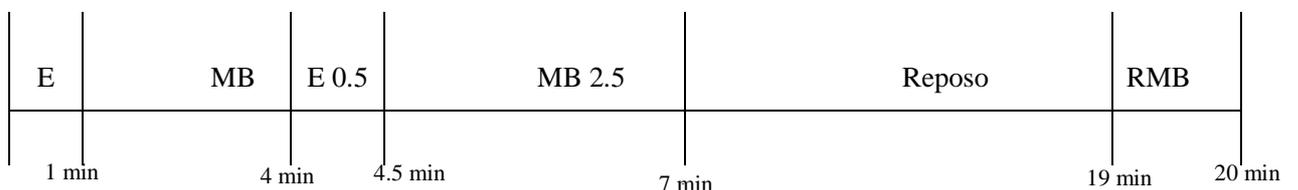
**Tabla 3.10.** Detalles de los niveles del AMV.

Variable	Niveles (ml/kg cemento)	Respuesta
Visctrol®	0.222, 0.271, 0.320, 0.369, 0.401, 0.450	Esfuerzo de fluencia en (Pa) Viscosidad (Pa.s)

### 3.3.3.2 Preparación de las pastas y morteros

Las cantidades de materiales que se utilizaron para preparar las pastas se presentan en la Tabla 3.11, y para la elaboración de morteros en la Tabla 3.12. La cantidad de superfluidificante se mantuvo fija, mientras que para el AMV se consideraron un valor óptimo, recomendado por el fabricante, y un valor inferior con el -20% de AMV. La cantidad de pasta y/o mortero fue la necesaria para preparar 2 litros.

Para la preparación de las pastas el agua de mezclado se dividió en dos partes,  $\frac{3}{4}$  partes de agua se mezcló previamente con el aditivo superfluidificante y se añadió al cemento, se hizo un premezclado de un minuto con una espátula de madera antes colocar el recipiente en la mezcladora. A continuación se mezcló durante tres minutos y posteriormente se agitó nuevamente con la espátula para remover la pasta de las paredes y del fondo del recipiente, se añadió la cantidad agua restante con AMV ( $\frac{1}{4}$  de agua), se mezcló por otros dos minutos y medio y se dejó reposar 12 minutos. Finalmente se hizo un re mezclado de un minuto (Figura 3.7). Para el mortero se hizo un mezclado en seco de la arena con el cemento y posteriormente se llevó el mismo procedimiento que para las pastas.



**Figura 3.7** Secuencia de mezclado de los materiales para la elaboración de pastas. ME: mezclado con espátula, MB: mezclado con batidora, ME 0.5: se separa la pasta de las paredes con la espátula, MB 2.5: se continúa con el mezclado con la batidora, Reposo: se deja en reposo la pasta durante 12 minutos, RMB: remezclado final.

En la tabla 3.11 y 3.12 se presentan las cantidades de materiales utilizados para las pruebas en pastas y morteros.

**Tabla 3.11.**Proporcionamientos para pastas a/c= 0.50 y 0.55 para 10 litros

Materiales	Pesos	
	a/c= 0.5	a/c= 0.55
Cemento ( kg )	11.60	11.20
Agua ( L )	5.80	6.17
AMV ( g )	26.50	16.94
	33.14	21.18
Aditivo súper plastificante ( g )	135.20	81.65

**Tabla 3.12.**Proporcionamientos para morteros a/c 0.50 y 0.55 5 litros.

Materiales	Cantidad en pesos	
	a/c= 0.5	a/c = 0.55
Arena ( kg )	6.36	6.28
Cemento ( kg )	2.90	2.80
Agua ( L )	1.58	1.67
AMV ( g )	6.63	4.23
	8.28	5.29
Aditivo súper plastificante ( g )	33.80	20.41

### 3.3.3.3 Procedimiento de prueba

Las pastas preparadas en la sección anterior se utilizaron para estimar la velocidad de caída de una esfera utilizando el DBLS. Para tal efecto, se conectó la laptop al DBLS mediante un puerto serial con conversión a USB (es necesario verificar el puerto en donde está conectado el dispositivo desde mi PC y asegurar la conexión correcta entre la lap-top y el DBLS). Se inicializa el programa HyperTerminal y se crea un archivo nuevo que se guarda con la extensión txt.

Se llenaron tres probetas con pasta hasta un límite preestablecido marcado en la parte superior interna, se colocó la probeta en la base del soporte universal del dispositivo y el brazo del DBLS se introdujo hasta quedar completamente cubierto por la pasta.

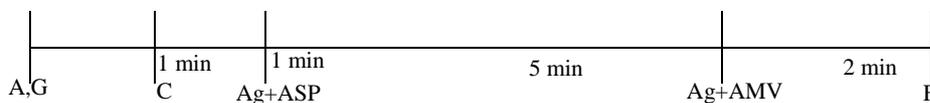
Para realizar la medición del desplazamiento de la esfera se inicia la corrida presionando cualquier tecla de la computadora. Al término de la prueba se saca la esfera y se limpia para repetir el procedimiento a los 20 y 40 minutos respectivamente.

Las pruebas en morteros se llevaron a cabo en moldes cilíndricos con dimensiones de 7.5 x 15 cm. Se realizaron dos pruebas de caída, la primera con una esfera de acero para asegurar que existiera movimiento en el mortero, ya que dicha esfera tiene una densidad mucho mayor que la del mortero. En la segunda prueba se utilizó una esfera de vidrio para simular la presencia de un agregado grueso, ya que dicha esfera de vidrio tenía una densidad similar a la de una partícula de agregado grueso ( $2.5 \text{ g/cm}^3$ ) comúnmente utilizada en la preparación de concreto.

### 3.3.4 Fase 4. Evaluación de la segregación del concreto autoconsolidable

#### 3.3.4.1 El procedimiento de mezclado

El procedimiento de mezclado para la preparación de las mezclas de concreto fue el siguiente. Se vaciaron en la revolvedora la arena (A) y el grava (G) se mezcló durante un minuto, enseguida se agregó el cemento (C) y se homogenizó la mezcla durante un minuto. Posteriormente se añadió  $2/3$  del agua de mezclado conteniendo el aditivo súper plastificante (SP) y se mezcló 5 minutos. Finalmente, se añadió el agua restante ( $1/3$  del agua de mezclado) conteniendo el AMV y se mezcló por 2 minutos más. Terminado el proceso de mezclado se llevaron a cabo las pruebas en estado fresco. Los tiempos de mezclado se pueden ver en la Figura 3.8.



**Figura 3.8.** Procedimiento de mezclado.

### 3.3.4.2 Prueba de capacidad de llenado y segregación

La prueba se usa para determinar la capacidad de llenado (fluidéz) del concreto con un tamaño máximo de agregado de 20 mm. El embudo se llena con 12 litros de concreto aproximadamente y el valor que proporciona es el tiempo que se toma cuando éste fluye a través del aparato. Posteriormente el embudo puede llenarse de concreto y dejarse por 5 minutos para observar si el concreto presenta segregación, el tiempo de vaciado tiene que estar entre un rango de 5 a 15 s, para decir que la mezcla es resistente a la segregación (Brouwers and Radix 2005).

### 3.3.4.3 Prueba de extensibilidad

En una base plana y nivelada se coloca el cono de Abrams y se vacía dentro de éste la mezcla de concreto en estudio. Se deja reposar 1 minuto  $\pm$  10 s. Después de eso, se levanta en forma perpendicular a la superficie y se mide el diámetro de la muestra. Los requisitos para la extensión de flujo son un diámetro final de 60-75cm y un tiempo de  $5\pm 2$  segundos para alcanzar un diámetro de 50cm (denominado como  $T_{50}$ ). El equipo utilizado es un Cono de Abrams y esta prueba se define en la norma ASTM C143/C143M.

Los criterios para la aceptación de un concreto autoconsolidable con base en la prueba de cono de Abrams y el embudo en V (V-funnel) se muestran en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.13.** Criterios de aceptación para concreto autoconsolidable.

Método	Unidad	Criterio		Norma aplicable
		Min.	Máx.	
Flujo de asentamiento con cono Abrams	mm	650	800	-ASTM C1611/C1611M-09b -PCI TR-6-03 Self-Consolidating Concrete Guidelines.
V-Funnel	s	6	12	-PCI TR-6-03 Self-Consolidating Concrete Guidelines.

## CAPITULO 4. RESULTADOS

### 4.1 Fase 1. Validación de la caída de una esfera en un fluido de acuerdo con la Ley de Stokes

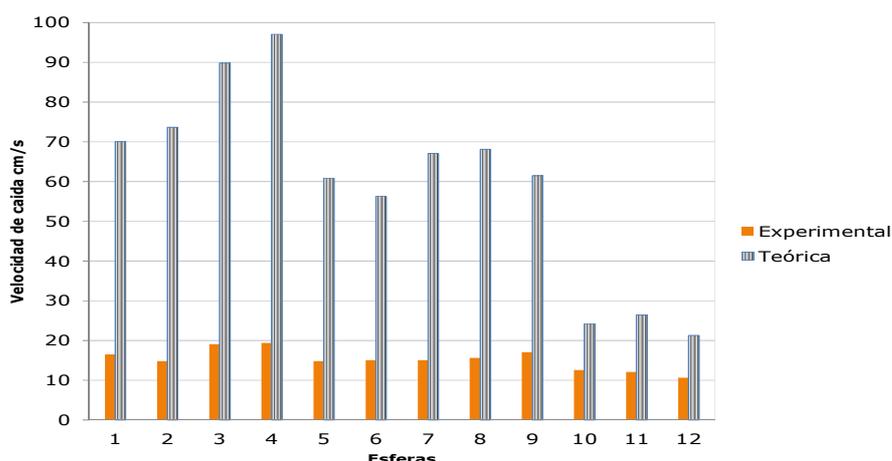
#### 4.1.1 Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en agua

Se realizaron pruebas de caída de esfera por triplicado y con los datos obtenidos se calculó la velocidad experimental, y el número de Reynolds.

