

**Universidad de los Andes**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**



**Universidad  
de los Andes**

**Crecimiento de algas y a cianobacterias y su efecto hidráulico en  
una tubería de PVC de seis pulgadas**

**Presentado por:  
Lizeth Johanna Jiménez Herrera**

**Asesor:  
Ing. Juan G. Saldarriaga**

**Bogotá D.C., Junio de 2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecerle al Ingeniero Juan Saldarriaga por todo su apoyo y asesoría brindada a lo largo de todo el proyecto.

A mi familia, en especial a mi madre y mis hermanos, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera universitaria.

Por otro lado, quiero agradecer a PAVCO por su financiación, y en especial al Ingeniero Francisco Mendoza y al Ingeniero Oscar Cortés por su ayuda y apoyo en el desarrollo del proyecto.

De la misma manera quiero mis más sinceros agradecimientos a Jhon Calvo quien contribuyó en la puesta en marcha del modelo.

Finalmente, muchas gracias a todos aquellos que de una u otra forma me brindaron su colaboración para culminar exitosamente esta tesis.

## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>4</b>
2.1 Tesis Laura Nieto: <i>Estudio de las ecuaciones que describen el flujo turbulento hidráulicamente liso: revisión del Diagrama de Moody y las ecuaciones de Colebrook-White y Blasius</i> .....	4
2.2 Tesis Sara Gacharná: <i>Factores que favorecen la generación y crecimiento de algas en redes de distribución de agua potable</i> .....	7
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
3.1 Aspectos microbiológicos y biológicos.....	10
3.1.1 Definición algas.....	10
3.1.2 Definición cianobacterias.....	11
3.1.3 Factores que determinan el crecimiento de algas y cianobacterias en las RDAPs .....	13
3.2 Aspectos Salud Pública .....	18
3.2.1 Clasificación de las cianotoxinas .....	19
3.2.2 Peligros para la salud humana .....	21
3.2.3 Incidentes a nivel mundial sobre la salud humana relacionados con la presencia de cianotoxinas.....	22
3.3 Aspectos Hidráulicos.....	23
3.3.1 Número de Reynolds.....	23
3.3.2 Interacción del flujo con la pared de la tubería.....	23
3.3.3 Pérdidas de altura piezométrica generadas por la fricción .....	26
3.3.4 Rugosidades en las tuberías.....	26
<b>4. DISEÑO Y SEGUIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>28</b>
4.1 Nivelación del Terreno .....	29
4.2 Suministro de nutrientes .....	31
4.3 Mantenimiento del cloro residual libre en el sistema.....	31



---

4.4	Seguimiento cualitativo de presencia de algas y cianobacterias.....	32
4.5	Determinación de pérdidas por fricción y rugosidad absoluta.....	33
4.6	Cálculo tipo para pérdidas por fricción y rugosidad absoluta .....	35
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
5.1	Aspectos fisicoquímicos .....	39
5.2	Aspectos microbiológicos .....	42
5.3	Aspectos hidráulicos .....	50
5.3.1	Pérdidas por fricción .....	50
5.3.2	Diagrama de Moody basado en las diferentes ecuaciones desarrolladas .....	54
5.3.3	Análisis de rugosidad .....	56
5.3.4	Cálculo tipo del procedimiento para encontrar la variable $a$ y $ks'$ .....	59
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
6.1	Modelo físico .....	61
6.2	Aspectos microbiológicos .....	61
6.3	Aspectos hidráulicos .....	62
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>65</b>



## Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de las algas basada en características celulares. Modificado de (Prescott, Harley, & Klein, 2005). .....	10
Tabla 2. Características generales de las cianotoxinas (World Health Organization, 1999).....	19
Tabla 3. Incidentes sobre la salud de seres humanos en los que se han visto involucradas cianobacterias o los compuestos que ellas producen (Carrasco, 2007).....	22
Tabla 4. Cuadro con los datos y resultados de la nivelación diferencial con varios puntos intermedios. ....	30
Tabla 5. Cálculo de volumen de agua en el sistema (Gacharná, 2011). ....	31
Tabla 6. Concentración de cloro residual.....	39
Tabla 7. Mediciones de pH.....	41
Tabla 8. Resumen resultados toma de datos Marzo 1 de 2012. ....	57

## Índice de figuras

Figura 1. Esquema del Modelo Físico (sin escala) (Nieto, 2011). .....	5
Figura 2. Esquema del Modelo Físico (vista en planta sin escala) (Nieto, 2011). .....	5
Figura 3. Comparación de resultados con el Diagrama de Moody (Nieto, 2011). .....	6
Figura 4. Diagrama de Moody, comprobación del ajuste de los datos tomados en el 2011-2 en la zona de transición (Gacharná, 2011). .....	8
Figura 5. Diatomeas y estructuras filamentosas, muestra tomada de gavión 2 (Gacharná, 2011). .....	9
Figura 6. Cuerpos esquemáticos de las algas: a) <i>Cryptomonas</i> , b) <i>Palmellopsis</i> , c) <i>Gonium</i> , d) <i>Spirotaenia</i> , e) <i>Monostroma</i> , f) <i>Stigeoclonium</i> , g) <i>Chrysocapsa</i> (Prescott, Harley, & Klein, 2005). .....	11
Figura 7. Cianobacterias representativas: a) <i>Chroococcus turgidusk</i> , b) <i>Nostoc</i> , c) <i>Oscillatoria</i> , d) <i>Anabaena</i> y <i>Microcystis aeruginosa</i> (Prescott, Harley, & Klein, 2005). .....	13
Figura 8. Espectro electromagnético. ....	14
Figura 9. Efecto de la luz y la profundidad del cuerpo de agua en el crecimiento de algas y cianobacterias (Sherman, y otros, 2000). .....	15
Figura 10. Efecto de la temperatura del agua en el crecimiento de algas (Shen , Zhu, Cheng, Zhang, Zhang, & Xu, 2010). .....	16
Figura 11. Imagen real de la acumulación de microorganismos en una tubería (Vargas, 2004). .....	18
Figura 12. Capa Límite (Saldarriaga, 2007). .....	24
Figura 13. Desarrollo de una capa límite turbulenta y de la subcapa laminar viscosa (Saldarriaga, 2007). .....	24
Figura 14. Flujos hidráulicamente lisos e hidráulicamente rugosos (Saldarriaga, 2007). .....	25
Figura 15. Zona de almacenamiento en PAVCO (Nieto, 2011). .....	28
Figura 16. Zonal utilizada para la construcción del montaje ya despejada (Nieto, 2011). .....	28
Figura 17. Fotografía de la tubería y del terreno sobre el cual esta reposa. ....	29
Figura 18. Perfil de la tubería. ....	30
Figura 19. Diagrama de flujo: extracción de testigos y toma de muestras microbiológicas. Modificado de (Gacharná, 2011). .....	33
Figura 20. Diagrama de flujo: cálculo de pérdidas por fricción y rugosidad absoluta. Modificado de (Gacharná, 2011). .....	34
Figura 21. Regresión potencial para la determinación de la viscosidad cinemática (Nieto, 2011). .....	35
Figura 22. Curva de calibración del vertedero rectangular (Nieto, 2011). .....	36
Figura 23. Concentración de cloro residual a través del tiempo. ....	40
Figura 24. Datos diarios de pH a través del tiempo. ....	41
Figura 25. Concentración diaria de cloro residual de la duración total del estudio. ....	42
Figura 26. Datos diarios de pH de la duración total del estudio. ....	42
Figura 27. Cronograma de toma de muestras biológicas. ....	43
Figura 28. Cianokit y Fikokit de las estructuras de disipación después del periodo de incubación. ....	44

Figura 29. Cianokit y Fikokit de las paredes del vertedero después del periodo de incubación. ....	44
Figura 30. Cianokit y Fikokit del testigo de borde después del periodo de incubación.....	44
Figura 31. Cianokit y Fikokit testigos 1-2 después del periodo de incubación. ....	45
Figura 32. Cianokit y Fikokit testigos 3-4 después del periodo de incubación. ....	45
Figura 33. Cianokit y Fikokit testigos 5-6 después del periodo de incubación. ....	45
Figura 34. Cianokit y Fikokit testigos 7-8 después del periodo de incubación. ....	46
Figura 35. Cianokit y Fikokit testigos 9-10 después del periodo de incubación. ....	46
Figura 36. Cianokit y Fikokit testigos 11-12 después del periodo de incubación. ....	46
Figura 37. Cianokit y Fikokit testigos 13-14 después del periodo de incubación. ....	47
Figura 38. Cianokit y Fikokit testigos 15-16 después del periodo de incubación. ....	47
Figura 39. Cianokit y Fikokit testigos 17-18 después del periodo de incubación. ....	47
Figura 40. Cianokit y Fikokit testigos 19-20 después del periodo de incubación. ....	48
Figura 41. Cianokit y Fikokit testigos 21-22 después del periodo de incubación. ....	48
Figura 42. Cianokit y Fikokit testigos 23-24 después del periodo de incubación. ....	48
Figura 43. Cianokit y Fikokit testigos 25-26 después del periodo de incubación. ....	49
Figura 44. Cianokit y Fikokit testigos 27-28 después del periodo de incubación. ....	49
Figura 45. Cianokit y Fikokit testigos 29-30 después del periodo de incubación. ....	49
Figura 46. Factor de fricción vs. Número de Reynolds, datos tomados durante el semestre 2012-1.	52
Figura 47. Factor de fricción vs. Número de Reynolds, datos tomados durante los semestres 2011-2 y 2012-1.....	53
Figura 48. Diagrama de Moody, comprobación del ajuste de los datos registrados durante los semestres 2011-2 y 2012-1 en la zona de transición. ....	55
Figura 49. a vs. Número de Reynolds. Esquema de análisis de rugosidad para los datos tomados durante los semestres 2011-2 y 2012-1.....	58
Figura 50. Rugosidad calculada a partir de a vs. Rugosidad normal. Esquema de análisis de rugosidad para los datos tomados durante los semestres 2011-2 y 2012-1. ....	60

## 1. Introducción

---

### 1.1 Justificación

El agua que transportan las redes de distribución de agua potable no es estéril, sin importar que en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) se hayan llevado a cabo todos los procesos de tratamiento que actualmente se conocen. El problema radica en que el agua captada por la PTAP generalmente contiene microorganismos que sobreviven todos los procesos, logrando entrar a la red de distribución a través de las tuberías que transportan el agua. Cualquier microorganismo (incluyendo algunos patógenos) presentes en el agua que ha entrado a la red de distribución puede adherirse a las paredes de las tuberías creando o haciendo parte de biopelículas (U.S. Environmental Protection Agency, 2002).

La edad, el material de las tuberías y el nivel de complejidad de las redes de distribución de agua potable junto con el incremento en la disponibilidad y uso de químicos y materia orgánica dentro del sistema puede incrementar la posibilidad para que los microorganismos que han sobrevivido a los tratamientos en la PTAP se reproduzcan a través de las tuberías de la red y, como consecuencia, puedan presentarse eventos de contaminación que terminen en enfermedades relacionadas directamente con el consumo de agua pero que no son ocasionadas por ineficiencias en su tratamiento en la PTAP (U.S. Environmental Protection Agency, 2006).

En el contexto de esta tesis, algas y cianobacterias hacen parte del universo de microorganismos que pueden estar presentes en las redes de distribución de agua potable (RDAP) debido a su presencia en virtualmente todos los ecosistemas de agua dulce de donde se extrae el agua para potabilización y eventual consumo humano.

Las cianobacterias en general son organismos unicelulares microscópicos; algunas de sus especies pueden generar colonias que se pueden ser visibles al ojo humano y generalmente lucen como partículas diminutas de color verde. Por su parte, las algas tienden a ser más diversas con respecto a su tamaño, encontrando así desde algas unicelulares no móviles hasta complejas estructuras multicelulares como las algas gigantes (Prescott, Harley, & Klein, 2005). En este sentido, tanto algas como cianobacterias representan problemas en las redes de distribución de agua potable, pues algunos de los organismos microscópicos pueden sobrevivir a los tratamientos físicos y químicos de la PTAP alcanzando así las tuberías de la RDAP, en donde pueden llegar a adherirse a las paredes de las tuberías, existentes biopelículas e incluso pueden llegar a formar colonias que eventualmente pueden producir taponamientos en las tuberías.

Es importante mencionar que estos microorganismos no podrían crecer dentro de la RDAP de no ser por la presencia de nutrientes en el agua. Dichos nutrientes, compuestos principalmente por fósforo y en menor proporción nitrógeno, se pueden encontrar en los sistemas de agua superficial de donde se captan las aguas para tratarlas en la PTAP y debido a que la mayoría de las PTAPs no cuentan con procesos para eliminar el fósforo y el nitrógeno presentes en el agua estos nutrientes alcanzan la red de distribución de agua potable sirviendo como alimento para algas y cianobacterias presentes en el sistema (World Health Organization, 2003). Estos nutrientes son en su mayoría productos residuales de actividades humanas, por ejemplo la escorrentía agrícola, de carreteras y tratamientos inadecuados de aguas residuales, y se consideran contaminantes de las aguas superficiales. Cuando estos nutrientes alcanzan una concentración elevada en los cuerpos de agua se produce un fenómeno de eutrofización que conlleva a una proliferación excesiva de algas y cianobacterias en los cuerpos de agua y por consiguiente también se produce un aumento en la concentración de dichos microorganismos en la PTAP cuando el cuerpo de agua eutrofizado se usa como fuente de captación.

Además de los problemas hidráulicos que puede ocasionar el crecimiento de algas y cianobacterias en las RDAPs, estos microorganismos también pueden ser responsables de elevar los niveles de toxinas presentes en el agua generando así serios problemas de salud pública. Las toxinas generadas por algunas especies de algas y por las cianobacterias, que incluyen hepatotoxinas y neurotoxinas, pueden ser lo suficientemente potentes para matar un animal en cuestión de minutos (U.S. Environmental Protection Agency, 2002).

Debido a lo mencionado anteriormente es que resulta importante tratar de recrear las condiciones de las redes de distribución de agua potable para poder determinar los factores ambientales e hidráulicos que permiten el crecimiento de algas y cianobacterias en estos sistemas de distribución.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Determinar la factibilidad del crecimiento de algas y cianobacterias en una tubería de policloruro de vinilo (PVC) que transporta agua potable y está expuesta a la luz solar con el fin último de comprender los efectos que este crecimiento puede tener en la hidráulica de la tubería de un sistema de distribución de agua potable y en la salud pública.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar la influencia hidráulica del crecimiento de algas y cianobacterias generadas a partir de la adición de nutrientes (fosfato diamónico) en el montaje y analizar las pérdidas por fricción obtenidas y compararlas con los resultados obtenidos en el estudio previo a este.



- 
- Realizar pruebas microbiológicas con ayuda de kits de identificación de algas y cianobacterias para identificar y establecer la existencia de estos microorganismos en el montaje y en la tubería de PVC.
  - Determinar las consecuencias que genera la presencia de algas y cianobacterias en los sistemas de distribución de agua potable en la salud pública.

## 2. Antecedentes

---

La Universidad de Los Andes ha venido desarrollando diferentes proyectos en los cuales se llevan a cabo investigaciones acerca del crecimiento de biopelículas en las RDAPs y en alcantarillados. En estos estudios se han analizado diferentes parámetros y aspectos como la relación entre el material de la tubería y el crecimiento de la biopelícula, el efecto hidráulico que éstas producen, la influencia de la fuente de carbono en el crecimiento de la biopelícula, los factores que favorecen el desarrollo y crecimiento de la biopelícula, entre otros. Pero hasta ahora los estudios realizados se han centrado en las biopelículas formadas por asociaciones de bacterias.

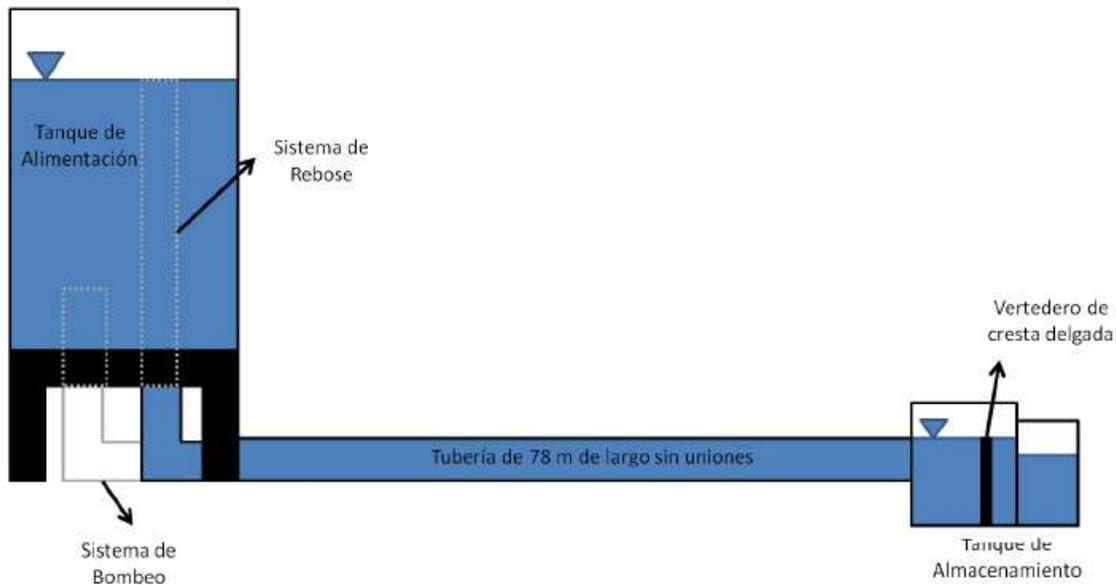
Es a partir del 2011 con las tesis de Laura Nieto y Sara Gacharná que se ha empezado una investigación centrada en el crecimiento de algas y cianobacterias en las redes de distribución de agua potable.

### ***2.1 Tesis Laura Nieto: Estudio de las ecuaciones que describen el flujo turbulento hidráulicamente liso: revisión del Diagrama de Moody y las ecuaciones de Colebrook-White y Blasius.***

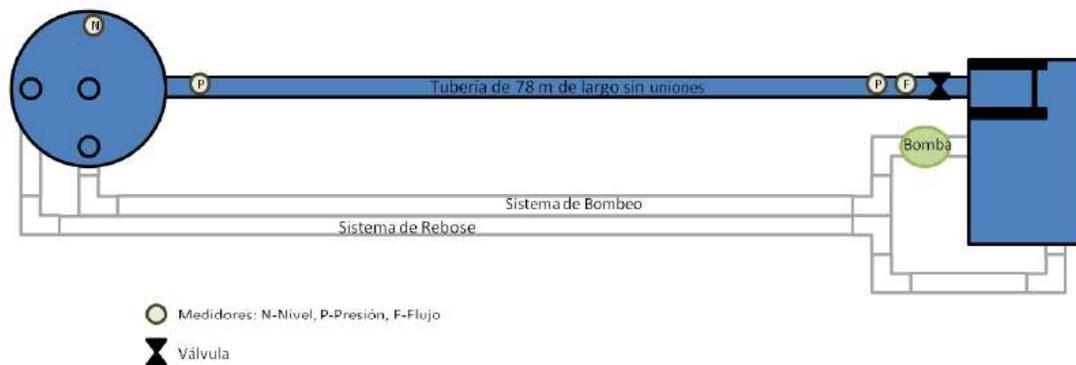
En el desarrollo de esta tesis se llevó a cabo la construcción de un modelo físico en las instalaciones de PAVCO que tiene como fin llevar a cabo pruebas para estudiar el comportamiento del FTHL para determinar, a partir de este, el factor de fricción de las tuberías modernas y revisar las ecuaciones existentes (Nieto, 2011).

El montaje consiste en un sistema de distribución de agua a presión con retroalimentación. Como una descripción general del montaje, este cuenta con una tubería principal sin uniones en PVC de 6" de diámetro de 78 m de longitud sin uniones, un tanque de alimentación con 54" de diámetro y 6 m de longitud, un segundo tanque que tiene como funciones medir el caudal transportado por la tubería en un vertedero de pared delgada instalado al final de esta y almacenar el agua del sistema. Adicionalmente el montaje cuenta con una bomba, medidores electrónicos de presión y caudal, y unos manómetros de mercurio que permiten tomar medidas manuales de presión (Nieto, 2011).

A continuación se presenta un esquema del modelo:

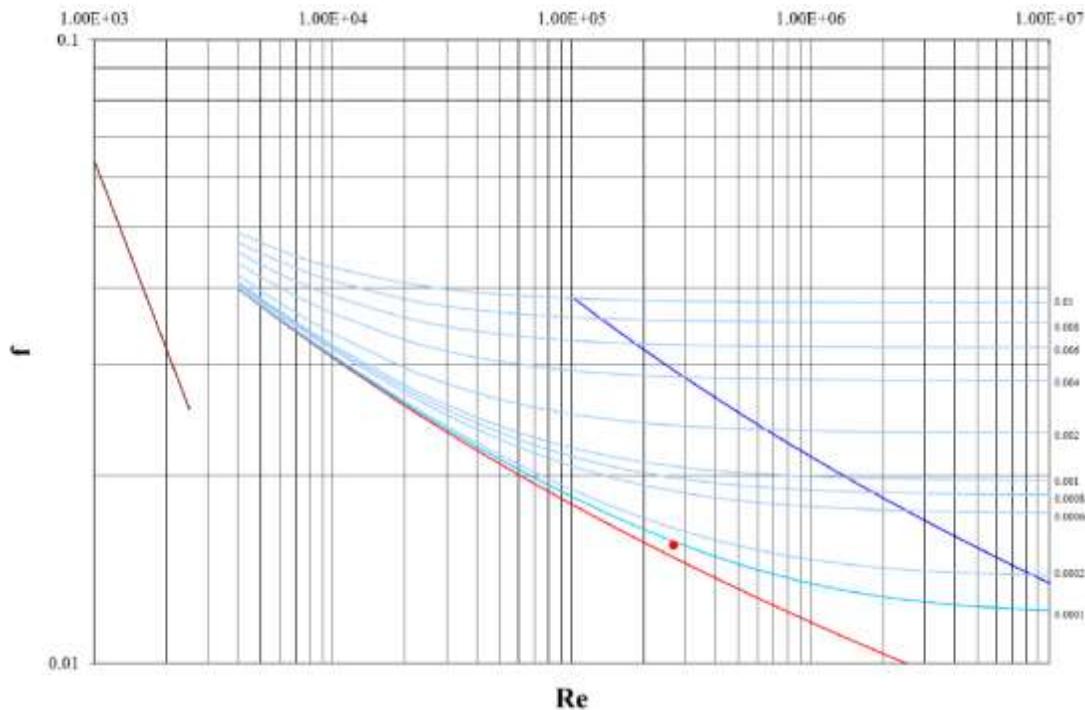


**Figura 1. Esquema del Modelo Físico (sin escala) (Nieto, 2011).**



**Figura 2. Esquema del Modelo Físico (vista en planta sin escala) (Nieto, 2011).**

Al finalizar la construcción del montaje, se realizaron algunas pruebas hidráulicas para conocer qué tipo de flujo se estaba presentando en la tubería. Para esto se procedió a comparar los resultados obtenidos con el Diagrama de Moody. Un ejemplo de esta comparación se presenta en la Figura 3, en donde se puede observar que el resultado presentado se encuentra justo debajo de la zona de transición alcanzando a probar que el flujo que se presenta en la tubería es un Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL) (Nieto, 2011). Debido a que en algunas ocasiones se presentó un Flujo Transicional (FT) se aconseja realizar la verificación del tipo de flujo mediante la determinación del espesor de la subcapa laminar viscosa.



**Figura 3. Comparación de resultados con el Diagrama de Moody (Nieto, 2011).**

Adicionalmente, se corroboró que para el tipo de tubería que se instaló en el montaje (PVC) se requiere de un caudal muy alto para que el flujo se empiece a comportar como FT, lo que generaría velocidades igualmente altas y que se encuentran bastante alejadas de los límites máximos para RDAPs (Nieto, 2011).

Debido a que la realización de pruebas experimentales en campo abierto requiere mayor cuidado de las variables que aquellas realizadas en un laboratorio debido a que las condiciones ambientales y físicas del montaje no son siempre las ideales, el autor aconseja realizar nuevas campañas de toma de datos teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones (Nieto, 2011):

1. Antes de comenzar las mediciones de los manómetros, las mangueras de estos se deben purgar adecuadamente. Debido a la longitud de las mangueras este proceso puede ser bastante largo, pero mantener las mismas libres de aire garantiza unas medidas más estables y confiables.
2. Se debe verificar que el sistema no presente fugas por ningún lado para evitar errores adicionales en las mediciones.
3. Antes de comenzar las mediciones en cada prueba, se debe verificar que el sistema se haya estabilizado para evitar datos iniciales que generen ruido en el total de datos y alteren el resultado final.

## **2.2 Tesis Sara Gacharná: *Factores que favorecen la generación y crecimiento de algas en redes de distribución de agua potable***

En esta tesis se llevan a cabo pruebas hidráulicas en el montaje diseñado en la tesis *Estudio de las ecuaciones que describen el flujo turbulento hidráulicamente liso: revisión del Diagrama de Moody y las ecuaciones de Colebrook-White y Blasius* a fin de evaluar la influencia hidráulica del crecimiento de algas generadas por la adición semanal de nutrientes (fertilizante: fosfato diamónico).

En este estudio se realizó una modificación al montaje que consistió en la instalación de testigos extraíbles en los últimos tres metros de la tubería a fin de realizar un seguimiento riguroso al interior de la tubería para verificar el crecimiento de algas (Gacharná, 2011).

A fin de favorecer el crecimiento de las algas en la tubería se suministró semanalmente 55.63 gramos de fosfato diamónico, se recirculó diariamente el agua por un periodo de 8 horas y una velocidad aproximada de 0.5 m/s y se mantuvo el cloro residual libre del sistema en una concentración de 0.3 mg/L (Gacharná, 2011).

Durante el segundo semestre del 2011, el autor de esta tesis realizó pruebas hidráulicas y microbiológicas con el objetivo de comprobar el crecimiento de algas y cianobacterias en el sistema y evaluar la influencia hidráulica que estos microorganismos pudieran tener en él. Las pruebas hidráulicas se realizaron dos veces por semana durante aproximadamente doce semanas, y las pruebas microbiológicas se llevaron a cabo en las últimas semanas del estudio.

Para comprobar si el tipo de flujo que se presentaba en la tubería seguía siendo FTHL, se hizo uso de un Diagrama de Moody basado en las diferentes ecuaciones desarrolladas, en donde es posible observar de forma clara los límites de las diferentes ecuaciones y como se distribuyen los datos con respecto a estos límites (Gacharná, 2011). En la Figura 4, se puede observar que la mayoría de los datos tomados durante el tiempo del estudio se encuentran ubicados sobre la línea límite del FTHL planteada por Prandtl, otros tantos sobre dicha línea y otros por debajo de este límite teórico establecido en 2.51. Por otro lado, todos los datos graficados en la Figura 4 se encuentran por debajo del límite establecido por Colebrook-White, que corresponde a la línea teórica de 5.21. Es así, como se corroboró que los resultados hidráulicos no se encuentran dentro de la zona de transición, sino dentro de la zona del FTHL (Gacharná, 2011).

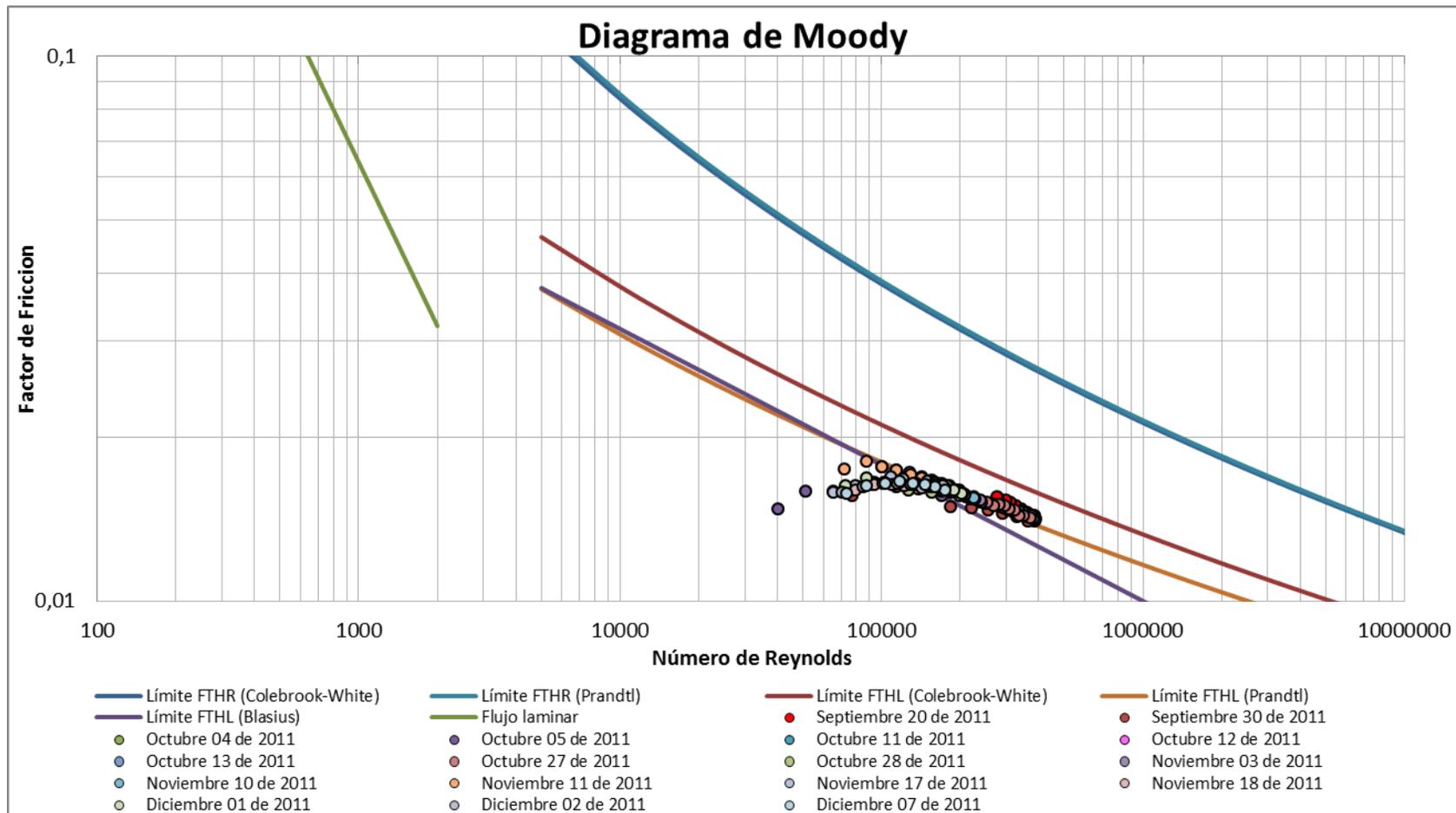
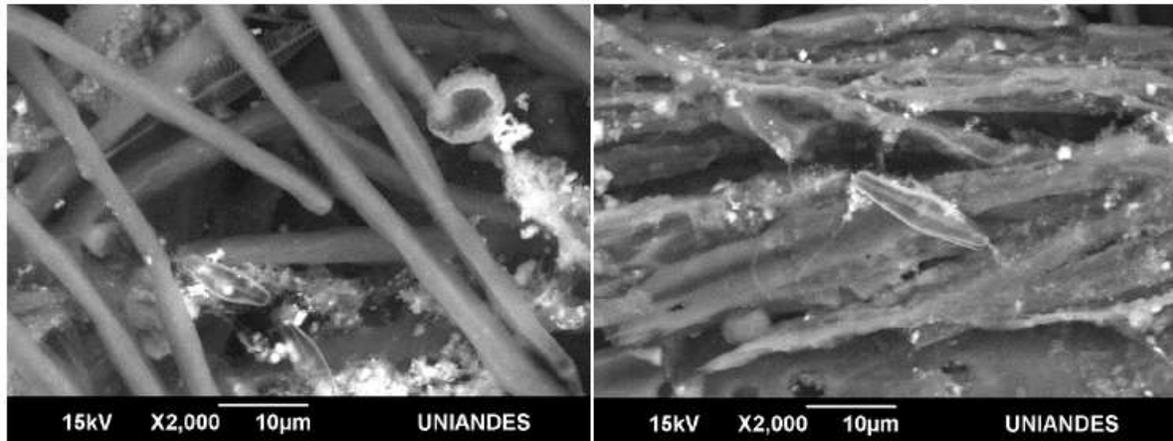


Figura 4. Diagrama de Moody, comprobación del ajuste de los datos tomados en el 2011-2 en la zona de transición (Gacharná, 2011).