**Tabla 4.1.** Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en agua

No. esfera	Tiempo de caída (s)	Velocidad experimental (cm/s)	Velocidad teórica (cm/s)	Número de Reynolds
1	3.03	16.50	70.052	194.00
2	3.37	14.82	73.679	172.88
3	2.62	19.06	89.819	223.32
4	2.58	19.35	97.07	226.65
5	3.38	14.81	60.872	173.45
6	3.31	15.09	56.258	176.66
7	3.32	15.05	67.123	176.43
8	3.20	15.64	68.109	183.11
9	2.93	17.06	61.468	201.37
10	3.99	12.53	24.144	147.24
11	4.13	12.11	26.448	142.29
12	4.7	10.684	21.266	125.85

Los resultados que se muestran en la Tabla 4.1 presentan gran variabilidad ya que una diferencia mínima en las densidades tiene un efecto significativo en la obtención de la velocidad teórica. Las pruebas obtenidas muestran que los resultados no entran dentro de la validez de la Ley Stokes debido a que el número de Reynolds es muy elevado. En la figura 4.1 se muestra un análisis comparativo entre la velocidad experimental y la velocidad teórica. El valor más alto en la velocidad teórica encontrada fue para la esfera 4, 3, 2 y 1 en orden descendente, se observa que pequeñas variaciones en la viscosidad afecta de manera importante la velocidad de caída.



**Figura 4.1.** Comparación de la velocidad obtenida de las esferas de plástico en agua.

#### 4.1.2 Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en glicerina

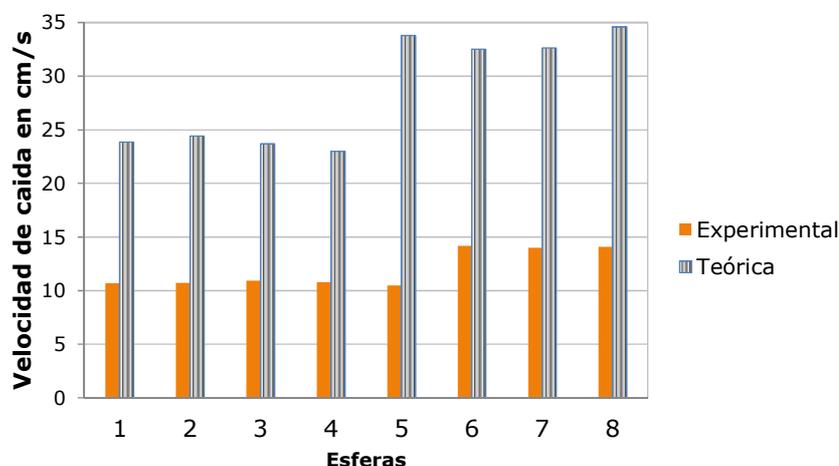
Los resultados reportados en la tabla 4.2 observa que hay una mayor aproximación entre las velocidades teórica y experimental, esto también se refleja en el número de Reynolds que ha disminuido de manera significativa con respecto a lo obtenido en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.2.** Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en glicerina

No. esfera	Tiempo caída (s)	Velocidad experimental (cm/s)	Velocidad teórica (cm/s)	Número de Reynolds
1	4.68	10.7	23.86	2.66
2	4.66	10.7	24.42	2.76
3	4.57	10.9	23.69	2.66
4	4.64	10.8	23	2.54
5	4.76	10.5	33.79	4.16
6	3.53	14.2	32.52	4.03
7	3.57	14.0	32.65	4.06
8	3.55	14.1	34.59	4.19

En la Figura 4.2 se presentan graficados los datos obtenidos en las pruebas con glicerina y en ella se observa el efecto del diámetro, las esferas numeradas del 1 al 4 son esferas con un diámetro de aproximadamente de 1.4 cm y los numerados del 5 al 8 de 1.65 cm, dado que las

densidades son casi iguales, se observa el comportamiento de caída con el cambio del diámetro.



**Figura 4.2.** Comparación de la velocidad obtenida de las esferas de vidrio en glicerina.

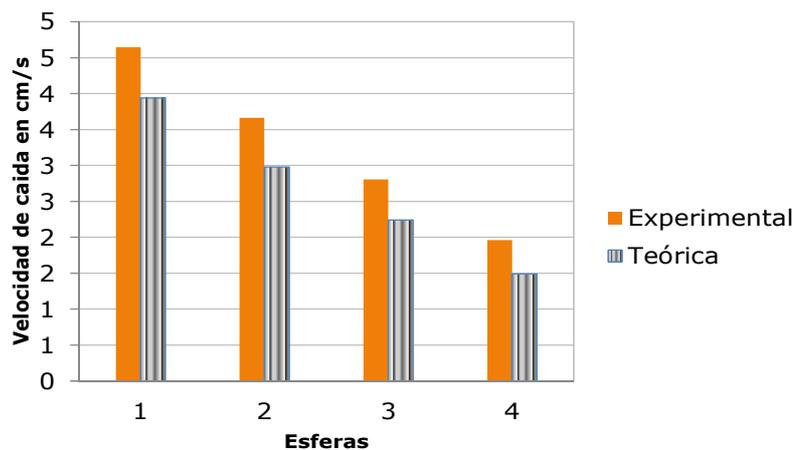
#### 4.1.3 Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en miel de maíz

Las pruebas realizadas con anterioridad nos presentan la tendencia de ir mejorando los resultados. En la tabla 4.3 se observa que el experimento cumple con el rango de número de Reynolds y también se observa la proximidad de los datos teóricos y experimentales son similares.

**Tabla 4.3.** Resultados obtenidos de la evaluación de caída de esferas en miel de maíz.

Esferas	Tiempo de caída (s)	Velocidad experimental (cm/s)	Velocidad teórica (cm/s)	Reynolds
1	4.306	4.64	3.94	0.109
2	5.458	3.66	2.98	0.075
3	7.124	2.81	2.24	0.052
4	10.186	1.96	1.49	0.028

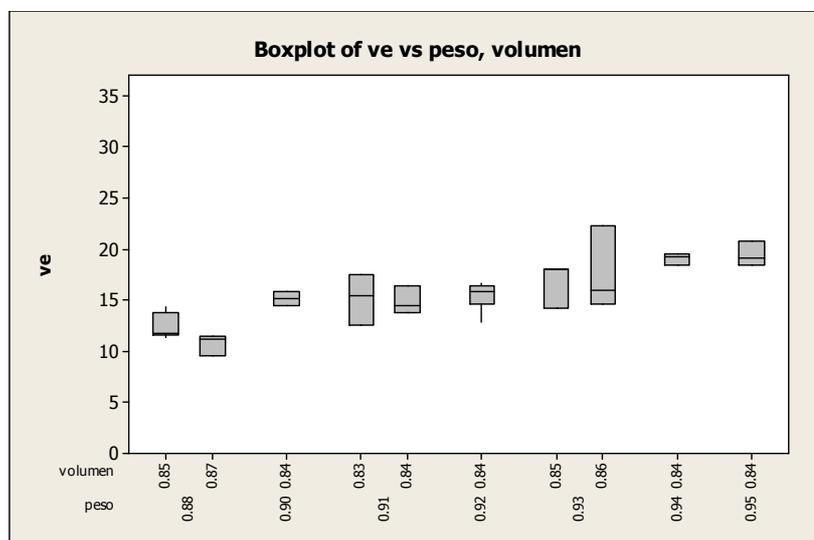
En la Figura 4.3 se observa el comportamiento de la velocidad de caída de las esferas de acero que van variando de tamaño de mayor a menor enumeradas en orden ascendente.



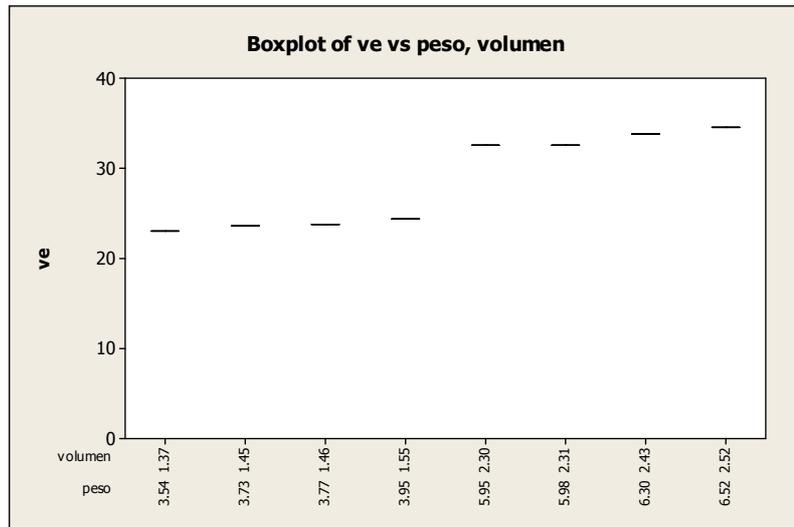
**Figura 4.3.** Comparación de la velocidad obtenida de las esferas de acero en miel de maíz.

#### 4.1.4 Análisis descriptivo y estadístico de los datos:

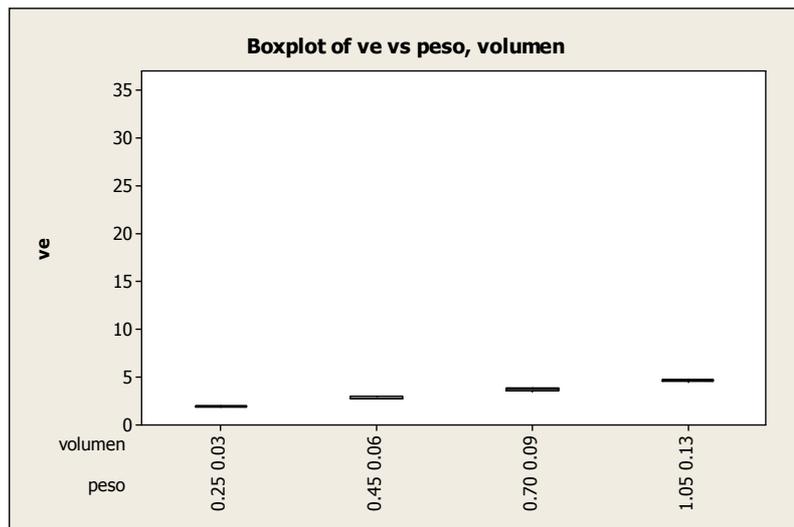
Los resultados de las pruebas de caída de esfera corroboran que la variabilidad depende del tipo de fluido utilizado, de esta manera la dispersión de los datos varió como sigue: agua>glicerina>miel de maíz, ver Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.