Por otra parte, las pruebas microbiológicas se llevaron a cabo usando la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) y comparando la morfología de las imágenes obtenidas con microfotografías de las estructuras de algas y cianobacterias. Con el uso de esta técnica, se encontraron microorganismos que al parecer hacen parte del género *Phormidium* de las cianobacterias, diatomeas y un tipo de cianobacteria llamada *Hydrodictyon* (Gacharná, 2011).



**Figura 5. Diatomeas y estructuras filamentosas, muestra tomada de gavión 2 (Gacharná, 2011).**

Debido a que estos resultados están solamente basados en comparaciones, el autor recomienda que en el futuro se lleven a cabo otro tipo de pruebas, más específicas, para poder garantizar la total y absoluta validez de los resultados microbiológicos obtenidos en este estudio.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Aspectos microbiológicos y biológicos

##### 3.1.1 Definición algas

El término alga era usado originalmente para definir plantas acuáticas simples, pero en la actualidad este término no debe ser usado en los esquemas de clasificación taxonómica. En este sentido, la palabra alga se usa para identificar un grupo de organismos eucariotas que comparten algunas características morfológicas, reproductivas, ecológicas y bioquímicas (Prescott, Harley, & Klein, 2005).

Las algas se encuentran comúnmente en sistemas acuáticos, en donde pueden estar suspendidas (planctónicas) o adheridas a alguna superficie y viviendo en el fondo (bentónicas) (Mohapatra P. K., 2008). Estos organismos también pueden crecer en rocas húmedas, madera, árboles y en la superficie del suelo húmedo.

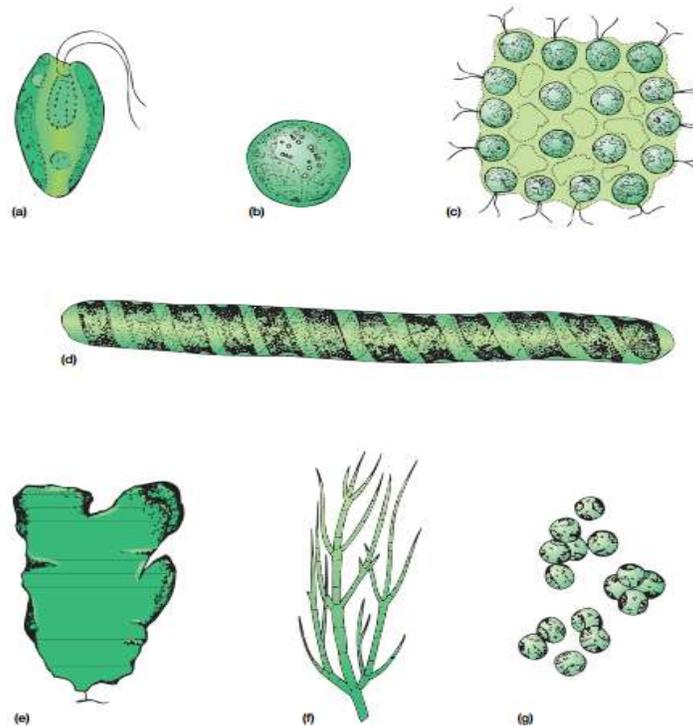
Algunas de las propiedades más importantes en las algas son: la morfología y la química de su pared celular en caso de estar presente en el organismo, la forma en la que se almacena la comida o los productos de la fotosíntesis, la clorofila o pigmentos que contribuyen a los procesos fotosintéticos, el número de flagelos y su ubicación, su hábitat y sus estructuras reproductivas. Con base en las propiedades anteriormente mencionadas es posible clasificar las algas en divisiones que resuman sus características más importantes (Tabla 1).

**Tabla 1. Clasificación de las algas basada en características celulares. Modificado de (Prescott, Harley, & Klein, 2005).**

División	Nombre Común	Pigmentos			Productos de almacenamiento	Flagelos	Pared Celular	Habitat*
		Clorofila	Ficobilinas	Carotenoides				
<i>Chlorophyta</i>	Algas verdes ( <i>Chlamydomonas</i> )	a,b	-	$\beta$ -caroteno, $\pm$ $\alpha$ -caroteno, xantofilas	Azúcares, almidón, fructosa	1, 2-8; igual, apical o subapical	Celulosa, manano, proteína, CaCO <sub>3</sub>	ad, as, ass, t
<i>Charophyta</i>	Stoneworts ( <i>Chara</i> )	a,b	-	$\alpha$ -, $\beta$ -, $\tau$ -caroteno, xantofilas	Almidón	2; subapical	Celulosa, CaCO <sub>3</sub>	ad, as
<i>Euglenophyta</i>	Euglenoids ( <i>Euglena</i> )	a,b	-	$\beta$ -caroteno, xantofilas	Paramilon, aceites, azúcares	1-3; ligeramente apical	No presente	ad, as, ass, t
<i>Chrysophyta</i>	Algas oro-marrón, amarilla-verde, diatomeas ( <i>Cyclotella</i> )	a, c1/c2, pocas veces d	-	$\alpha$ -, $\beta$ -, $\epsilon$ -caroteno, fucoxantina, xantofilas	Chrysolaminarin, aceites	1-2; igual o desigual, apical; o ninguno	Celulosa, sílice, CaCO <sub>3</sub> , quitina, o no presente	ad, as, ass, t
<i>Phaeophyta</i>	Algas marrón ( <i>Sargassum</i> )	a,c	-	$\beta$ -caroteno, fucoxantina, xantofilas	Laminarina, manitol, aceites	2; desigual, lateral	Celulosa, ácido alginico	as, ass
<i>Rhodophyta</i>	Algas rojas ( <i>Corallina</i> )	a, pocas veces d	C-ficocianina, aloficocianina, ficoeritrina	Xantofilas ( $\beta$ -caroteno, zeaxantina, $\pm$ $\alpha$ -caroteno)	Almidón	No presente	Celulosa, xilanos, galactanos, CaCO <sub>3</sub>	ad, as, ass
<i>Pyrrhophyta</i>	Dinoflagelados ( <i>Gymnodinium</i> )	a, c1, c2	-	$\beta$ -caroteno, fucoxantina, peridínina, dinoxantina	Almidón, glucano, aceites	2; 1 detrás, 1 rodeando	Celulosa, o no presente	ad, as, ass

\* Abreviaciones usadas: agua dulce (ad), agua salobre (as), agua salada (ass), ecosistemas terrestres (t)

La morfología de las células y/o su cuerpo (talo) es otra de las propiedades de las algas que permite identificar la diversidad presente en estos organismos. Existen notables variaciones en la estructura de las células y talos, desde algas unicelulares no móviles hasta complejas estructuras multicelulares como las algas gigantes. Es así como las algas pueden ser unicelulares móviles como *Cryptomonas*, unicelulares inmóviles como *Palmellopsis* y *Chrysocapsa*, coloniales como *Gonium*, filamentosas como *Spirotaenia*, membranosas como *Monostroma*, o tubulares como *Stigeoclonium*. (Figura 6).



**Figura 6. Cuerpos esquemáticos de las algas: a) *Cryptomonas*, b) *Palmellopsis*, c) *Gonium*, d) *Spirotaenia*, e) *Monostroma*, f) *Stigeoclonium*, g) *Chrysocapsa* (Prescott, Harley, & Klein, 2005).**

Con respecto a la nutrición de las algas, estas pueden ser autótrofas o heterótrofas. Aunque la mayoría de estos organismos son fotoautótrofos, es decir que solo requieren luz y CO<sub>2</sub> como su principal fuente de energía y carbón, existen también algunas algas quimioheterotróficas (muchas de las algas verdes planctónicas) que necesitan materia orgánica como fuente de carbón y extraen la energía de reacciones químicas que se presenten en su ambiente.

### 3.1.2 Definición cianobacterias

Las cianobacterias son consideradas el grupo más grande y diverso de las bacterias fotosintéticas. La mayoría de las cianobacterias son fotoautótrofas aeróbicas. Su proceso de vida requiere solamente de agua, dióxido de carbono, sustancias inorgánicas y luz. La fotosíntesis es su principal modo de obtención de energía para su metabolismo; aun así, se conocen algunas especies que son capaces

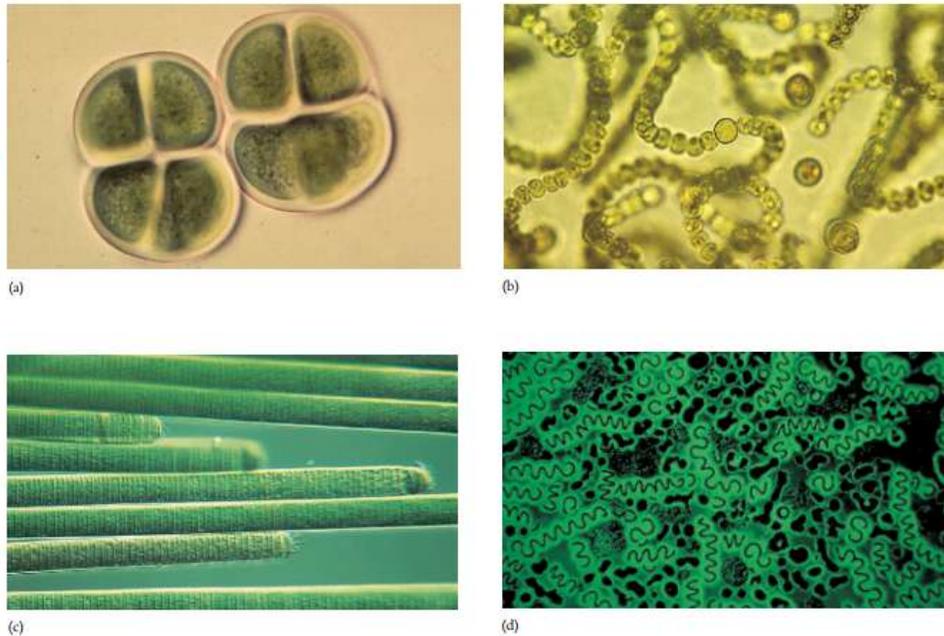
de sobrevivir por largos periodos de tiempo en completa oscuridad y algunas otras que muestran habilidades para desarrollar una nutrición heterótrofa (World Health Organization, 1999).

Las cianobacterias son organismos que cuentan con una gran plasticidad ecológica, lo que ha permitido que colonicen casi todo tipo de ecosistemas, siendo posible encontrarlas desde los polos hasta los desiertos más cálidos (Carrasco, 2007). Este grupo de bacterias son características de ecosistemas acuáticos; pueden llegar a dominar el plancton de lagos y océanos tropicales, pueden estar presentes en ríos, fuentes termales, etc. Además a los ambientes acuáticos se han encontrado ciertas cianobacterias que han logrado adaptarse a ambientes terrestres, especialmente en suelos saturados de agua (World Health Organization, 1999).

Aunque la clasificación de las cianobacterias no está todavía definida, en parte debido a la falta de grupos puros, es posible clasificarlas desde una aproximación bacteriológica y una botánica.

El sistema bacteriológico se basa en la segunda edición del *Manual de Bergey* y divide las cianobacterias en cinco subsecciones. A continuación se describen las cinco subsecciones del sistema bacteriológico explicando a que orden del sistema botánico (Figura 7) corresponde cada sección:

- **Sección I:** (orden Chroococcales en el sistema botánico) Comprende las cianobacterias unicelulares que se reproducen por fisión binaria o gemación. Las células tienen forma esférica, cilíndrica u ovalada (Mohapatra P. K., 2008).
- **Sección II:** (orden Pleurocapsales en el sistema botánico) Agrupa las cianobacterias unicelulares que pueden formar colonias y se multiplican por fusión múltiple, dando lugar a hijas de menor tamaño llamadas baeocitos (Mohapatra P. K., 2008).
- **Sección III:** (orden Oscillatoriales en el sistema botánico). Incluye cianobacterias filamentosas sin heterocistos, que se dividen en un único plano. Su reproducción se produce por una rotura de filamentos y en algunos géneros por la germinación de acinetos, o la formación de hormogonios (Mohapatra P. K., 2008).
- **Sección IV:** (orden Nostocales en el sistema botánico). Dentro de esta sección se encuentran las cianobacterias filamentosas con heterocistos, que se dividen en un solo plano y se reproducen mediante rotura de tricomas, formación de hormogonios o germinación de acinetos (Mohapatra P. K., 2008).
- **Sección V:** (orden Stigonematales en el sistema botánico). Formadas por las cianobacterias filamentosas con heterocistos en las que la división celular se realiza en dos planos, dando lugar a tricomas ramificados. La reproducción se realiza como en las dos secciones anteriores (Mohapatra P. K., 2008).



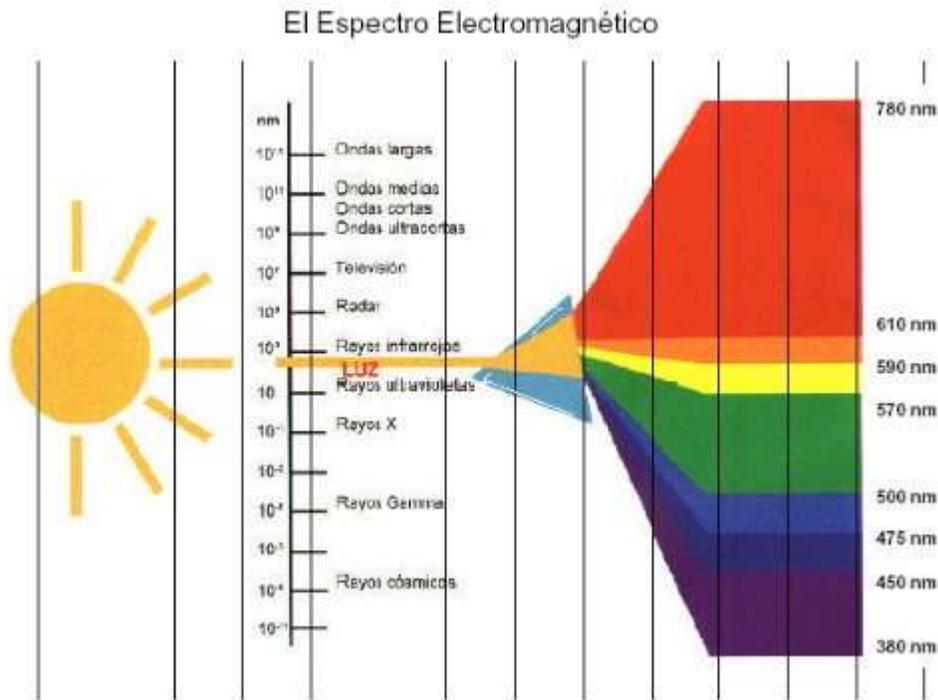
**Figura 7. Cianobacterias representativas: a) *Chroococcus turgidus*, b) *Nostoc*, c) *Oscillatoria*, d) *Anabaena* y *Microcystis aeruginosa* (Prescott, Harley, & Klein, 2005).**

### 3.1.3 Factores que determinan el crecimiento de algas y cianobacterias en las RDAPs

Los factores que determinan el crecimiento de algas y cianobacterias en las RDAPs varían desde factores ambientales, físicos y químicos. Es la interacción entre estos factores que establecen la composición y la cantidad de biomasa que se pueda encontrar a lo largo de la red de distribución.

#### 3.1.3.1 Intensidad de luz

Tanto algas como cianobacterias contienen clorofila a, siendo este el pigmento más importante para capturar la luz y realizar la fotosíntesis. También es posible encontrar en ambos microorganismos otro tipo de pigmentos como los ficobiliproteínas, que junto con la clorofila a ayudan a las cianobacterias a captar energía lumínica eficientemente y a vivir en ambientes donde solo exista luz verde. Estos pigmentos capturan la luz de la parte verde, amarilla y naranja del espectro (500-650 nm) (Figura 8), franja del espectro que no es muy usada por otros organismos fitoplanctónicos (World Health Organization, 1999).

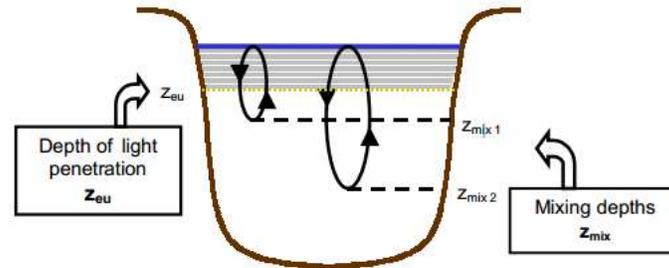


**Figura 8. Espectro electromagnético.**

Fuente: <http://laszlo.com.ar/manual357.htm>

Aquellas las algas y cianobacterias crecen suspendidas en la columna de agua, fitoplancton, la cantidad de luz disponible para absorción depende no solo de la cantidad de luz que llega al cuerpo de agua pero también de la penetrabilidad de la luz en el agua. En todos los ambientes acuáticos, incluso aquellos con un agua muy clara, la intensidad de la luz disminuye a medida que se aumenta la profundidad debido a que los componentes y partículas también disueltas en el agua absorben la luz dentro de la columna de agua. La profundidad a la cual la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis de algas y cianobacterias se vuelve insuficiente se denomina profundidad eufótica ( $z_{eu}$ ) y debajo de este nivel los microorganismos se ven obligados a utilizar la energía almacenada para mantener sus tasas de crecimiento. Sin embargo, la energía que los microorganismos almacenan es limitada y solo dura un periodo corto de tiempo. En consecuencia, si el fitoplancton se encuentra mucho tiempo por debajo de la zona eufótica el crecimiento para. Si la profundidad de la mezcla de aguas ( $z_{mix}$ ) es más grande que la profundidad eufótica el movimiento del agua transportará las algas y las cianobacterias dentro y fuera de la zona con luz. La proporción de tiempo que un microorganismo se encuentre en la zona con luz es determinado por el radio entre la profundidad eufótica y la profundidad de la mezcla de aguas ( $z_{eu}/z_{mix}$ ) (Figura 9). Es así como si  $z_{mix}$  es relativamente grande para el cuerpo de agua los microorganismos estarán un periodo de tiempo

corto en la zona con luz y por consiguiente su crecimiento se verá restringido (Sherman, y otros, 2000).



**Figura 9. Efecto de la luz y la profundidad del cuerpo de agua en el crecimiento de algas y cianobacterias (Sherman, y otros, 2000).**

### 3.1.3.2 Nutrientes

Tanto algas como cianobacterias necesitan de nutrientes para crecer. Aunque el rango de nutrientes que estos microorganismos requieren es amplio, es la disponibilidad de nitrógeno y fósforo lo que usualmente regula el crecimiento de algas y cianobacterias cuando las condiciones de luz son suficientes (Sherman, y otros, 2000).

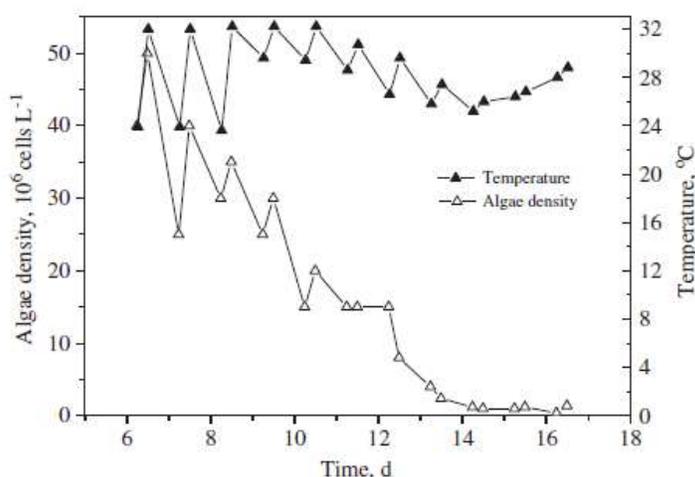
Es importante entender que no basta con la presencia de fósforo y nitrógeno en el ambiente para el crecimiento de algas y cianobacterias; estos nutrientes deben exhibir un rango de biodisponibilidad para que los microorganismos los puedan absorber y posteriormente usar como parte de su metabolismo.

El fósforo que ha sido sintetizado en material orgánico puede estar biodisponible gracias a procesos de oxidación de la materia orgánica o por descomposición biológica. Es así como las formas no absorbidas de fosfatos se encuentran biodisponibles para el consumo de algas y cianobacterias. Por su parte, las formas inorgánicas del nitrógeno son las que presentan mayor movilidad y biodisponibilidad. Las formas orgánicas necesitan ser oxidadas primero antes de estar disponible para los microorganismos. Además al fósforo y el nitrógeno el carbono orgánico también presenta un rango de niveles de biodisponibilidad crítico. El material orgánico derivado de fertilizantes, aguas residuales agrícolas y pastos tiene un alto contenido de carbono lábil, nitrógeno y fósforo que contribuyen al crecimiento de algas y cianobacterias (Sherman, y otros, 2000).

### 3.1.3.3 Temperatura

A pesar de que la temperatura para el desarrollo óptimo de algas y cianobacterias difiere entre clases y géneros, la temperatura es un factor determinante en el crecimiento de estos organismos en cuerpos de agua (Figura 10).

Según un estudio llevado a cabo en China, la temperatura en el agua y el crecimiento de algas están directamente relacionados. En este estudio se concluyó que la densidad de algas presentes en el cuerpo de agua decae de  $40 \times 10^6$  células/L a  $4.8 \times 10^6$  células/L cuando la temperatura en el agua disminuye aproximadamente  $7^\circ\text{C}$ . De la información recolectada en el estudio fue posible determinar que a una temperatura de  $29^\circ\text{C}$  se alcanza una densidad de algas de  $10 \times 10^6$  células/L. Lo anterior explica parcialmente porque los brotes de algas ocurren en el verano cuando las temperaturas son altas, el nivel de agua es más bajo y las concentraciones de nutrientes disponibles en el agua son altas (Shen , Zhu, Cheng, Zhang, Zhang, & Xu, 2010).



**Figura 10. Efecto de la temperatura del agua en el crecimiento de algas (Shen , Zhu, Cheng, Zhang, Zhang, & Xu, 2010).**

Debido a la fuerte relación que existe entre la temperatura del aire y la temperatura de la superficie del agua, las concentraciones de algas en el cuerpo de agua se incrementan a medida que la temperatura aumenta de  $18^\circ\text{C}$  a  $22^\circ\text{C}$ ; el total de biomasa presente asociadas con las algas alcanza su mayor valor cuando en el día la temperatura se encuentra entre  $21^\circ\text{C}$  y  $24^\circ\text{C}$ , y la concentración de algas decrece una vez se alcanza una temperatura en el agua mayor a  $24^\circ\text{C}$  (Shen , Zhu, Cheng, Zhang, Zhang, & Xu, 2010).

### 3.1.3.4 Material de las tuberías

Los materiales de los cuales se conforma una red de distribución de agua potable pueden llegar a proporcionar nutrientes a los microorganismos facilitando su crecimiento dentro del sistema de distribución. Además de esto, el material de la tubería también influye en la rapidez con la cual se crean las biopelículas y en la abundancia de dicha película (Vargas, 2004).

Se han llevado a cabo diferentes estudios para comparar los diferentes materiales y la tasa de crecimiento de la biopelículas. Es de suma importancia tener claro que estos estudios se han

llevado a cabo con diferentes condiciones y calidades de agua (por ejemplo temperatura del agua y velocidad de flujo), lo cual puede explicar porque todavía no se ha llegado a una conclusión unánime con respecto a este campo de estudio (Keinanen-Toivola, 2006).

A continuación se presentan tres estudios donde se listan los materiales de las tuberías de menor a mayor capacidad de colonización por parte de los microorganismos.

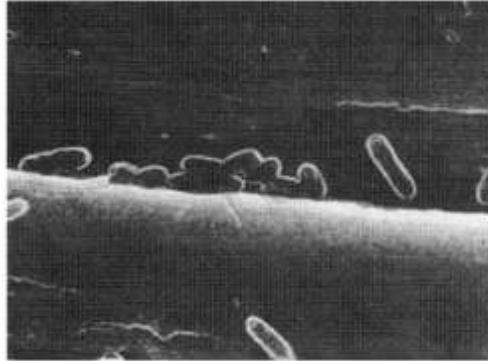
1. Vidrio < acero inoxidable < polipropileno < PVCc (por ejemplo cloruro de polivinilo clorado) < PVCc (PCV no plastificado) < acero dulce < PE (polietileno) < etileno-propileno < látex (Rogers, Downsett, Dennis, Lee , & Keevil , 1994).
2. PE < PVC < acero < cemento (de cemento y acero recubierto, cemento recubierto de hierro fundido, asbestos-cemento) < hierro gris (Niquette, Servais, & Savoir, 2000).
3. PVCu y MDPE (PE de densidad media) < hierro fundido (Kerr, Osborn, Robson, & Handley).

### **3.1.3.5 Rugosidad de la tubería**

La rugosidad de la tubería radica en que al ser esta mayor se incrementa el área superficial y por lo tanto la capacidad de albergar microorganismos en las paredes de la tubería aumenta.

Estudios realizados sugieren que en las superficies rugosas se adhieren los microorganismos a una tasa inicial mayor que en las superficies lisas, pero eventualmente es inevitable que en estas últimas también se presente la formación de biopelículas, siendo este fenómeno más una cuestión de tiempo pues en los resultados finales la biopelícula se formará sin importar el material (Vargas, 2004).

Cabe resaltar que los “baches” presentes en las tuberías debido a su rugosidad puede albergar un gran número de microorganismos (Figura 11. Imagen real de la acumulación de microorganismos en una tubería ). Esto puede eventualmente influir en el efecto del desinfectante y las fuerzas cortantes en la biopelícula, pues en estos lugares los microorganismos son menos susceptibles a las consecuencias que estos puedan generar. En este sentido la tubería en sí se convierte en una protección a la biopelícula permitiendo que esta se desarrolle con mayor facilidad (Vargas, 2004).



**Figura 11. Imagen real de la acumulación de microorganismos en una tubería (Vargas, 2004).**

### **3.1.3.6 Velocidad de flujo**

La velocidad de flujo y el tipo de flujo que se presente en la tubería puede incidir directamente en la cantidad de microorganismos que eventualmente se pueden adherir a las paredes de esta.

Es importante entender que la relación entre la velocidad de flujo y la adhesión de microorganismos a las paredes de la tubería no es tan sencilla. Velocidades de flujo bajas pueden promover la formación de biopelículas. Por otro lado, velocidades de flujo altas pueden promover el incremento en la cantidad de microorganismos debido a las condiciones de absorción de nutrientes (Keinanen-Toivola, 2006), o por el contrario disminuir su crecimiento debido al incremento en el contacto microorganismo-desinfectante, pero velocidades altas no pueden evitar la adhesión de los microorganismos a la tubería, ni desprender en su totalidad una biopelícula (Vargas, 2004).

### **3.1.3.7 Desinfectante**

Los agentes químicos más usados para la remoción de algas y cianobacterias son el cloro, dióxido de cloro, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio y ozono los cuales pueden matar, inhibir, o remover las células de estos microorganismos.

Numerosos estudios han mostrado que un pretratamiento con preoxidantes como cloro, dióxido de cloro, hipoclorito de calcio, ozono, o permanganato pueden mejorar la remoción de algas y cianobacterias debido a que son oxidantes fuertes y pueden inactivar las células, desestabilizar las células, o liberar la materia orgánica extracelular (Shen , Zhu, Cheng, Zhang, Zhang, & Xu, 2010).

El cloro mata las células de algas y cianobacterias penetrando a través de su pared celular y posteriormente destruyendo las enzimas dentro del citoplasma (Shen , Zhu, Cheng, Zhang, Zhang, & Xu, 2010).

## **3.2 Aspectos Salud Pública**

En los últimos años, las cianobacterias se han convertido en un problema global debido a su capacidad de producir compuestos que comprometen la calidad del agua potable. El incremento en

la descarga de nutrientes (como resultado de la escorrentía agrícola y descargas de agua residual) ha llevado a incrementos en las floraciones de cianobacterias las cuales han estado acompañadas por muertes de peces, ganado y animales silvestres, así como de enfermedades y muertes en humanos (Richardson & Ternes, 2011). Las toxinas producidas por estos microorganismos han sido implicadas en estos efectos negativos.

### 3.2.1 Clasificación de las cianotoxinas

Los mecanismos de toxicidad de las cianobacterias que actualmente se conocen son muy diversos y van desde efectos hepatotóxicos, neurotóxicos y dermatotóxicos que generalmente producen una inhibición en la síntesis de proteínas.