**Figura 4.4.** Diagrama de caja para la prueba de caída de esfera en agua.



**Figura 4.5.** Diagrama de caja para la prueba de caída de esfera en glicerina.



**Figura 4.6.** Diagrama de caja para la prueba de caída de esfera en miel de maíz

#### 4.2 Fase 2. Diseño y construcción del dispositivo basado en la ley de Stokes (DBLS)

A continuación se presentan los valores de las pruebas realizadas en la evaluación de la velocidad de caída de esfera en fluidos translucidos, además la verificación de las pruebas del funcionamiento del dispositivo al evaluar la caída y su comparación con datos obtenidos de manera visual.

#### 4.2.1 Análisis comparativo de velocidades terminales obtenidas con y sin el DBLS

**Tabla 4.4.** Pruebas comparativas de velocidad de caída en glicerina a 23.5 °C

Dispositivo		Cronometro manual	
Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
6.41	3.12	6.64	3.012
4.03	4.96	6.6	3.030
6.55	3.05	6.57	3.044
6.49	3.08	6.7	2.985
6.53	3.06	6.74	2.967
6.48	3.09	6.74	2.967
6.51	3.07	6.62	3.021
6.76	2.96	6.7	2.985
6.26	3.19	6.41	3.120
6.70	2.99	6.96	2.874
6.26	3.19	6.41	3.120
Media	3.0787	Media	3.0078
Desviación estándar	0.0915	Desviación estándar	0.0887

**Tabla 4.5.** Pruebas comparativas de velocidad de caída glicerina a 31 °C

Dispositivo		Cronometro manual	
Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
3.34	5.99	3.66	5.46
3.27	6.11	3.33	6.01
3.19	6.26	3.41	5.87
3.31	6.05	3.4	5.88
3.31	6.04	3.37	5.93
3.30	6.05	3.44	5.81
3.28	6.10	3.46	5.78
3.31	6.04	3.51	5.70
Media	6.080	Media	5.806
Desviación estándar	0.083	Desviación estándar	0.167

**Tabla 4.6.** Pruebas comparativas de velocidad de caída glicerina + agua con relación 3/1 a 17 °C.

Dispositivo		Cronometro manual	
Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
6.41	3.12	6.64	3.012
6.55	3.05	6.57	3.044
6.49	3.08	6.7	2.985
6.53	3.06	6.74	2.967
6.48	3.09	6.74	2.967
6.51	3.07	6.62	3.021
6.41	3.12	6.64	3.012
Media	3.0730	Media	2.9853
Desviación estándar	0.0114	Desviación estándar	0.0311

**Tabla 4.7.** Pruebas comparativa de velocidad de caída miel de maíz a 21 °C.

Dispositivo	Cronometro manual	Dispositivo	Cronometro manual
Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)	Tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
53.75	0.37	60.08	0.333
58.75	0.34	60.043	0.333
57.75	0.35	59.66	0.335
57.50	0.35	59.26	0.337
56.00	0.36	58.85	0.340
55.50	0.36	57.65	0.347
52.50	0.38	54.7	0.366
51.75	0.39	52.93	0.378
51.00	0.39	52.65	0.380
50.25	0.40	51.19	0.391
52.75	0.38	54.5	0.367
52.00	0.38	54.94	0.364
52.00	0.38	53.6	0.373
47.50	0.42	49.34	0.405
52.25	0.38	54.14	0.369
49.00	0.41	54.67	0.366
		50.87	0.393
Media	0.3863	Media	0.3722
Desviación estándar	0.0178	Desviación estándar	0.0179

**Tabla 4.8.** Pruebas comparativa de velocidad de caída miel de maíz a 35 °C.

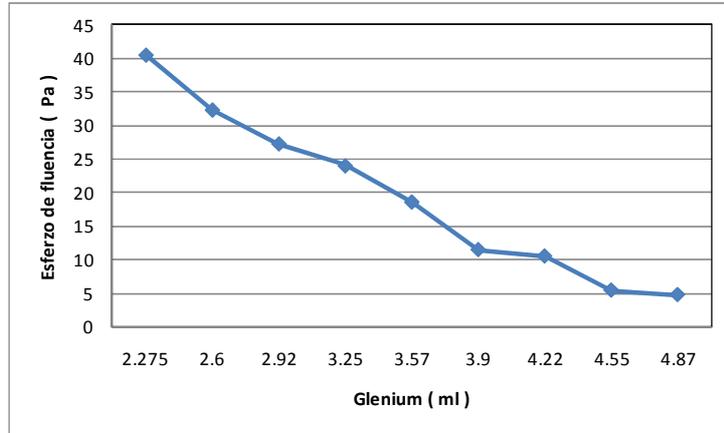
Tiempo ( s )	Velocidad (cm/s)	Tiempo ( s )	Velocidad (cm/s)
2.73	7.33	2.68	7.46
2.7	7.41	2.73	7.33
2.73	7.33	2.76	7.25
2.81	7.12	2.78	7.19
2.84	7.04	2.85	7.02
2.84	7.04	2.89	6.92
2.85	7.02	2.92	6.85
2.8	7.14	2.89	6.92
2.78	7.19	2.92	6.85
2.81	7.12	2.84	7.04
2.82	7.09	2.82	7.09
Media	7.17	Media	7.08
Desviación estándar	0.1317	Desviación estándar	0.2025

### **4.3 Fase 3. Estudio del movimiento de partículas utilizando el DBLS en pastas y morteros preparados con cemento hidráulico**

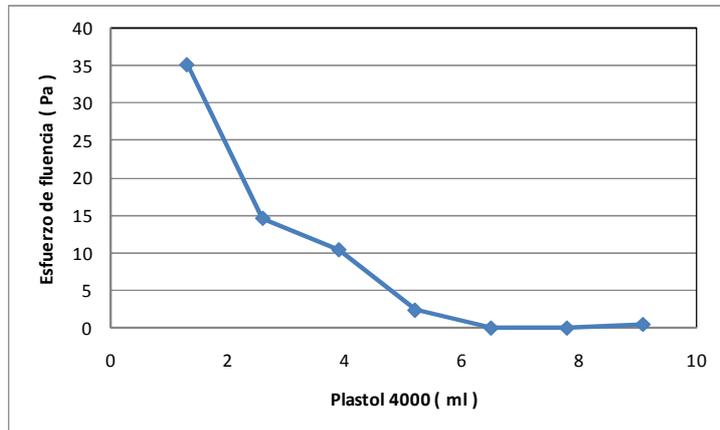
#### **4.3.1 Determinación del punto de saturación del aditivo superfluidificante y estudio del efecto del agente modificador de viscosidad en pastas de cemento**

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan los resultados de las pruebas para estimar los puntos de saturación de los tres superfluidificantes en estudio. En las figuras se aprecia, que como era de esperarse, conforme aumenta la cantidad de aditivo súper plastificante disminuye el esfuerzo de corte. Se observa además, que al sobrepasar cierta cantidad de aditivo el esfuerzo de fluencia ya no disminuye, lo que significa que una cantidad adicional de aditivo no tiene efecto significativo en la fluidez de las pastas de cemento.

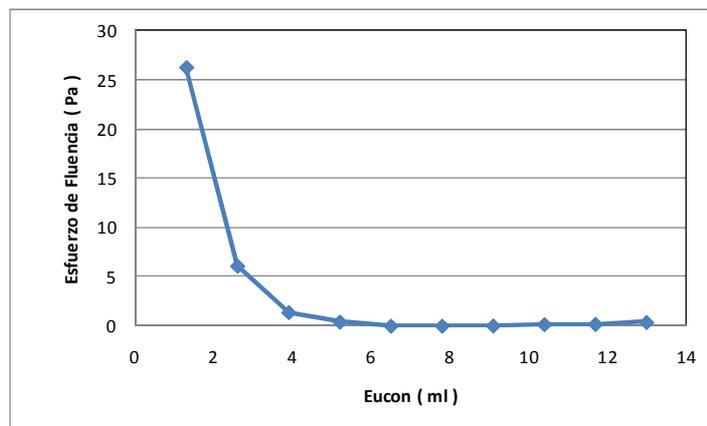
Las gráficas muestran los puntos de saturación de los aditivos, esto es, en donde se presenta el esfuerzo de fluencia mínima y será la cantidad máxima de aditivo a utilizar ya que utilizar dosis mayores aumentaría el consumo de aditivo sin mejorar las propiedades del concreto y esto se reflejará en un mayor costo en su producción.



**Figura 4.7.** Obtención del punto de saturación del aditivo Glenium.

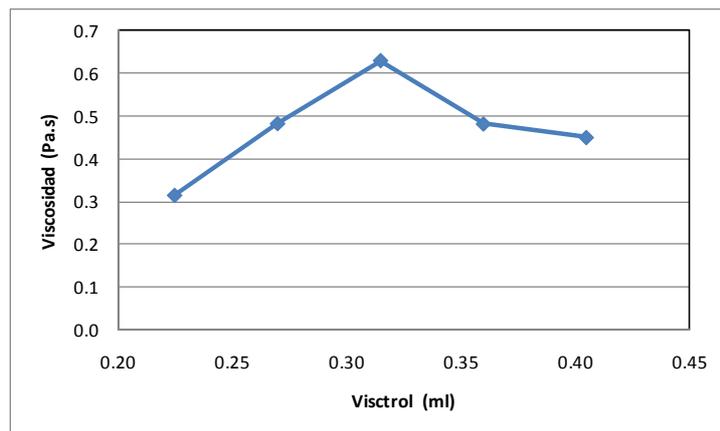


**Figura 4.8.** Obtención del punto de saturación del aditivo Plastol 4000



**Figura 4.9.** Obtención del punto de saturación del aditivo EuconPrecast.

La cantidad óptima encontrada para el Glenium es de 4.75 ml/kg de cemento, para el Plastol 4000 fue de 6.5 ml/kg de cemento y 6.5 para el EuconPrecast AE. Se probó la cantidad óptima de AMV en el súper plastificante Glenium 3400 NV, la evaluación de la cantidad óptima se presenta en la figura 4.10.