**Tabla 2. Características generales de las cianotoxinas (World Health Organization, 1999).**

Grupo	Principal órgano afectado en mamíferos	Género de cianobacterias
<b>Péptidos Cíclicos</b>		
Microcistinas	Hígado	<i>Microcystis, Anabaena, Planktothrix (Oscillatoria), Nostoc, Hapalosiphon, Anabaenopsis</i>
Nodularinas	Hígado	<i>Nodularia</i>
<b>Alcaloides</b>		
Anatoxina-a	Sinapsis nerviosa	<i>Anabaena, Planktothrix (Oscillatoria), Aphanizomenon</i>
Anatoxina-a (S)	Sinapsis nerviosa	<i>Anabaena</i>
Aplisiatoxina	Piel	<i>Lyngbya, Schizothrix, Planktothrix (Oscillatoria)</i>
Cilindrospermopsina	Hígado	<i>Cylindrospermopsis, Aphanizomenon, Umezakia</i>
Lingbiatoxina-a	Piel, sistema gastrointestinal	<i>Lyngbya</i>
Saxitoxinas	Axones de los nervios	<i>Anabaena, Aphanizomenon, Lyngbya,</i>
Lipopolisacáridos (LPS)	Irritante potencial; afecta cualquier tejido expuesto	Todas

#### 3.2.1.1 Péptidos cíclicos hepatotóxicos - microcistinas y nodularinas

A nivel mundial, la cianotoxina más frecuente en floraciones de agua fresca y salobre son la toxina péptida cíclica de la microcistina y la familia nodularina. Estas toxinas representan un gran problema para las PTAPs en lo referente a la producción de agua potable cuando el agua de captación para el tratamiento proviene de aguas superficiales contaminadas con cianobacterias.

En caso de presentarse una exposición aguda por pocas horas, las hepatotoxinas cianobacterianas (toxinas del hígado) producen la muerte debido a una hemorragia en este órgano.

Los péptidos cíclicos son productos naturales relativamente grandes que contienen ya sea cinco (nodularinas) o siete (microcistinas) aminoácidos. Son solubles en agua y, excepto tal vez por unas pocas microcistinas algo más hidrofóbicas, son incapaces de penetrar directamente en las membranas de lípidos de origen animal, vegetal y de las células bacterianas. Por lo tanto, para obtener su efecto tóxico, la absorción en las células ocurre a través de transportadores de membrana que generalmente llevan bioquímicos esenciales o nutrientes (World Health Organization, 1999).

### **3.2.1.2 Alcaloides neurotóxicos - aflatoxinas y saxitoxinas**

Las toxinas alcaloides son diversas, tanto en sus estructuras químicas como en sus efectos tóxicos a mamíferos. Los alcaloides, en general, son un amplio grupo de compuestos heterocíclicos nitrogenados (es decir, que contienen estructuras de anillo con al menos un enlace carbono-nitrógeno) que por lo general tienen un peso molecular bajo o moderado.

Las cianotoxinas alcaloides no sulfatadas de agua dulce (aflatoxinas y saxitoxina) son neurotoxinas. Los derivados sulfatados de la saxitoxina también son neurotoxinas, pero el sulfatado alcaloide cilindrospermopsina bloquea la síntesis de proteínas con un gran impacto en las células del hígado. Algunas cianobacterias marinas también contienen alcaloides (lingbiatoxinas y aplisiatoxinas) que son irritantes de la piel (dermatoxinas), estando también asociadas con síntomas de gastroenteritis y fiebre.

Debido a las diferentes estabilidades químicas de los alcaloides, a menudo experimentan transformaciones espontáneas, donde los subproductos pueden tener un potencial tóxico mayor o menor que la toxina progenitora. Algunos también son susceptibles a la degradación fotolítica directa (World Health Organization, 1999).

### **3.2.1.3 Alcaloides citotóxicos**

La cilindrospermopsina es un alcaloide de guanidina cíclico que en su forma más pura afecta principalmente el hígado. En estudios realizados con ratones también se ha observado que la inyección de cilindrospermopsina o su administración vía oral a estos animales produce síntomas patológicos en los riñones, el bazo, el timo y el corazón.

### **3.2.1.4 Alcaloides dermatotóxicos - aplisiatoxinas y lingbiatoxina**

Cianobacterias marinas bentónicas como *Lyngbya*, *Oscillatoria* y *mayo Schizothrix* producen toxinas que causan dermatitis severa en los nadadores que están en contacto con los filamentos. La actividad inflamatoria de *Lyngbya* es causada por aplisiatoxinas y debromoaplisiatoxina, las cuales son potentes promotoras de tumores y activadores de la proteína quinasa C (World Health Organization, 1999).

### **3.2.1.5 Toxinas irritantes – lipopolisacáridos**

Los lipopolisacáridos (LPS) son un componente integral de la pared celular de las bacterias Gram negativas, incluyendo las cianobacterias, y puede provocar irritación y las respuestas alérgicas en los tejidos humanos y animales que entran en contacto con los compuestos. En general, el componente de ácido graso de la molécula de LPS es el que provoca una irritación de la respuesta alérgica en humanos y mamíferos.

Los LPS de las cianobacterias son considerablemente menos potente que los LPS de bacterias gram negativas patógenas, como Salmonella. La estabilidad química de los LPS de las cianobacterias en las aguas superficiales es desconocido (World Health Organization, 1999).

### **3.2.2 Peligros para la salud humana**

Las evidencias epidemiológicas resultantes de estudios realizados sobre poblaciones humanas que han mostrado signos de intoxicación o de enfermedades atribuibles a la presencia de cianotoxinas en el agua demuestran directamente la relación entre la exposición a la toxina y los daños sobre la salud humana.

Las personas pueden estar expuestas a eventos de toxicidad aguda o crónica. Aunque la toxicidad aguda es el problema más obvio de las intoxicaciones por cianobacterias (se han reportado muertes humanas como consecuencia a la exposición intravenosa a través de la diálisis renal) es muy difícil que los seres humanos puedan ingerir una cantidad suficiente de cianobacterias para alcanzar una dosis letal aguda. Mientras tanto, exposiciones crónicas a cianotoxinas pueden resultar en efectos adversos para la salud como la posibilidad de carcinogénesis y la promoción de crecimiento tumoral (World Health Organization, 1999).

Existe varios tipos de exposiciones a las cianotoxinas, pero las principales preocupaciones para la salud pública se relacionan con la exposición recreacional y oral por medio del agua que beben las personas.

La exposición recreacional está relacionada con ciertos casos fatales que podrían atribuirse a intoxicaciones con cianotoxinas a partir de la exposición a niveles peligrosos en aguas no tratadas, razón por la cual se ha convertido en una de las principales preocupaciones para la salud pública. En este tipo de exposición se identifican tres rutas por las cuales las cianotoxinas pueden ingresar al organismo: el contacto directo de las partes expuestas del cuerpo, incluyendo áreas sensibles como ojos, oídos, boca y garganta; la ingestión accidental y la inhalación de agua.

En un estudio epidemiológico retrospectivo se encontró que los efectos sobre la salud, en un evento de exposición recreacional, ocurrieron con densidades bajas de cianobacterias y guardan una clara relación con la población celular pero no con la concentración de microcistinas. Los efectos medidos fueron: irritación ocular, rash cutáneo, vómito, diarrea, signos de resfrío, úlceras en la boca y fiebre.

Estos signos y síntomas mostraron un Odds Ratio<sup>1</sup> (OR) elevado (3.44) para las personas que estuvieron en contacto con el agua con más de 5000 células de cianobacterias/ml, por más de una hora. Se encontraron ORs similares para las mismas manifestaciones clínicas en la gente que se bañó en las aguas con 5000-20000 células de cianobacterias/ml (2.71) y con más de 80000 células de cianobacterias/ml (2.90) (García, 2005).

Por otra parte, los casos toxicológicos producidos por la ingesta de agua de bebida pueden ser atribuidos a cianotoxinas provenientes de las fuentes de suministro de aguas; en casi todos los casos están involucrados mecanismos que llevan a la liberación de toxinas cianobacterianas a partir de la descomposición de la célula (por ejemplo la lisis artificial de una floración de cianobacterias por aplicación de sulfato de cobre) (García, 2005). Mientras que los tratamientos que se llevan a cabo para la potabilización del agua en las PTAPs pueden remover las cianotoxinas ligadas a las células intactas, no son efectivos para remover las cianotoxinas disueltas en el agua.

Debido a los efectos adversos sobre la salud humana, en 1997 la OMS estableció un valor guía de 1µg/L (Richardson & Ternes, 2011).

### 3.2.3 Incidentes a nivel mundial sobre la salud humana relacionados con la presencia de cianotoxinas

**Tabla 3. Incidentes sobre la salud de seres humanos en los que se han visto involucradas cianobacterias o los compuestos que ellas producen (Carrasco, 2007).**

Ruta de Exposición	Año	Localización	Casos	Toxina presente	Síntomas
Agua de Bebida	1975	EEUU	Cerca de 5000	No analizada	Gastroenteritis
	1979	Australia	149	Cilindrospermopsina	Gastroenteritis, Daño en el riñón, Daño hepático e intestinal
	1981	Australia	25000 personas	Microcistina	Daño hepático
	72-90	China	Análisis estadístico	Microcistina	Cáncer de hígado primario
	1988	Brasil	2000 incluyendo 88 muertes	No analizada	Gastroenteritis
Aguas Recreativas	1989	Escocia	10	Microcistina	Gastroenteritis, Garganta irritada, Ampollas en la boca, Dolor abdominal, Fiebre, Vómitos, Consolidación pulmonar
	1995	Australia	777	Hepatotoxinas	Gastroenteritis, Síntomas similares a la gripe, Llagas en la boca, Fiebre, Irritación en ojos y orejas
	1996	Escocia	11	Microcistinas	Erupción, Fiebre
Hemodiálisis	1974	EEUU	23	LPS	Fiebre, Mialgia, Resfriado, Vómitos
	1996	Brasil	117 (50 muertos)	Microcistinas	Problemas Visuales, Náuseas, Vómitos, Daño hepático

<sup>1</sup> Forma de representar un riesgo en el sector de la salud pública. Es definido como el cociente entre número de veces que ocurre el suceso frente a cuantas veces no ocurre.

### 3.3 Aspectos Hidráulicos

#### 3.3.1 Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que supone la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad. En una tubería, el número de Reynolds depende de la velocidad, el diámetro de la tubería y la viscosidad cinemática del fluido que esta transporte (Ecuación 3.1).

$$Re = \frac{d \times v}{\nu} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

Re= Número de Reynolds.

d=Diámetro de la tubería.

v= Velocidad del flujo.

$\nu$ = Viscosidad cinemática del fluido.

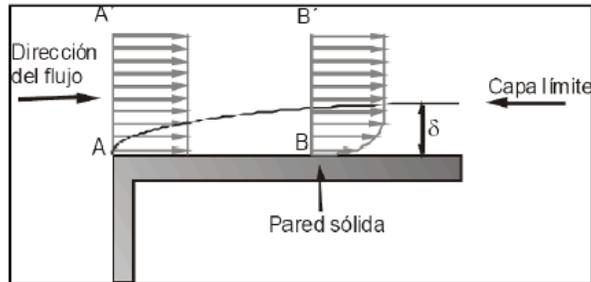
Según el número de Reynolds el flujo se puede clasificar en las siguientes categorías (Saldarriaga, 2007):

- **Flujo Laminar:** Este tipo de flujos se mueve en capas sin presentarse intercambio molecular entre ellas. Si la tubería en la que se presenta este flujo es de sección circular el número de Reynolds debe ser menor a 2000.
- **Flujo turbulento:** Se caracteriza por el intercambio molecular entre las capas que se mueven a diferente velocidad. Las partículas no tienen un vector de velocidad muy definido. El flujo nunca es estacionario. En el caso particular de tuberías de sección circular este tipo de flujo tiene valores mayores a 5000.
- **Flujo de transición:** El caudal para el cual este fenómeno empieza a ocurrir depende de las condiciones del experimento; si la turbulencia remanente del agua en el tanque de entrada es baja la transición demora más en presentarse. Lo contrario ocurre si el grado de aquietamiento es pobre. Si se tiene una tubería de sección circular y se presenta un flujo de transición, el número de Reynolds se encuentra entre 2000 y 5000.

#### 3.3.2 Interacción del flujo con la pared de la tubería

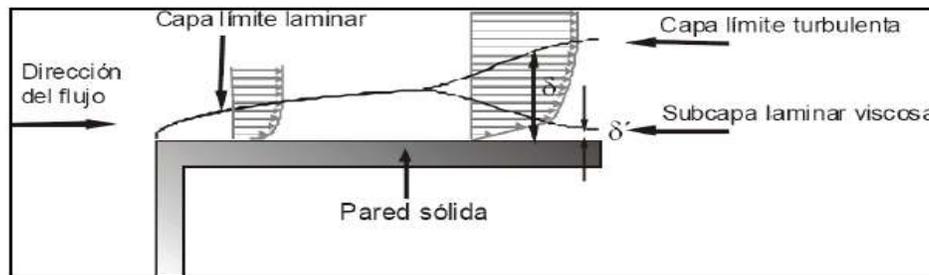
Siempre que un fluido en movimiento interactúa con una pared sólida, el esfuerzo cortante que se genera afecta una zona de dicho flujo. Esta zona se denomina capa límite, la cual puede ser laminar o turbulenta. En la Figura 12 se puede ver como la presencia de la pared sólida afecta la distribución

de velocidades del flujo; en este sentido, la velocidad es cero en la cercanía de la superficie sólida y se va incrementando a medida que el flujo se aleja de esta.



**Figura 12. Capa Límite (Saldarriaga, 2007).**

Cuando se presenta un flujo turbulento, se genera una zona de flujo laminar dentro de la capa límite denominada subcapa laminar viscosa, en donde priman las fuerzas viscosas sobre las inerciales. En la Figura 13 se puede apreciar como el espesor de la subcapa laminar es mucho menor que el de la capa límite ( $\delta' \ll \delta$ ) (Saldarriaga, 2007).



**Figura 13. Desarrollo de una capa límite turbulenta y de la subcapa laminar viscosa (Saldarriaga, 2007).**

La subcapa laminar viscosa depende de la viscosidad cinemática y de la velocidad de corte (Ecuación 3.2).

$$\delta' = \frac{11.6 \cdot \nu}{v_*}$$

**Ecuación 3.2**

donde:

$\delta'$  = Espesor de la subcapa laminar viscosa.

$\nu$  = Viscosidad cinemática.

$v^*$  = Velocidad de corte.

La relación que existe entre  $\delta'$  y el tamaño medio de la rugosidad ( $k_s$ ) de las paredes de la tubería establece la diferencia entre los flujos hidráulicamente lisos (FTHL) y los hidráulicamente rugosos (FTHR) (Saldarriaga, 2007) (Figura 14).