**Figura 4.10.** Evaluación de la cantidad óptima del AMV con 6.5 ml de Glenium 3400 NV. La cantidad óptima de AMV es de 0.32 ml/Kg de cemento.

#### **4.3.2 Determinación de la velocidad terminal de partículas en pastas y morteros de cementos portland**

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se presentan los resultados del estudio de la caída de una partícula esférica en pastas de cemento hidráulico con una  $a/c=0.5$ . Como se mencionó en la sección de metodología de esta Fase, se prepararon pastas que contenían el valor óptimo de AMV(VO), el cual fue estimado en la sección anterior (4.3.1), así como pastas que contenían el valor óptimo menos el 20% de AMV (VI), esto para corroborar el efecto del AMV en las propiedades reológicas de las pastas. Los ensayos se realizaron a diferentes tiempos posteriores a la elaboración de las pastas.

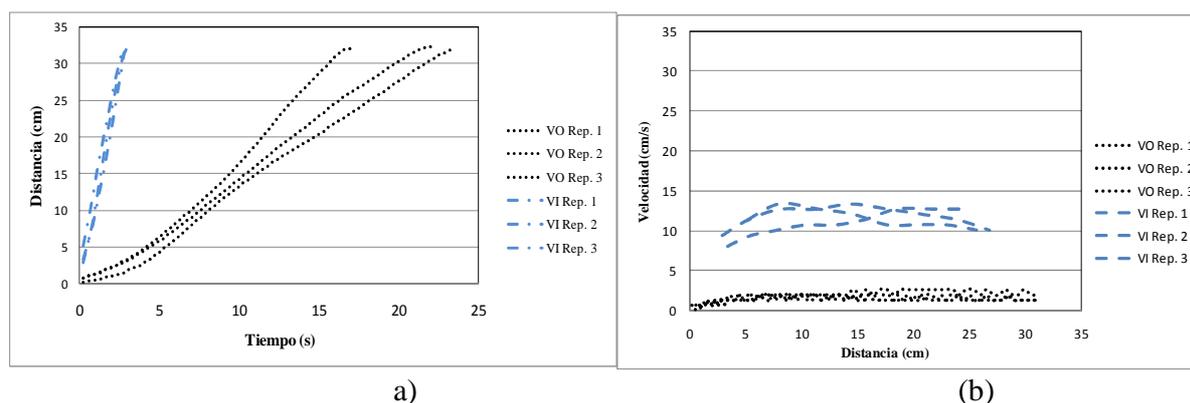
La nomenclatura utilizada en las gráficas es la siguiente:

VO Rep. 1 = Pasta con el valor óptimo de AMV (Rep. 1, 2, 3= Repetición 1, 2 y 3).

VI Rep. 1 = Pasta con 20% menos del valor óptimo del AMV(Rep. 1, 2, 3= Repetición 1, 2 y 3).

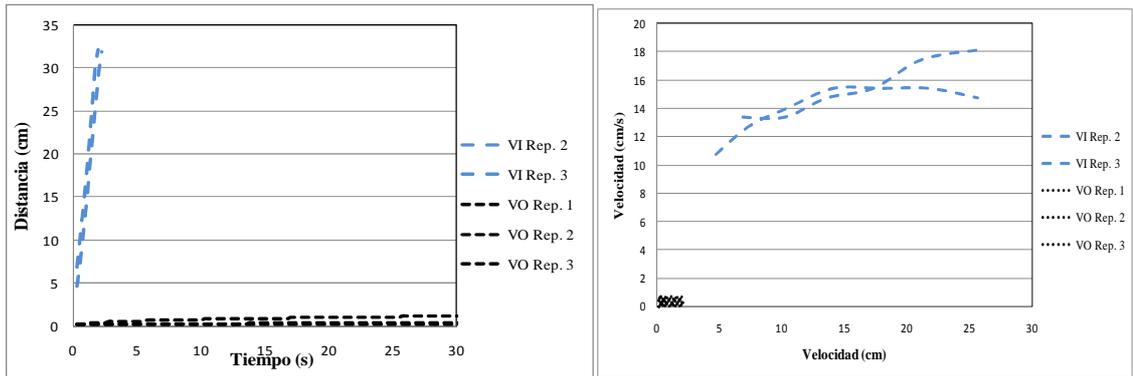
Los resultados son consistentes y muestran que, para todos los tiempos de prueba estudiados, las velocidades de desplazamiento de las esferas en las pastas que contenían el valor óptimo de AMV fueron menores que aquellas observadas en las pastas que contenían una menor cantidad de AMV. Lo anterior corrobora la efectividad del AMV al modificar la viscosidad de las pastas.

Se observa que la velocidad terminal para la pasta (figura 4.11) conteniendo la cantidad óptima de AMV es de aproximadamente 1.59 cm/s, mientras que en la pasta conteniendo la cantidad inferior de AMV se observa una velocidad promedio de 11.81 cm/s



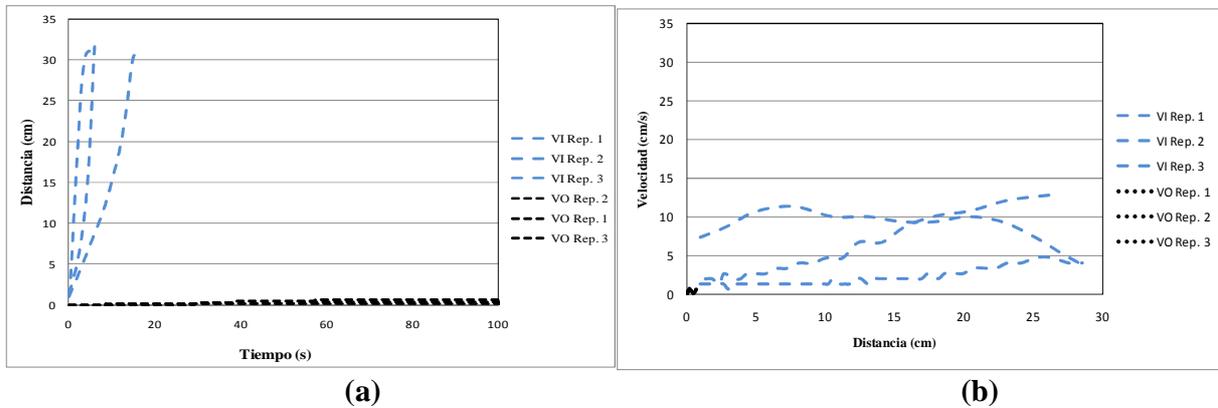
**Figura 4.11.**(a) Desplazamiento de partículas en pastas con  $a/c=0.5$  utilizando el DBLS para 5 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída.

La velocidad promedio en la figura 4.12 (b) para la pasta conteniendo la cantidad óptima de AMV es de aproximadamente 0.005 cm/s, mientras que en la pasta conteniendo la cantidad inferior de AMV se observa una velocidad promedio de 14.74 cm/s, mayor que la obtenida a los 5 minutos. Esto último se explica por la segregación de las partículas de cemento debido al bajo contenido de AMV.



**Figura 4.12.** (a) Desplazamiento de partículas en pastas con  $a/c=0.5$  utilizando el DBLS para 20 minutos después de mezclado, (b) Velocidad de caída.

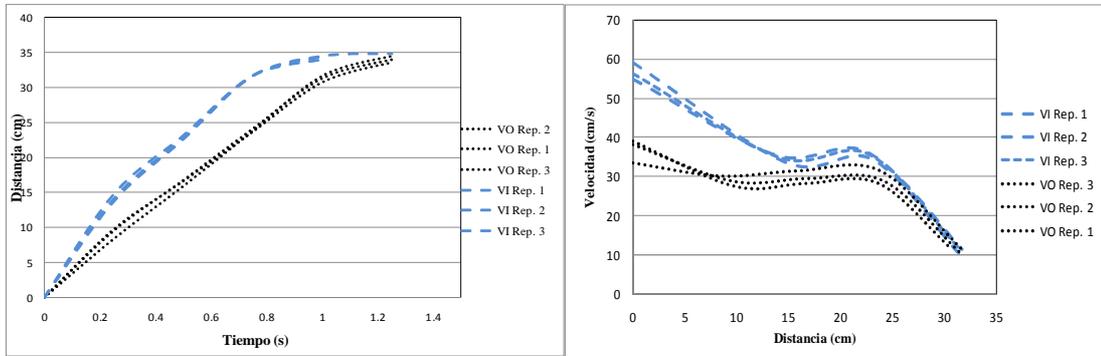
Finalmente, la figura 4.13 (b) muestra que la velocidad para la pasta con el contenido óptimo de AMV es de  $0.002 \text{ cm/s}$  y para la pasta con el contenido de AMV inferior es de  $5.25 \text{ cm/s}$ . En este tiempo se observan cambios evidentes en la viscosidad de las pastas producidos por la hidratación del cemento.



**Figura 4.13.** (a) Desplazamiento de partículas en pastas con  $a/c=0.5$  utilizando el DBLS para 40 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída.

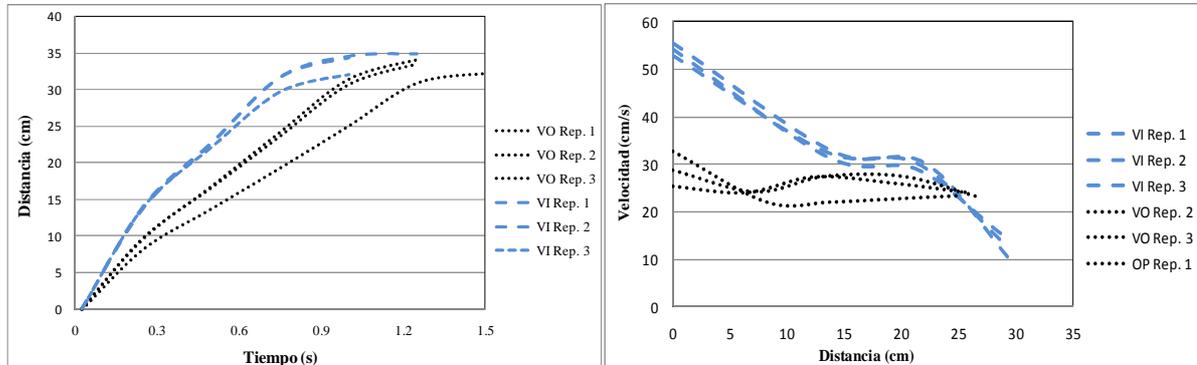
En las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se presentan los resultados del estudio de la caída de una partícula esférica en pastas de cemento hidráulico con una relación  $a/c=0.55$ . Los resultados indican que para los ensayos realizados a 5 y 20 minutos después del mezclado tienen un comportamiento similar, pero para las pruebas realizadas después de 40 minutos de reposo es diferente, para este último caso hubo segregación de las partículas de cemento, por lo tanto las

velocidades de desplazamiento de la esfera variaron de acuerdo a las distintas zonas formadas por la segregación de las partículas de cemento, indicando pérdida de homogeneidad.



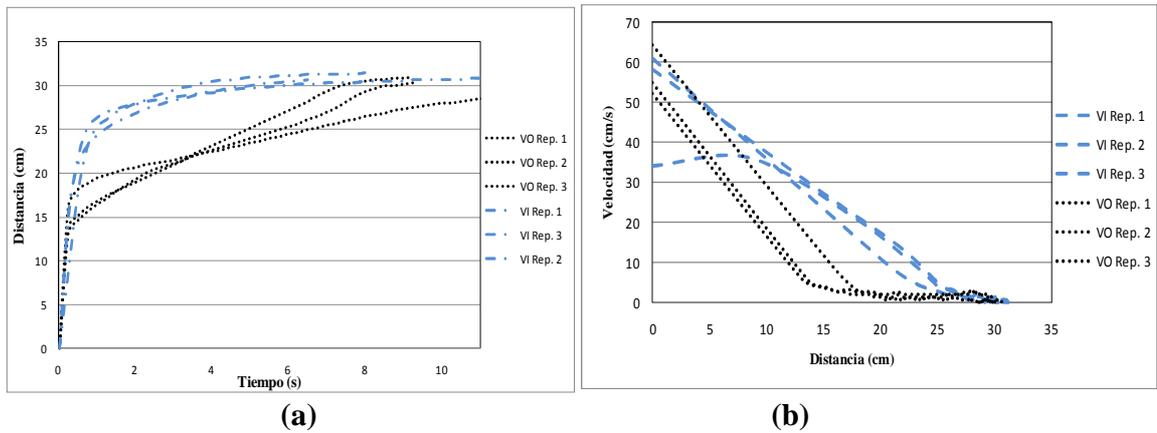
(a) (b)

**Figura 4.14.**(a) Desplazamiento de partículas en pastas con  $a/c=0.55$  utilizando el DBLS para 5 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída. La velocidad promedio en la figura 4.14 (b) para VI es de 34.29 cm/s y para VO es 27.21 cm/s.



(a) (b)

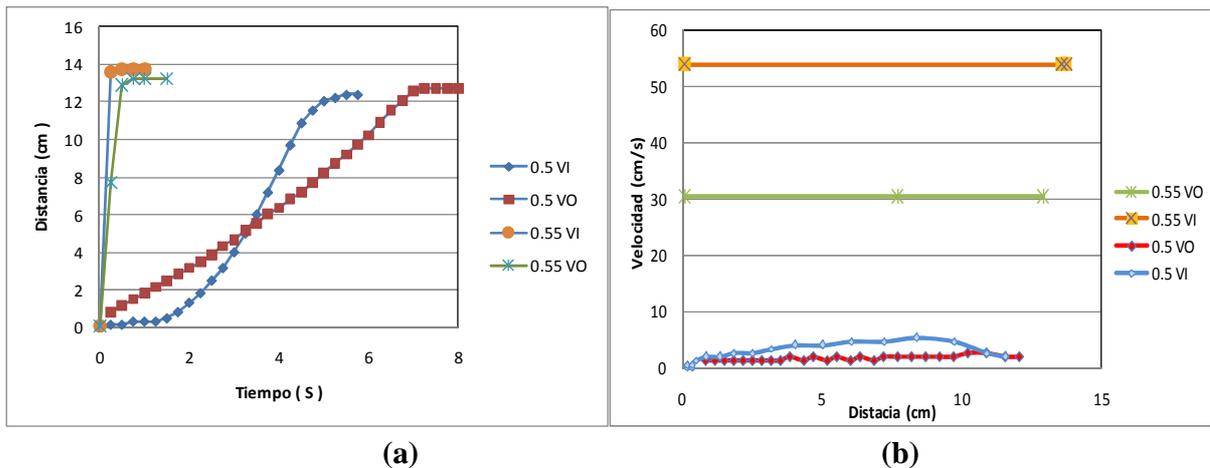
**Figura 4.15.**(a) Desplazamiento de partículas en pastas con  $a/c=0.55$  utilizando el DBLS para 20 minutos después de mezclado, (b) velocidad de caída. La velocidad promedio en la figura 4.15 (b) para VI es de 32.28 cm/s y para VO es 25.42 cm/s.



**Figura 4.16.**(a) Desplazamiento de partículas en pastas con  $a/c=0.55$  utilizando el DBLS y esfera de vidrio para 40 minutos después de mezclado, (b) Velocidad de caída.

La velocidad promedio en la figura 4.16 (b) para VI es de 22.44 cm/s y para VO es 15.02 cm/s. En la figura 4.16 a se pueden identificar dentro de la columna de pasta tres zonas con distintas propiedades (disminución gradual de viscosidad y densidad desde la parte superior a la inferior de la columna), las cuales se han producido por la sedimentación de las partículas de cemento.

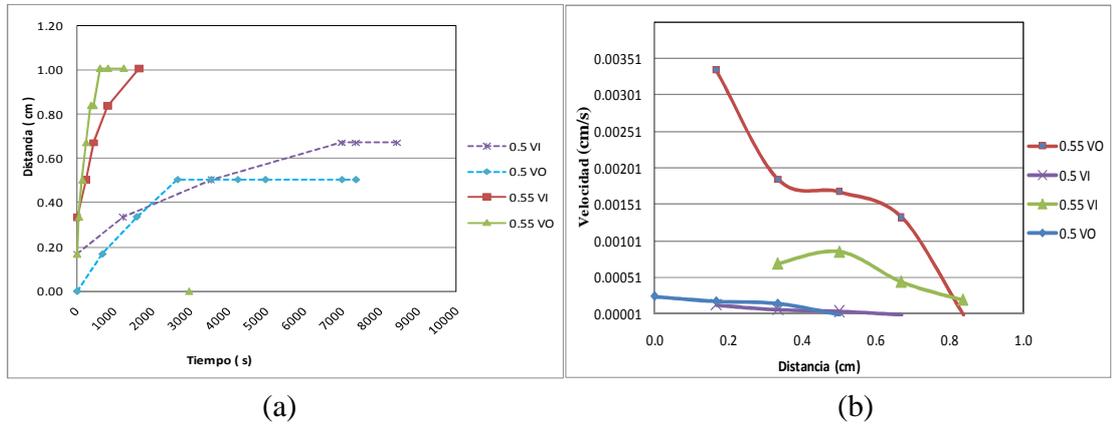
En lo que respecta a los resultados en morteros, cabe recordar que en la primera parte de los ensayos se utilizó una esfera metálica y en la segunda una de vidrio, como era de esperarse, la esfera de acero por su mayor densidad con respecto a la del fluido se desplazó en todas las mezclas de mortero hasta el fondo del recipiente (figura 4.17 (a)).



**Figura 4.17.**(a)Desplazamiento de la esfera de acero en morteros con relación agua/cemento 0.5 y 0.55, (b) Velocidades de caída.

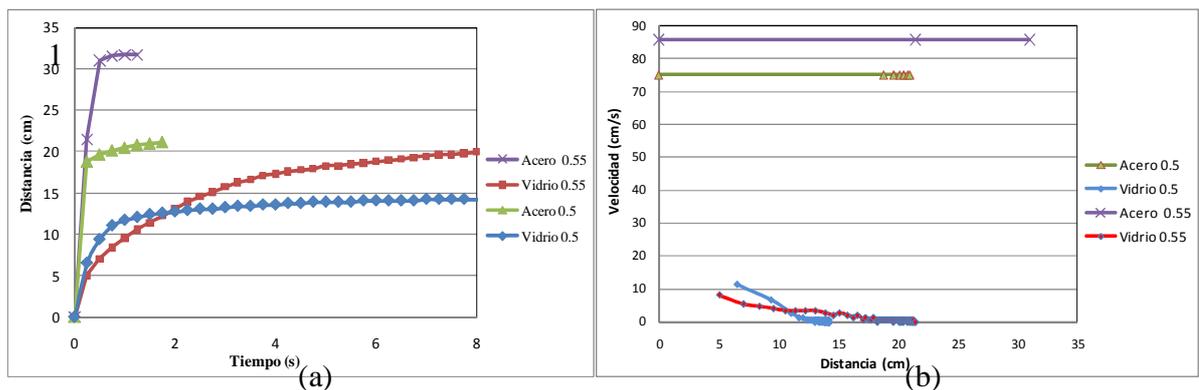
Los resultados para las pruebas utilizando la esfera de vidrio se muestran en la Figura 4.18. En este caso los desplazamientos finales para la  $a/c = 0.50$  con la concentración óptima de AMV fueron inferiores a 1 cm en un tiempo de 7500 segundos, tiempo en el que los efectos de la hidratación han progresado de tal manera que incrementan la rigidez del mortero, lo cual sugiere que una partícula con densidad semejante a la del agregado común que se usa en mezclas de concreto quedará suspendida en mortero con el proporcionamiento adecuado, evitando de esta manera su segregación.