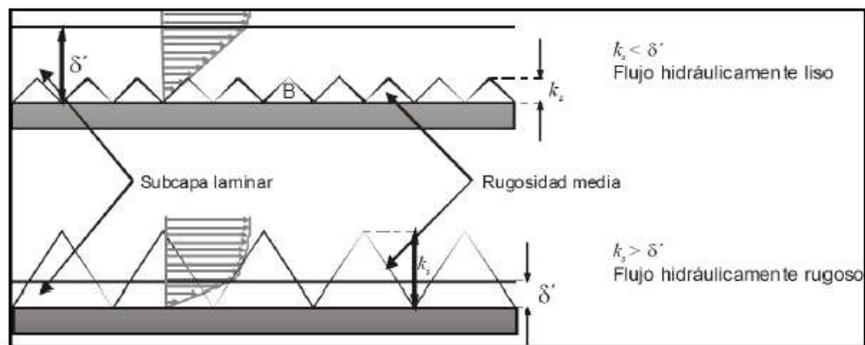


Figura 14. Flujos hidráulicamente lisos e hidráulicamente rugosos (Saldarriaga, 2007).

- **FTHL:** En este caso la rugosidad absoluta es menor que la subcapa laminar viscosa y por lo tanto ésta no influye en el valor del factor de fricción ( $f$ ). Ningún punto queda afectado por las turbulencias que producen las rugosidades, comportándose la tubería como un material liso. Para que el flujo sea hidráulicamente liso, el tamaño de la rugosidad tiene que ser inferior al 30% del espesor de la subcapa laminar viscosa.

$$k_s \leq 0.305\delta'$$

- **Flujo turbulento de transición:** El espesor de la subcapa laminar viscosa se aproxima al valor medio de la rugosidad absoluta, de manera que la rugosidad absoluta sobrepasa la subcapa laminar viscosa de manera intermitente. Este flujo se encuentra dentro de los siguientes límites:

$$0,305\delta' < k_s < 6.10\delta'$$

- **FTHR:** En este caso el tamaño de la rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería es mayor que el espesor de la subcapa laminar viscosa. En este tipo de flujo las pérdidas de energía y el  $f$ , son función únicamente de la rugosidad relativa de la tubería.

$$k_s > 6.10\delta'$$

### 3.3.3 Pérdidas de altura piezométrica generadas por la fricción

En el caso de conductos cerrados el único tipo de energía que puede perderse por razón del movimiento del fluido es la energía de presión, pues la energía cinética debe permanecer constante si el área es constante, y la energía potencial solo depende de la posición. Las pérdidas de altura piezométrica por fricción se pueden expresar mediante la Ecuación 3.3.

$$h_f = f \cdot \frac{l \cdot v^2}{d \cdot 2g} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

$h_f$  = pérdidas por fricción.

$f$  = factor de fricción de Darcy.

$l$  = longitud del tramo de la tubería en el cual se pierde  $h_f$ .

$d$  = diámetro de la tubería.

$v$  = velocidad.

### 3.3.4 Rugosidades en las tuberías

La mayoría de los flujos de agua en tuberías se encuentran dentro de la zona de transición del diagrama de Moody. En 1939, Colebrook y White estudiaron el flujo en esta zona partiendo de las ecuaciones de Prandtl y von Kármán, además de la realización de diferentes experimentos utilizando los diagramas de Nikuradse y de Moody.

En dichos estudios concluyeron que la zona de transición debería de representar un cambio gradual entre las condiciones lisas y rugosas; por lo tanto, la ecuación que definiría el factor de fricción en esta zona de transición debería corresponder a una combinación de la Ecuación 3.4 para flujo hidráulicamente liso, en conjunto con la Ecuación 3.5 correspondiente para flujo hidráulicamente rugoso.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \log_{10} Re \sqrt{f} - 0.8$$

**Ecuación 3.4**

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \log_{10} \left( \frac{d}{k_s} \right) + 1.14$$

**Ecuación 3.5**

Estas ecuaciones se aplican a casos extremos. La primera es válida únicamente para tuberías hipotéticas con una rugosidad absoluta con valor de cero y la segunda aplica para tuberías con rugosidades exageradas con respecto a las rugosidades de las tuberías comerciales.

Colebrook y White incluyeron estas dos ecuaciones en una sola ecuación, encontrando así la Ecuación 3.6.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

**Ecuación 3.6**

Estas ecuaciones serán usadas para determinar la variación de la rugosidad absoluta en función de las pérdidas de energía causadas por el crecimiento de la biopelícula sobre las paredes internas de las tuberías.

#### **4. Diseño y seguimiento experimental**

Por más de un año la Universidad de Los Andes y PAVCO han colaborado para el diseño, construcción y puesta en marcha de un modelo físico que simula las condiciones de un sistema de distribución de agua potable.

La construcción de este modelo se llevó a cabo en las instalaciones de PAVCO debido al gran espacio requerido para este y porque el transporte de una tubería de más de 70 metros de largo por la ciudad de Bogotá es una labor muy difícil de cumplir. Debido a la cantidad de espacio que requería el montaje no existían muchas zonas para su construcción, incluso dentro de las instalaciones de la empresa. Finalmente se decidió que el lugar más óptimo para ubicar el montaje es una zona que tenía como fin el almacenamiento de productos (Figura 15), la cual se encuentra ubicada en los linderos de la fábrica. Debido al uso previo que se le daba a esta zona fue necesario realizar un despeje de la misma y limitarla adecuadamente (Figura 16) para evitar que se siguiera almacenando material en este lugar.



**Figura 15. Zona de almacenamiento en PAVCO (Nieto, 2011).**



**Figura 16. Zonal utilizada para la construcción del montaje ya despejada (Nieto, 2011).**

## 4.1 Nivelación del Terreno

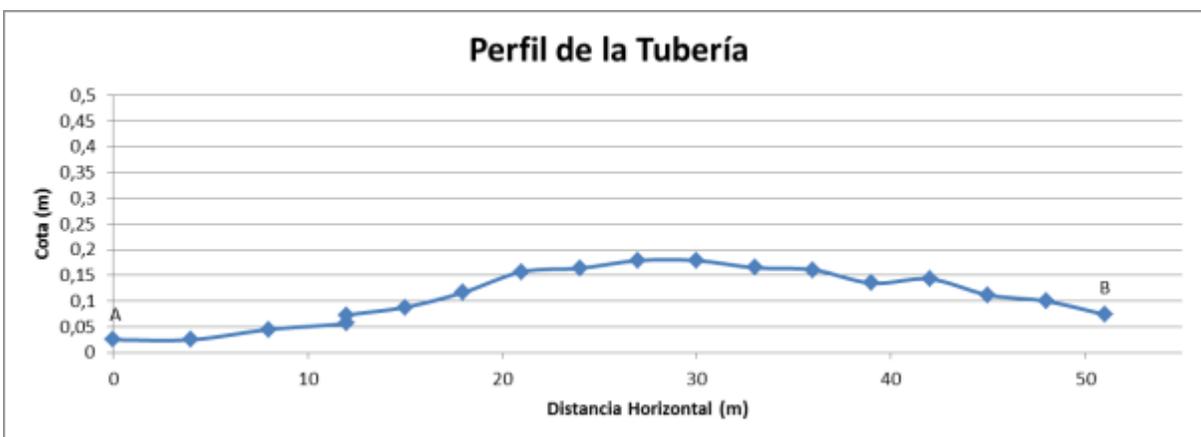


**Figura 17. Fotografía de la tubería y del terreno sobre el cual esta reposa.**

Debido a las fuertes lluvias que se presentaron en los meses de diciembre de 2011 y enero de 2012, el terreno se asentó en algunos puntos y la vegetación creció por debajo de la tubería en otros, generando así un desnivel mayor al reportado cuando se entregó el montaje (0.042 m) (Nieto, 2011). Por este motivo se realizó una nueva nivelación del terreno.

Cabe resaltar que la importancia de realizar nuevamente la nivelación del terreno radica en que el software que se usa en el montaje para calcular las pérdidas por fricción utiliza este dato ( $\Delta z$ ) para calcular las pérdidas de altura piezométrica por fricción. En este sentido, si este valor no se hubiese tenido en cuenta y modificado para la segunda parte del proyecto los valores arrojados por el software no tendrían la misma validez.

La nivelación del terreno se llevó a cabo con el uso de un nivel, el cual es un instrumento que sirve para medir diferencias de alturas entre dos puntos, usando la metodología del levantamiento topográfico por nivelación diferencial con más de dos puntos intermedios. A continuación se presenta el perfil de la tubería:



**Figura 18. Perfil de la tubería**

El levantamiento topográfico que se realizó en el montaje arrojó una diferencia de nivel de +0.074m. A continuación se presenta la tabla con la abscisa y la cota para cada uno de los puntos de la nivelación del terreno:

**Tabla 4. Cuadro con los datos y resultados de la nivelación diferencial con varios puntos intermedios.**

Punto	Abscisa (m)	Cota del punto (m)
A*	0	0,025
P1	4	0,025
P2	8	0,045
P3	12	0,057
P4	12	0,072
P5	15	0,088
P6	18	0,117
P7	21	0,157
P8	24	0,164
P9	27	0,179
P10	30	0,179
P11	33	0,165
P12	36	0,161
P13	39	0,135
P14	42	0,143
P15	45	0,112
P16	48	0,1
B*	51	0,074

*El punto A es el punto de conexión de las mangueras aguas arriba*  
*El punto B es el punto de conexión de las mangueras aguas abajo*

## 4.2 Suministro de nutrientes

A fin de llevar una continuidad en el estudio, la cantidad de nutrientes y la frecuencia de su adición al montaje para esta etapa del proyecto se mantuvo en 55.63 gramos semanales de fosfato diamónico (DAP) (Gacharná, 2011).

## 4.3 Mantenimiento del cloro residual libre en el sistema

Teniendo en cuenta que este estudio pretende simular las condiciones de un sistema de distribución de agua potable, fue necesario cumplir con la Resolución 2115 de 2007, según la cual la concentración de cloro residual libre aceptable dentro de cualquier punto de la red es de 0.3 – 2 mg/L. Para la cloración de este sistema en particular se usó hipoclorito de calcio HTH granular.

Para poder realizar los cálculos necesarios para encontrar la concentración mínima de cloro en el sistema es necesario conocer el volumen de agua que este puede almacenar. Este dato se calculó sumando el volumen del tanque de alimentación, de almacenamiento y el almacenado en las tres tuberías.

**Tabla 5. Cálculo de volumen de agua en el sistema (Gacharná, 2011).**

Volumen del tanque de alimentación (m <sup>3</sup> )	8,87
Volumen del tanque de alimentación (m <sup>3</sup> )	24,02
Volumen del tanque de alimentación (m <sup>3</sup> )	4,88
<b>Volumen total (m<sup>3</sup>)</b>	<b>37,76</b>

Con el volumen total del sistema (37760 litros) y la concentración mínima que se desea mantener en el sistema (0.5 mg Cl/L) se realizaron los cálculos para la concentración mínima de cloro en el sistema (Gacharná, 2011).

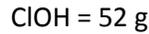
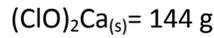
Ácido hipocloroso que se debe adicionar:

$$37760 \text{ L} \times 0.5 \frac{\text{mg ClOH}}{\text{L}} = 18880 \text{ mg ClOH} \times \frac{1 \text{ g Cl}}{1000 \text{ mg ClOH}} = 18.88 \text{ g ClOH}$$

Como el Cloro viene sólido en la forma (ClO)<sub>2</sub>Ca<sub>(s)</sub> al adicionarlo en agua ocurre la siguiente reacción:



Pesos moleculares:



$$\frac{144 \text{ g } (\text{ClO})_2\text{Ca}_{(s)}}{2(52 \text{ g } \text{ClOH})} \times 1.35 = 1.87 \text{ g } (\text{ClO})_2\text{Ca}_{(s)} \text{ g ClOH}$$

Entonces para el volumen que se tiene, se requiere:

$$18.88 \text{ g ClOH} \times 1.87 \text{ g } (\text{ClO})_2\text{Ca} = 35.30 \text{ g } (\text{ClO})_2\text{Ca} \text{ g ClOH}$$

Para garantizar que la cantidad de cloro libre en el sistema se encuentre mínimo en 0.3 mg/L se realizaron pruebas de concentración de cloro todos los días.

#### **4.4 Seguimiento cualitativo de presencia de algas y cianobacterias**

Siguiendo la recomendación del estudio previo a este de usar kits de detección de algas y cianobacterias (Gacharná, 2011), se realizaron pruebas microbiológicas en todos los testigos del montaje así como en las estructuras de disipación de energía del sistema y el vertedero.

El procedimiento que se usó para la extracción de los testigos y la toma de muestras biológicas se describe en el diagrama de flujo de la Figura 19.

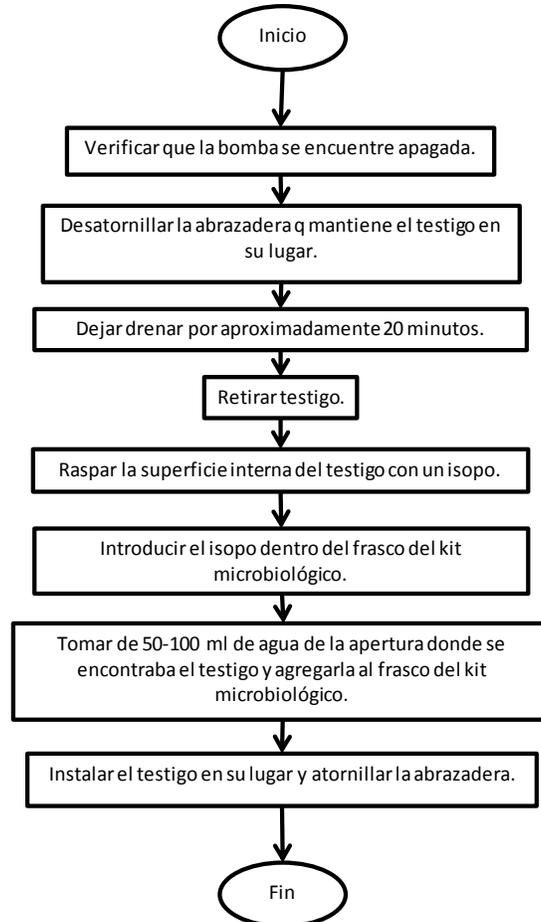


Figura 19. Diagrama de flujo: extracción de testigos y toma de muestras microbiológicas. Modificado de (Gacharná, 2011).

#### 4.5 Determinación de pérdidas por fricción y rugosidad absoluta

La determinación de las pérdidas por fricción ( $h_f$ ) y rugosidad absoluta ( $k_s$ ) se calculó con los valores registrados de la lectura de los piezómetros y los obtenidos con el software instalado para el sensor de presión y el caudalímetro en cada una de las pruebas. La obtención de estos resultados se llevó a cabo siguiendo la metodología planteada en el diagrama de flujo de la Figura 20.