La figura 4.18 indica que la velocidad promedio de la esfera de vidrio en el mortero con relación  $a/c = 0.50$ , conteniendo el valor óptimo de AMV es de  $0.00021 \text{ cm/s}$  y para el valor inferior de contenido de AMV la velocidad es de  $0.00037 \text{ cm/s}$ , en la relación  $a/c = 0.55$  con el valor óptimo de AMV la velocidad es de  $0.0049 \text{ cm/s}$  y para el valor inferior de contenido de AMV la velocidad es de  $0.0068 \text{ cm/s}$ . Finalmente en ambos casos la esfera redujo su velocidad aproximadamente a cero a una altura de 1 cm.



**Figura 4.18.** (a) Desplazamiento de la esfera de vidrio en morteros con relación  $a/c=0.50$  y  $0.55$ , (b) velocidades obtenidas.

En la figura 4.19 se presentan los resultados de variar la cantidad de AMV al valor óptimo-60%. Los desplazamientos observados contrastan claramente con los mostrados en la figura 4.18 (a) con la esfera de vidrio que tuvo desplazamientos menores a 1 cm. En este caso tenemos desplazamientos hasta de 20 cm para la relación  $a/c=0.55$  y de 14.4 cm para la relación  $a/c=0.50$ , lo que indica que los morteros probados no tienen resistencia a la segregación. De la misma manera es de esperarse que para la esfera de acero tuviera velocidades mucho mayores a las mostradas en la figura 14.17 (b), la velocidades de caída de las esferas de vidrio en el mortero con relación  $a/c=0.50$  fue de 4.69 cm/s y para la relación  $a/c=0.55$  fue de 3.34 cm/s.



**Figura 4.19.** (a) Desplazamiento de esferas de acero y vidrio en morteros con relación  $a/c=0.50$  y  $0.55$  en una columna de mortero de 35 cm con cantidad de AMV de óptimo-60%, (b) velocidades obtenidas.

#### 4.4 Fase 4 Evaluación de la segregación del concreto autoconsolidable.

La Tabla 4.9 muestra que los concretos en estudio cumplen con los requerimientos necesarios para la aceptación de este concreto como autoconsolidable.

**Tabla 4.9.** Propiedades de las mezclas de concreto

Propiedad	a/c= 0.5	a/c =0.55
Peso Unitario (kg/m <sup>3</sup> )	2277	2252
Extensibilidad en cono Abrams (mm)	700	690
V-Funnel (seg)	6.0	6.0

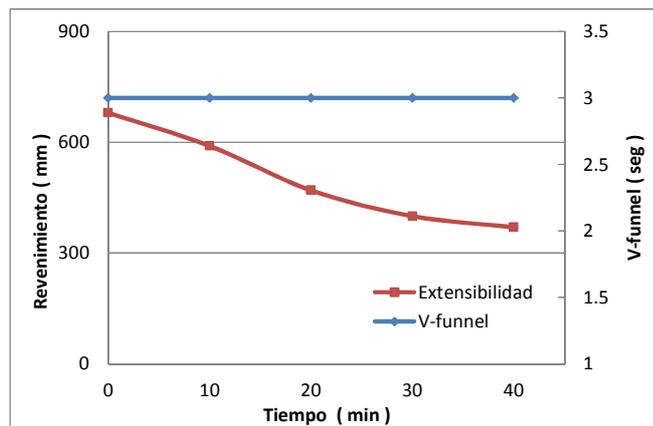
La figura 4.20(a) muestra una respuesta típica de concreto autoconsolidable durante las pruebas de flujo de revenimiento con el cono de Abrams. Se puede observar que la mezcla no presentó segregación alguna y las extensibilidades alcanzadas fueron de 690 mm para la  $a/c = 0.55$  y de 700 mm para la  $a/c = 0.5$ , las cuales están el rango de 650 a 800 mm requerido. Esto pudo lograrse debido a la mayor cantidad de superfluidificante utilizado en la  $a/c = 0.5$ . En contraste se presenta en (b) un concreto que no resiste a la segregación aunque en la prueba de extensibilidad fue de 800 mm, y en la prueba de V-Funnel 9.48 s, esta no tiene características de resistencia a la segregación.



**Figura 4.20.** Extensibilidad del CAC con relación  $a/c=0.50$ , conteniendo a) la cantidad óptima de AMV y b) la cantidad inferior de AMV optima-60

Los resultados para el concreto de la figura 4.20 (a) del embudo en V para el concreto en estudio indican que éste fluye a través del aparato en un tiempo de 6 s, el cual está en el rango permitido para clasificarlo como autoconsolidable (6-12 s).

La figura 4.21 se muestra el comportamiento del concreto autoconsolidable, en la cual se observa que se pierde flujo de revenimiento considerable durante los primeros 20 minutos. Esto requerirá del uso de aditivo superfluidificante adicional en caso de extenderse el tiempo de colocado del concreto. Sin embargo, debido a la rapidez de colado en la aplicación de este tipo de concreto (30 m/h), esta pérdida de flujo no afecta significativamente las propiedades del concreto. Por otra parte, se observa que el tiempo de paso en el embudo en “V” se mantiene constante durante el tiempo estudiado, lo que indica que la capacidad de llenado y la resistencia a la segregación no se afecta.



**Figura 4.21.** Comportamiento del flujo de revenimiento y tiempo de paso en el embudo

En la Figura 4.22 se observan probetas cilíndricas seccionadas en donde es posible observar una distribución homogénea del agregado grueso lo cual comprueba la alta resistencia a la segregación del concreto autoconsolidable elaborado con la cantidad óptima de AMV.



**Figura 4.22.** Concreto autoconsolidable con la cantidad óptima de AMV en estado endurecido mostrando distribución homogénea de los agregados gruesos.

## CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó y validó un dispositivo basado en la Ley de Stokes que permite monitorear el movimiento de una esfera dentro de fluidos opacos.
- El dispositivo permitió caracterizar el desplazamiento y velocidad de esferas, con densidad y tamaño similares a aquellos de los agregados pétreos utilizados comúnmente en la elaboración de concreto, así como también permite identificar cambios en densidad y viscosidad producto de la segregación de partículas de cemento en las pastas.
- El tiempo en el cual deben realizarse las mediciones de caída de esfera en pastas de cemento, debe ser alrededor de 40 minutos después de elaboradas, lo que permite identificar posible segregación de las partículas de cemento.
- De acuerdo a los presentes resultados, la velocidad de caída de la esfera de vidrio con diámetro de 21 mm y densidad de  $2.5 \text{ g/cm}^3$  en pastas de cemento con relación  $a/c=0.50$  deben ser inferiores a  $0.002 \text{ cm/s}$  para garantizar alta resistencia a la segregación cuando se incluya en un CAC. La pasta con relación  $a/c=0.55$  presentó segregación de las partículas de cemento aún con el uso de AMV, lo que indica una clara dificultad para lograr CAC con altas relaciones  $a/c$ .
- El empleo de las pastas de cemento y morteros con la dosificación óptima e inferior de aditivo modificador de viscosidad, en el diseño y elaboración de dos mezclas de concreto autoconsolidable con relación  $a/c=0.50$ , demostró una alta y baja resistencia a la segregación, respectivamente.

### **Recomendaciones.**

- Realizar mediciones tomando en cuenta los efectos de hidratación en función del tiempo, temperatura, forma de partícula, rugosidad, tipo de cemento y tipo de aditivos.
- Explorar el uso de un sensor magnético para eliminar el uso del hilo que suspende la esfera.

## REFERENCIAS

Abril Valencia Diana Fernanda y Vargas Solano Edgar Mauricio (n.d). Diseño, Construcción y Validación de un Viscosímetro de Caída de Bola Para Medir Viscosidades Dinámicas de Productos Líquidos Alimenticios, Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, Colombia.

ASTM C 127-04 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity).

ASTM C 1398 – 98 (Reapproved 2004) Standard Test Method for the Laboratory Determination of the Time of Setting of Hydraulic-Cement Mortars Containing Additives for Shotcrete by the Use of Gillmore Needles.

ASTM C 143/C 143M – 05 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete

Bethmont S., L. Schwartzentruber D'Aloia, Stefani C., J.L. Tailhan, P. Sossi (2008) Contribution of granular interactions to self compacting concrete stability: Development of a new device. *Cement and Concrete Research* 39, 30–35.

Bilgil Ahmet, BakiOzturk, HalisBilgil. (2005). A numerical approach to determine viscosity-dependent segregation in fresh concrete. *Applied Mathematics and Computation* 162,225–241

Brouwers H.J.H. and Radix H.J. (2005) Self-Compacting Concrete: the Role of the Particle Size Distribution. First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete SCC'2005 - China, 26 - 28 May 2005, Changsha, Hunan, China

Byron R. Bird, Warren E. Estewart, Lihgfoot Edwin N..(1992) Fenómenos de transporte, un estudio estudio sistemático de los fundamento de transporte de materia, energía y cantidad de movimiento. Editorial Reveté. S.A. México.

Dolz M., A. Casanovas, J. Delegido, and M.J. Hernández (2003). An experimental setup to verify stokes' law using an electronic balance *Revista Mexicana de Fisicajemplar50 v 1*, 29–32.

Erdogan S.T., Martys N.S., C.F. Ferraris, D.W. Fowler.(2008). Influence of the shape and roughness of inclusions on therheological properties of a cementitious suspension. *Cement & Concrete Composites* 30, 393–402.

Gang Lu, WangKejin, Rudolphi Thomas J.. (2008) Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle and fluid mechanics *Cement & Concrete Composites* 30, 1–12.

Ken W. Day. (2006) Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, Third Edition, Taylor & Francis Group, London and New York.

Ken W. Day. (1999) Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, Second Edition, Concrete Advice Pty Ltd, Croydon, Victoria, Australia

Kosmatka Steven H., Kerkhoff Beatrix and Panarese William C. (2003). Design and control of Concrete Mixtures (4th Ed.). Portland Cement Association. USA. (pag. 1, 114, 163, 193)

Leemann, Andreas, Winnefeld, Frank. (2007) The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete, Cement & Concrete Composites 29, 341–349.

Newman John, Seng Choo Ban. (2003). Advanced Concrete Technology Constituent Materials, (First Ed.) Elsevier Butterworth Heinemann.

Okamura, H., 1997, Self-Compacting High-Performance Concrete, Concrete International, Vol. 19, No. 7, pp. 50-54.

Okamura, H., and Ouchi, M., 2003, Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, April, pp. 5-15.

Physica Messtechnik GmbH. (1999) A new ball measuring system for large particle suspensions. Appl Rheol 9, 145–6.

Nanthagopalan Prakash and Manu Santhanam (2010) A new empirical test method for the optimisation of viscosity modifying agent dosage in self-compacting concrete Materials and Structures 43, 203–212.

Rols, S., et al. (1999). Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete, Cement and Concrete Research 29, ed. Elsevier Science Ltd., pp. 261-266.

Roussel Nicolas, 2009, From Rheology of Fresh Concrete to Casting Processes Correlating properties with field performance, Concrete International, Vol. 31, No. 3. pp. 48-52.

Roussel Nicolas, Mette R. Geiker, Dufou Frédéric, Lars N. Thrane, Peter Szabo (2007) Computational modeling of concrete flow: General overview. Cement and Concrete Research 37, 1298–1307.

Safiuddin Md., West J.S., and Soudki K.A. (2008) Durability Performance of Self-consolidating Concrete Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo Journal of Applied Sciences Research, 4(12): 1834-1840

Schatzmann M, Fischer P, Bezzola GR. 2003, Rheological behavior of fine and large particle suspensions. J Hydraul Eng-ASCE; 129(10), pp. 796–803.

Schwartzentruber, R. Le Roy a J. Cordin. (2004) Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a Self Compacting Concrete (SCC). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Bétons et composites Cimentaires, France

Shen Lin, Struble Leslie anda Lange David (2009). Modeling Static Segregation of Self-Cosolidating Concrete, ACI Materials Journal, V 106, No. 4 July- August.

Steffe James F., Ph.D., P.E. (1992) Rheological Methods in Food Process Engineering. United States of America.

Tyrach J. 2001 Rheological Characterization of Cementitious Building Materials. PhD thesis, University of Erlangen-Nürnberg, Germany.

V.K. Bui, D. Montgomery, I. Hinczak, K. Turner (2002). Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete Cement and Concrete Research 32, 1489–1496.

Yahia A. and Khayat K. H.(2003). Applicability of rheological models to highperformancegrouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture, Materials and Structures, Vol. 36, pp402-412.

# **Anexo A**

## **A. Dispositivo Basado en la Ley de Stokes, partes y funcionamiento.**

### **A.1 Consideraciones generales del diseño y construcción del dispositivo**

Las dimensiones de la probetas utilizadas para las pruebas en pastas fue de 10cm de diámetro por 35 cm de altura estas fueron fabricadas de tubo de PVC, para las pruebas realizadas en morteros se utilizaron cilindros metálicos de 7.5 cm de diámetro por 15 cm de altura.

Para el proceso de diseño y construcción del dispositivo, se realizaron pruebas en donde se evaluaron los efectos de utilizar los distintos arreglos de poleas, diferentes tipos de contrapeso, el hilo, el tipo de polea, el sensor utilizado, y el disco obturador, se realizaron pruebas en donde se fue discriminando todo y obtener un dispositivo que permita medir el movimiento el fluidos opacos con buena confiabilidad.

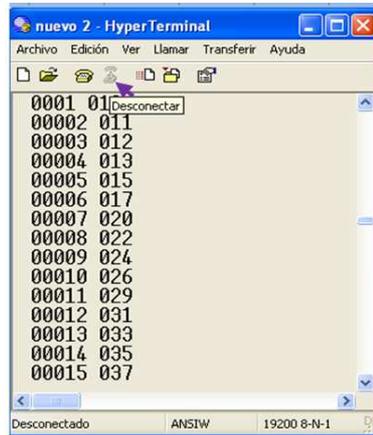
### **A.2 Procedimiento de ensamble del dispositivo**

Para iniciar se coloca el soporte universal sobre una mesa; se coloca la pieza (b) sobre el poste del soporte universal y dentro de esta pieza se hace pasar la varilla de la pieza (e). Posteriormente se monta la pieza (d) y sobre ella se sujeta la pieza (a) que es el que soporta el sistema de tres poleas que se muestra en la figura como A, B y C, y también el sensor para la adquisición de datos.

### **A.3 Sistema de adquisición de datos**

El disco instalado sobre la polea B, consta con 20 ranuras que corresponde a los espacios en blanco de una figura impresa en acetato. Este disco pasa a través de un sensor óptico que está instalado a la par de éste, el sensor está formado por un transmisor y un receptor de luz, al iniciar la prueba el disco gira e interrumpe el haz de luz del sensor, esto genera un pulso eléctrico el cual es contabilizada por la tarjeta de control del dispositivo enviando a la lap top datos cada 250 milisegundos.

La adquisición de datos se realiza en el micro-controlador instalado en el gabinete que se programó de tal manera que envíe cinco caracteres para el tiempo, un espacio y tres caracteres para la posición (Ver figura A.1), estos datos son recibidos en el programa Hyper Terminal Applet versión 5.1.2600.0.



**Figura A.1.** Vista de la pantalla del programa Hyper Terminal durante la adquisición de datos

La obtención de la posición se hace mediante el micro-controlador que emite y recibe señal continuamente, si se interrumpe la señal varias veces mientras esté en el lapso de 250 milisegundos, estas señales se guardan en la memoria interna y manda el ultimo valor al pasar este tiempo, esto significa que los datos del contador no se reciben de manera progresiva, pero si refleja al total de datos obtenidos entre durante el tiempo de la medición. Si la velocidad de caída es rápida genera un envío de datos saltados, pero si es lenta y la abertura del disco se mantiene más tiempo frente al emisor-receptor este dato se repite continuamente. El dato de posición (columna dos de la figura A.1) obtenido se multiplica por una constante que se obtuvo mediante experimentación que es 0.16757 y el resultado obtenido es la distancia en centímetros.

Calculo de la distancia mediante formula

Consideraciones: dado que el diámetro interno de la polea por donde pasa el hilo es de 1.06 cm, se tiene un radio de 0.53 cm.

Los grados de inclinación entre espacios vacíos de la figura es igual a  $360/20 = 18^\circ$

Distancia entre cada dato adquirido es igual la distancia entre el espacio vacío de las ranuras.

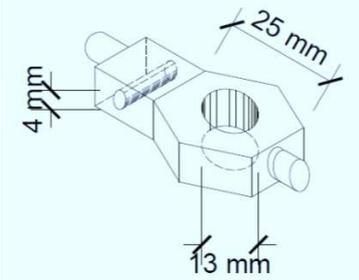
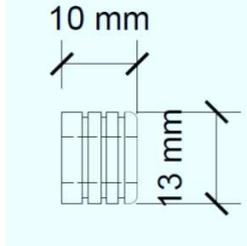
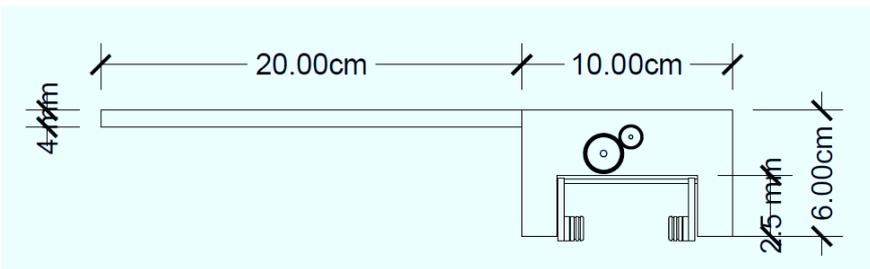
$$X = \frac{r \cdot \pi \cdot \theta}{180} = \frac{0.53 \text{ cm} \cdot \pi \cdot 18^\circ}{180^\circ} = 0.166 \text{ cm} \quad \text{Ecuación 11}$$