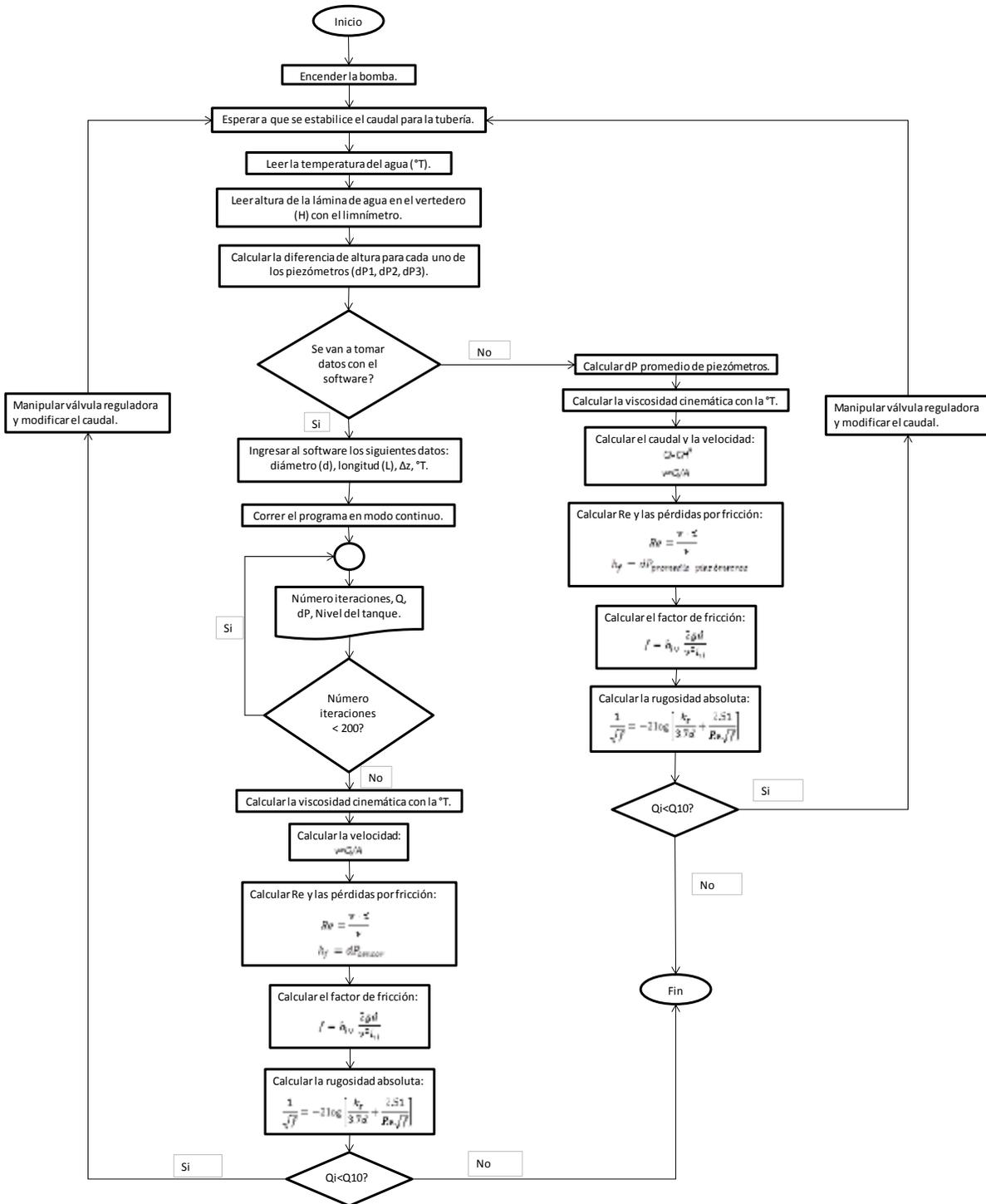


Figura 20. Diagrama de flujo: cálculo de pérdidas por fricción y rugosidad absoluta. Modificado de (Gacharná, 2011).

## 4.6 Cálculo tipo para pérdidas por fricción y rugosidad absoluta

A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de las pérdidas por fricción y rugosidad absoluta para el día 14 de marzo de 2012.

### Datos:

$$Q_{\text{Sensor}} = 35,52 \text{ l/s}$$

$$H_{\text{Limnómetro}} = 37,73 \text{ cm} = 0,3773 \text{ m}$$

$$dP_{\text{Sensor}} = 1041,51 \text{ mm H}_2\text{O} = 1,04 \text{ mca}$$

$$\text{Temperatura} = 18,60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$d_{\text{tubería}} = 0,16806 \text{ m}$$

$$L_{\text{Tubería}} = 66,08 \text{ m}$$

Piezómetros de mercurio:

	A (cm Hg)	B (cm Hg)
<b>Piezómetro 1</b>	17,40	25,80
<b>Piezómetro 2</b>	18,60	27,20
<b>Piezómetro 3</b>	19,20	27,50

### Cálculo de la viscosidad:

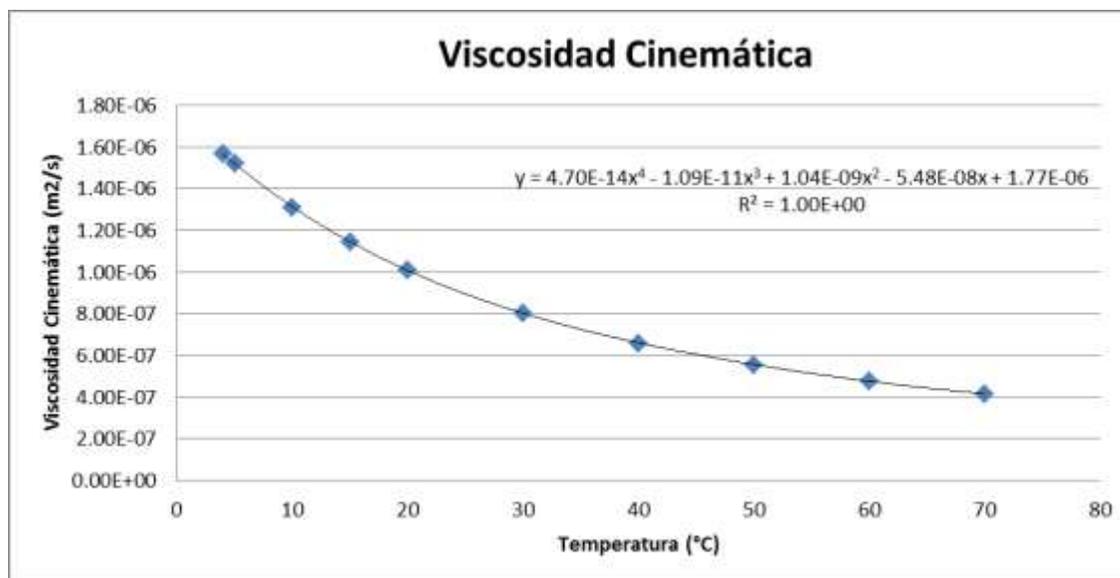


Figura 21. Regresión potencial para la determinación de la viscosidad cinemática (Nieto, 2011).

$$v = (4,70 \times 10^{-14} \times 18,60 \text{ }^\circ\text{C}^4) - (1,09 \times 10^{-11} \times 18,60 \text{ }^\circ\text{C}^3) + (1,04 \times 10^{-9} \times 18,60 \text{ }^\circ\text{C}^2) - (5,48 \times 10^{-8} \times 18,60 \text{ }^\circ\text{C}) + (1,77 \times 10^{-6})$$

$$v = 1,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Cálculo del caudal del vertedero:

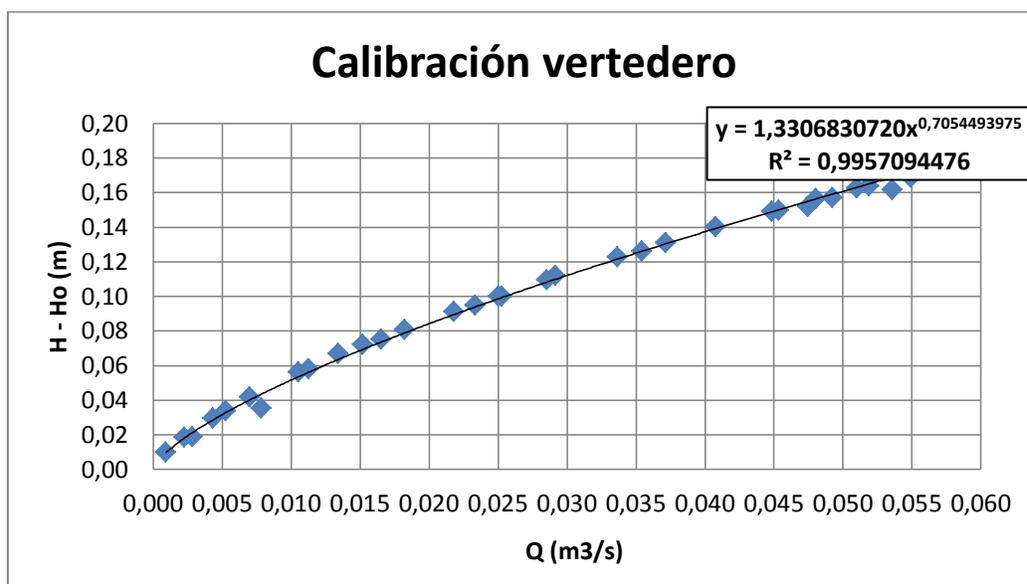


Figura 22. Curva de calibración del vertedero rectangular (Nieto, 2011).

$$Q_v = \left\{ \frac{(H - H_o)}{1,3306830720} \right\}^{1/0,7054493975}$$

$$Q_v = \left\{ \frac{(0,3773 - 0,2504)}{1,3306830720} \right\}^{1/0,7054493975} \times 1000 = 35,75 \text{ l/s}$$

Cálculo del diferencial de presión usando los datos de los piezómetros:

$$dP_{\text{piezómetro 1}} = 25,80 \text{ cm Hg} - 17,40 \text{ cm Hg} = 8,40 \text{ cm Hg}$$

$$dP_{\text{piezómetro 1}} = \frac{8,40 \text{ cm Hg}}{100} \times 12,6 = 1,06 \text{ mca}$$

$$dP_{\text{piez ómetro 2}} = 27,20 \text{ cm Hg} - 18,60 \text{ cm Hg} = 8,60 \text{ cm Hg}$$

$$dP_{\text{piez ómetro 2}} = \frac{8,60 \text{ cm Hg}}{100} \times 12,6 = 1,08 \text{ mca}$$

$$dP_{\text{promedio piez ómetros}} = \frac{1,06 \text{ mca} + 1,08 \text{ mca} + 1,05 \text{ mca}}{3} = 1,06 \text{ mca}$$

$$dP_{\text{piez ómetro 3}} = 27,5 \text{ cm Hg} - 19,20 \text{ cm Hg} = 8,30 \text{ cm Hg}$$

$$dP_{\text{piez ómetro 3}} = \frac{8,30 \text{ cm Hg}}{100} \times 12,6 = 1,05 \text{ mca}$$

Cálculo de las pérdidas por fricción y rugosidad absoluta usando los datos de los sensores:

$$v = \frac{Q_{\text{sensor}}}{\pi \times r^2} = \frac{(35,52 \text{ l/s})/1000}{\pi \times \left(\frac{0,16086}{2}\right)^2} = 1,75 \text{ m/s}$$

$$h_f = dP_{\text{sensor}} = 1,04 \text{ mca}$$

$$f = h_f \times \frac{2gd}{v^2 l} = 1,04 \text{ mca} \times \frac{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,16086 \text{ m}}{(1,75 \text{ m/s})^2 \times 66,08 \text{ m}} = 0,01628$$

$$Re = \frac{v \times d}{\nu} = \frac{1,75 \text{ m/s} \times 0,16086 \text{ m}}{1,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 263089$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{k_s}{3,7 d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right]$$

$$k_s = 3,7 d \left[ 10^{-1/2 \times \sqrt{f}} - \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right]$$

$$= 3,7 \times 160,86 \text{ mm} \left[ 10^{-1/2 \times \sqrt{0,01628}} - \frac{2,51}{263089 \times \sqrt{0,01628}} \right]$$

$$k_s = 0,0273 \text{ mm}$$

Cálculo de las pérdidas por fricción y rugosidad absoluta usando los datos tomados manualmente:

$$h_f = dP_{\text{promedio piezómetros}} = 1,06 \text{ mca}$$

$$v = \frac{Q_{\text{vertedero}}}{\pi \times r^2} = \frac{(35,75 \text{ l/s})/1000}{\pi \times \left(\frac{0,16086}{2}\right)^2} = 1,76 \text{ m/s}$$

$$f = h_f \times \frac{2gd}{v^2 l} = 1,06 \text{ mca} \times \frac{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,16086 \text{ m}}{(1,76 \text{ m/s})^2 \times 66,08 \text{ m}} = 0,01634$$

$$Re = \frac{v \times d}{\nu} = \frac{1,76 \text{ m/s} \times 0,16086 \text{ m}}{1,07 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 264592$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{k_s}{3,7d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right]$$

$$\begin{aligned} k_s &= 3,7d \left[ 10^{-1/2 \times \sqrt{f}} - \frac{2,51}{Re \times \sqrt{f}} \right] \\ &= 3,7 \times 160,86 \text{ mm} \left[ 10^{-1/2 \times \sqrt{0,01634}} - \frac{2,51}{264592 \times \sqrt{0,01634}} \right] \end{aligned}$$

$$k_s = 0,0288 \text{ mm}$$

## 5. Resultados

En esta sección se describen los resultados fisicoquímicos, microbiológicos e hidráulicos obtenidos durante las trece semanas en las que transcurrió el estudio.

### 5.1 Aspectos fisicoquímicos

Con ayuda de un kit de medición de cloro residual y pH se monitoreó diariamente ambos parámetros en el sistema durante las trece semanas que duró el estudio.

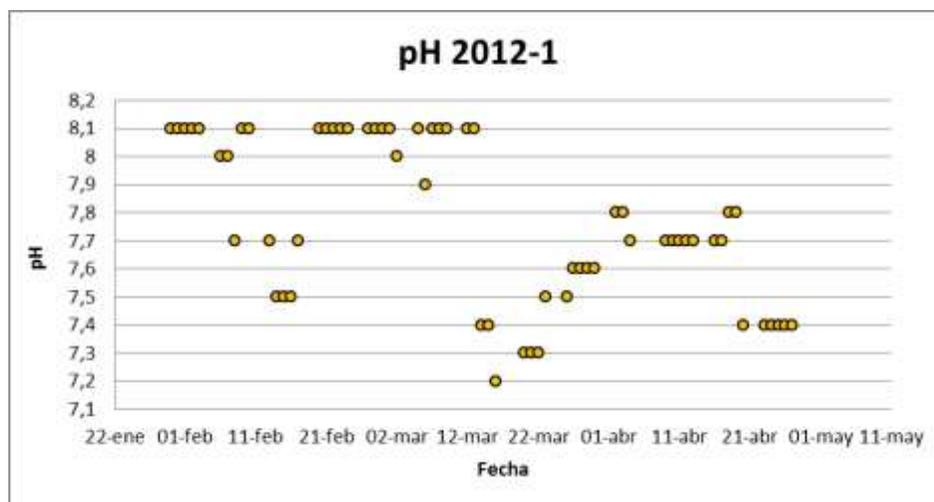
Tabla 6. Concentración de cloro residual.