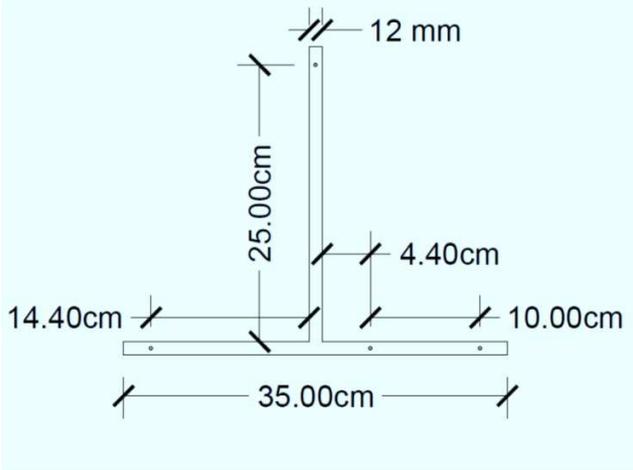
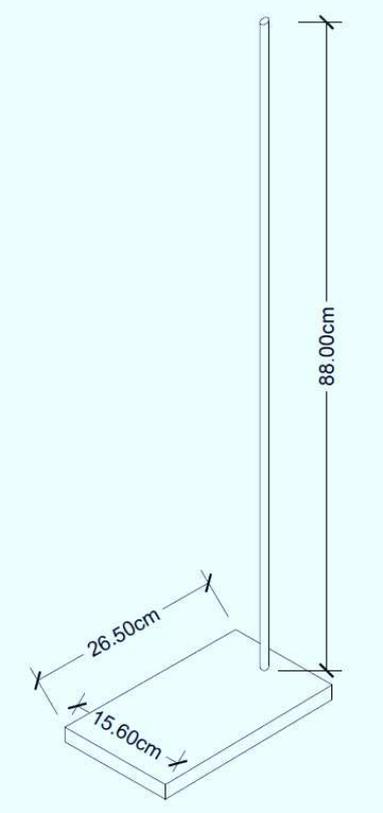
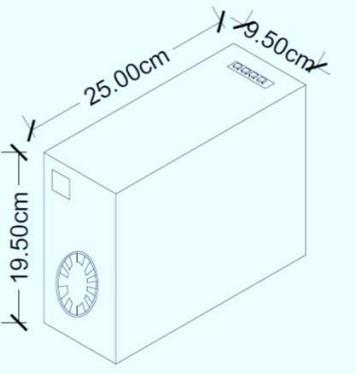
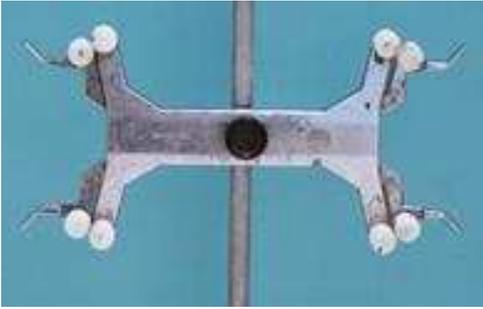
#### A.4 Procedimiento de prueba del DBLS

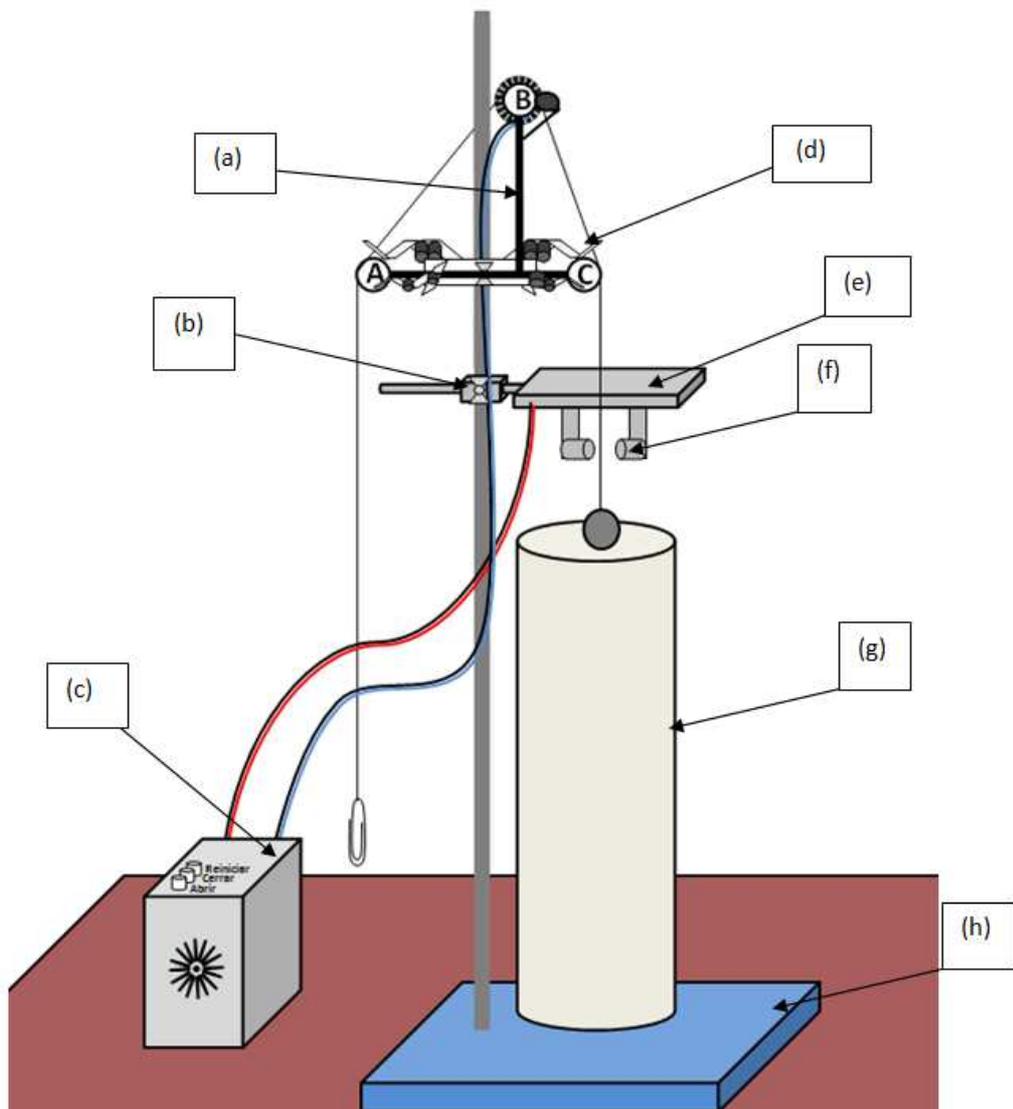
Primero se llena la probeta con el material a probar, posteriormente se alinea la polea C con el brazo que detiene la esfera, se verifica que el hilo se encuentre montado sobre las poleas y que la posición de la esfera esté al centro del contenedor para evitar el efecto de pared y dentro del fluido. Posteriormente se pulsa el botón cerrar que se encuentra sobre el gabinete para sujetar la esfera y también el botón reiniciar del gabinete para asegurar que el envío de datos inicie desde cero, también es necesario que el contrapeso se encuentre suspendido completamente. Iniciar la prueba pulsando cualquier tecla de la lap top, esto acciona la abertura del brazo que suelta la esfera y se inicia con la adquisición de los datos, al detenerse el movimiento de la polea 2 se detiene la adquisición de datos pulsando el botón desconectar del programa Hyper Terminal (Ver figura A.1). Los datos adquiridos se guardan con extensión txt y posteriormente estos datos se importan desde una hoja de cálculo para realizar las gráficas y/o análisis.

#### A.5 Partes del Dispositivo basado en la ley de Stokes.



<p>obtener el disco que permita interrumpir el haz de luz del sensor óptico. Esta montada en el polea B de la figura A.1</p>	<p>guiar el hilo en el dispositivo, se encuentran representadas por las letras A, B y C en la Figura A.1</p>
	
<p>Pieza (b) ver figura A.1, que permite el movimiento horizontal y vertical a la pieza (e), esta se monta en el tubo vertical del soporte universal y se desliza de arriba hacia abajo y además permite mover el brazo que sostiene el motor de manera horizontal.</p>	<p>Pieza de plástico con resorte que sirve para detener la esfera, esta está colocada en la parte inferior del brazo en la figura A.1 se muestran como (f).</p>
	
<p>Pieza (e) que con un brazo que pasa a través del orificio de 4 mm de la pieza (b), permite sostener y librear a la esfera a la altura deseada, sobre esta pieza está montado el motor que acciona el brazo que sujeta la esfera.</p>	

	
<p>(a) Dimensiones de del soporte donde se monta el sistema de poleas y el sensor.</p>	<p>Dimensiones del soporte universal utilizado en el equipo Ver figura A.1 parte (h)</p>
	
<p>Gabinete que contiene una fuente de poder y el sistema de adquisición de datos. (parte c)</p>	<p>Pinsas porta buretas, material de laboratorio de química(d) que ayuda a soportar la pieza (a)</p>



**Figura A.2** Partes del dispositivo.

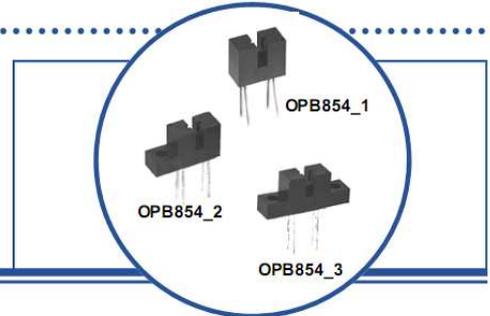
**Ficha técnica del sensor utilizado.**

**Slotted Optical Switch**  
**OPB854A1, OPB854A2, OPB854A3**  
**OPB854B1, OPB854B2, OPB854B3**



**Features:**

- Opaque housing material for ambient light rejection
- Non-contact switching
- Printed circuit board mounting, lead spacing 0.300" (7.62 mm)
- Slot width 0.100" (2.54 mm)
- Choice of three mounting configurations



**Description:**

Each **OPB854** series contains an Infrared Light Emitting Diode (LED) and an NPN silicon phototransistor mounted on opposite sides of a 0.100" (2.54 mm) wide slot in an opaque plastic housing. The OPB854 series has an equivalent aperture of 0.60" (1.52 mm) in diameter because of the lens on the emitting and sensing devices.

The difference between the **OPB854A** series and **OPB854B** series are electrical characteristics.

Switching of the phototransistor occurs whenever an opaque object passes through the slot.

Custom electrical, wire and cabling and connectors are available. Contact your local representative or OPTEK for more information.

**Applications:**

- Non-contact interruptive object sensing
- Assembly line automation
- Machine automation
- Equipment security
- Machine safety

Ordering Information					
Part Number	LED Peak Wavelength	Sensor	Slot Width / Depth	Aperture Emitter/Sensor	Lead Length / Spacing
OPB854A1	890 nm	Transistor	0.100" / 0.250"	None	0.400" / 0.300"
OPB854B1					
OPB854A2					
OPB854B2					
OPB854A3					
OPB854B3					



**RoHS**

OPTEK reserves the right to make changes at any time in order to improve design and to supply the best product possible.