Concentración de Cloro Segundo primer semestre de 2012					
Semana 1	30-ene	31-ene	01-feb	02-feb	03-feb
	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.3 mg/L	0.4 mg/L
Semana 2	06-feb	07-feb	08-feb	09-feb	10-feb
	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L
Semana 3	13-feb	14-feb	15-feb	16-feb	17-feb
	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L	0.4 mg/L
Semana 4	20-feb	21-feb	22-feb	23-feb	24-feb
	0.4 mg/L				
Semana 5	27-feb	28-feb	29-feb	01-mar	02-mar
	0.4 mg/L				
Semana 6	05-mar	06-mar	07-mar	08-mar	09-mar
	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L
Semana 7	12-mar	13-mar	14-mar	15-mar	16-mar
	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.2 mg/L	0.2 mg/L	0.2 mg/L
Semana 8	19-mar	20-mar	21-mar	22-mar	23-mar
	Festivo	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L
Semana 9	26-mar	27-mar	28-mar	29-mar	30-mar
	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.4 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L
Semana 10	02-abr	03-abr	04-abr	05-abr	06-abr
	0.5 mg/L	0.7 mg/L	0.7 mg/L	Festivo	Festivo
Semana 11	09-abr	10-abr	11-abr	12-abr	13-abr
	0.5 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L	0.4 mg/L	0.4 mg/L
Semana 12	16-abr	17-abr	18-abr	19-abr	20-abr
	0.4 mg/L	0.4 mg/L	0.3 mg/L	0.3 mg/L	0.4 mg/L
Semana 13	23-abr	24-abr	25-abr	26-abr	27-abr
	0.3 mg/L	0.4 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L	0.5 mg/L



**Tabla 7. Mediciones de pH.**

pH del agua Segundo primer semestre de 2012					
Semana 1	30-ene	31-ene	01-feb	02-feb	03-feb
	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
Semana 2	06-feb	07-feb	08-feb	09-feb	10-feb
	8.0	8.0	7.7	8.1	8.1
Semana 3	13-feb	14-feb	15-feb	16-feb	17-feb
	7.7	7.5	7.5	7.5	7.7
Semana 4	20-feb	21-feb	22-feb	23-feb	24-feb
	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1
Semana 5	27-feb	28-feb	29-feb	01-mar	02-mar
	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0
Semana 6	05-mar	06-mar	07-mar	08-mar	09-mar
	8.1	7.9	8.1	8.1	8.1
Semana 7	12-mar	13-mar	14-mar	15-mar	16-mar
	8.1	8.1	7.4	7.4	7.2
Semana 8	19-mar	20-mar	21-mar	22-mar	23-mar
	Festivo	7.3	7.3	7.3	7.5
Semana 9	26-mar	27-mar	28-mar	29-mar	30-mar
	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6
Semana 10	02-abr	03-abr	04-abr	05-abr	06-abr
	7.8	7.8	7.7	Festivo	Festivo
Semana 11	09-abr	10-abr	11-abr	12-abr	13-abr
	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
Semana 12	16-abr	17-abr	18-abr	19-abr	20-abr
	7.7	7.7	7.8	7.8	7.4
Semana 13	23-abr	24-abr	25-abr	26-abr	27-abr
	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4



**Figura 24. Datos diarios de pH a través del tiempo.**

A fin de ilustrar la continuidad que ha tenido este proyecto durante dos semestres (2011-2 y 2012-1), a continuación se muestran las gráficas acumuladas de los datos de cloro residual y pH.

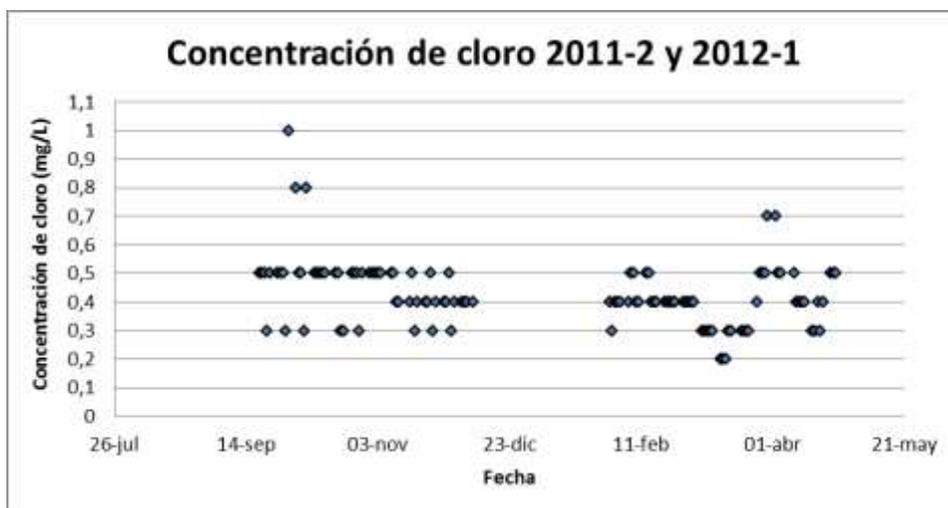


Figura 25. Concentración diaria de cloro residual de la duración total del estudio.

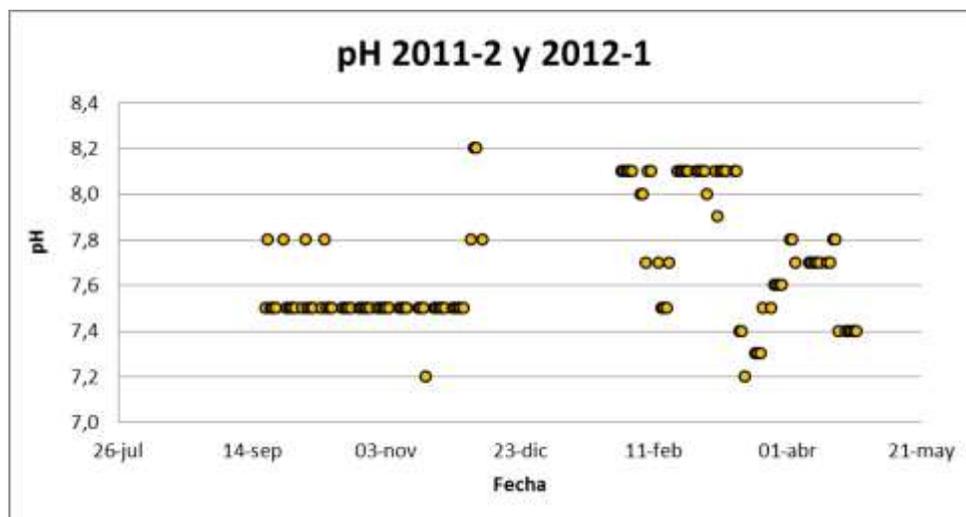


Figura 26. Datos diarios de pH de la duración total del estudio.

## 5.2 Aspectos microbiológicos

Debido a una serie de problemas relacionados con la importación desde España de los kits de ausencia y presencia de algas y cianobacterias la realización de las pruebas microbiológicas no pudo ser posible antes del 27 de abril del 2012. Por esta razón fue necesario tomar una muestra por día, pues de lo contrario no se hubiera tenido el tiempo necesario para obtener los resultados de ausencia y presencia. En la Figura 27 se presenta un cronograma indicando la fecha en la que fueron tomadas cada una de las muestras.

Los kits de presencia y ausencia de algas microscópicas (Ficokit) y cianobacterias (Cianokit) son unos frascos debidamente sellados y estériles que vienen con un medio de cultivo microbiológico específico para algas o cianobacterias, según sea el caso. Para la toma de muestras se siguió la metodología sugerida por el fabricante. Para cada una de las muestras, se tomó entre 50 y 100 mL de agua de la muestra y se introdujo en el frasco estéril de FICOKIT o de CIANOKIT; después, con la ayuda de un escobillón, el cual se añade posteriormente al frasco tomamuestras, se rasparon las paredes de los testigos, del vertedero o las rocas de las estructuras de disipación a fin de añadir trozos del medio ambiente cercano; por último se cierra nuevamente el frasco y se agita. Una vez tomadas las muestras, estas se incubaron de 7 – 21 días con 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad/día. Al final del periodo de incubación se observó el color de la muestra, siendo positivas todas aquellas que adquirieron un color rojizo, verde o azul.

Fecha	Pares de testigos extraídos para la toma de muestras	Estructuras del sistema
27 de abril de 2012	Borde	--
30 de abril de 2012	29-30	--
2 de mayo de 2012	1-2	--
3 de mayo de 2012	27-28	--
4 de mayo de 2012	3-4	--
7 de mayo de 2012	25-26	--
8 de mayo de 2012	5-6	--
9 de mayo de 2012	23-24	--
10 de mayo de 2012	7-8	--
11 de mayo de 2012	21-22	--
14 de mayo de 2012	9-10	--
15 de mayo de 2012	19-20	--
16 de mayo de 2012	11-12	--
17 de mayo de 2012	17-18	--
18 de mayo de 2012	13-14	--
22 de mayo de 2012	15-16	--
23 de mayo de 2012	--	Estructuras de discipación
24 de mayo de 2012	--	Vertedero

**Figura 27. Cronograma de toma de muestras biológicas.**

Una vez transcurrido el periodo de incubación de cada una de las muestras se procedió a realizar un registro fotográfico de los resultados con el fin de documentarlos en este estudio. En todas las fotografías, el frasco de Ficokit se encuentra a la derecha y el de Cianokit a la izquierda.



**Figura 28. Cianokit y Fikokit de las estructuras de disipación después del periodo de incubación.**



**Figura 29. Cianokit y Fikokit de las paredes del vertedero después del periodo de incubación.**



**Figura 30. Cianokit y Fikokit del testigo de borde después del periodo de incubación.**



**Figura 31. Cianokit y Fikokit testigos 1-2 después del periodo de incubación.**



**Figura 32. Cianokit y Fikokit testigos 3-4 después del periodo de incubación.**



**Figura 33. Cianokit y Fikokit testigos 5-6 después del periodo de incubación.**



**Figura 34. Cianokit y Fikokit testigos 7-8 después del periodo de incubación.**



**Figura 35. Cianokit y Fikokit testigos 9-10 después del periodo de incubación.**



**Figura 36. Cianokit y Fikokit testigos 11-12 después del periodo de incubación.**



**Figura 37. Cianokit y Fikokit testigos 13-14 después del periodo de incubación.**



**Figura 38. Cianokit y Fikokit testigos 15-16 después del periodo de incubación.**



**Figura 39. Cianokit y Fikokit testigos 17-18 después del periodo de incubación.**



**Figura 40. Cianokit y Fikokit testigos 19-20 después del periodo de incubación.**



**Figura 41. Cianokit y Fikokit testigos 21-22 después del periodo de incubación.**



**Figura 42. Cianokit y Fikokit testigos 23-24 después del periodo de incubación.**



**Figura 43. Cianokit y Fikokit testigos 25-26 después del periodo de incubación.**



**Figura 44. Cianokit y Fikokit testigos 27-28 después del periodo de incubación.**



**Figura 45. Cianokit y Fikokit testigos 29-30 después del periodo de incubación.**

Al observar el registro fotográfico de cada una de las muestras es posible identificar que las muestras de los Ficokit son las más contundentes en el cambio del color del medio acuoso; a excepción de las muestras para los testigos 5-6, 7-8, 9-10, 17-18, en donde el cambio de color fue muy leve, las muestras se tornaron de un color verde oscuro lo cual indica la presencia de microalgas a lo largo del sistema. Por su parte, el cambio de color no fue tan evidente para las muestras de presencia de cianobacterias, en especial para los testigos 3-4, 5-6, 9-10, 17-18, 19-20, 21-22; aun así es posible identificar que la mayoría de las muestras presentan un color verde pálido que también prueba la existencia de estos microorganismos en el montaje.

Al confirmar la existencia de estos microorganismos tanto en la tubería como en otras partes del montaje, ratifica los resultados encontrados con la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) el semestre 2011-2. Esta ratificación de los resultados encontrados anteriormente es especialmente importante pues cuando se tomaron las muestras en ese entonces no se observó una biopelícula a simple vista, por lo cual quedaba en duda si las estructuras observadas por medio del microscopio eran en realidad microorganismos o simplemente residuos de agua congelada que se solidificaron al realizar el enfriamiento para poder llevar a cabo el análisis (Gacharná, 2011).

### **5.3 Aspectos hidráulicos**

Una forma para evaluar el crecimiento de microorganismos, en este caso algas y cianobacterias, y la posible formación de biopelículas es el comportamiento hidráulico de la red, analizando los cambios generados en las pérdidas por fricción.

Durante el estudio se llevaron a cabo dos o tres pruebas semanales en las que se varió el caudal diez veces a fin de tomar diferentes valores del número de Reynolds y poder ubicarlos dentro del Diagrama de Moody. De esta manera se pudo encontrar la rugosidad relativa de la tubería con el fin de observar variaciones en este valor durante el periodo de estudio a causa de un posible crecimiento de biopelícula de algas o cianobacterias.

#### **5.3.1 Pérdidas por fricción**

Las pérdidas por fricción calculadas para cada uno de los caudales registrados en las muestras se hallaron a partir de las lecturas de los piezómetros y los resultados de diferencial de presión que arrojaba el software utilizado en el montaje. En ambos casos se tiene que  $hf_{ij} = P_j - P_i$ .

Es importante tener claro que el  $\Delta z$  del terreno influye en el valor del  $hf$  en los datos arrojados para el sensor, pero debido a que el software arroja el valor del diferencial de presión teniendo en cuenta este dato sobra sumarlo en el cálculo de las pérdidas por lo que es posible expresarlas solo en función del cambio en las presiones. Sin embargo, el  $\Delta z$  no afecta las mediciones para los manómetros de mercurio puesto que la determinación de pérdidas por fricción a partir de este instrumento de medición no tiene en cuenta este valor (Ecuación 5.1) (Nieto, 2011).

$$hf = \frac{hm (\rho_{hg} - \rho_{H_2O})}{\rho_{H_2O}} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Una vez calculado el hf es posible calcular el factor de fricción de la tubería mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$f = h_f \frac{2gd}{v^2 l} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

El factor de fricción fue calculado para cada medición y los resultados de las trece semanas de estudio de este semestre se pueden apreciar en la Figura 46 los datos y las gráficas individuales obtenidas para cada día de muestras se encuentran más adelante en el Anexo 1 y 2.

Al detallar la Figura 46 es posible observar que los datos no se ajustan de manera apropiada al Diagrama de Moody. Este desajuste se da por cuenta de los flujos con menor número de Reynolds puesto que su factor de fricción decrece en comparación con los demás datos.

Por otra parte, en la Figura 46 se observa que todos los datos del factor de fricción, a excepción de los registrados los días 2 y 3 de febrero, son muy altos respecto a la rugosidad relativa del tubo de PVC de seis pulgadas de diámetro nominal que se encuentra en el montaje ( $k_s/d=0.00001$ ). Además de esto, también se ve que el valor del factor de fricción aumenta a medida que pasa el tiempo, siendo los menores valores los del mes de febrero y los mayores los del mes de abril.

A fin de realizar un análisis comparativo entre los resultados de las pérdidas por fricción obtenidos en el segundo semestre del 2011 y el primer semestre del 2012, se creó la gráfica de la Figura 47. En esta figura se puede ver como los datos tomados en el segundo semestre del 2011 tampoco se ajustan adecuadamente al Diagrama de Moody, presentándose el mismo fenómeno que se identificó para los datos del primer semestre del 2012; lo cual puede indicar un desajuste en los valores de configuración del rango inferior para el manómetro de presión diferencial que se tienen en el montaje. A diferencia de los datos registrados en el 2012-1, los valores de los datos del segundo semestre del 2011 se encuentran mucho más cerca al valor de la rugosidad relativa de la tubería instalada en el montaje. Vale la pena resaltar que en el registro de los datos del 2011-2 también se puede ver como los valores del factor de fricción aumentan a medida que pasa el tiempo, siendo los valores del día 30 de septiembre los más bajos y los valores del día noviembre 18 los más altos; así mismo es muy claro que los valores para el primer semestre del 2012 son en su totalidad mayores que los del segundo semestre del 2011, lo que ratifica aún más la relación entre el tiempo de estudio transcurrido y el aumento en los valores del factor de fricción.

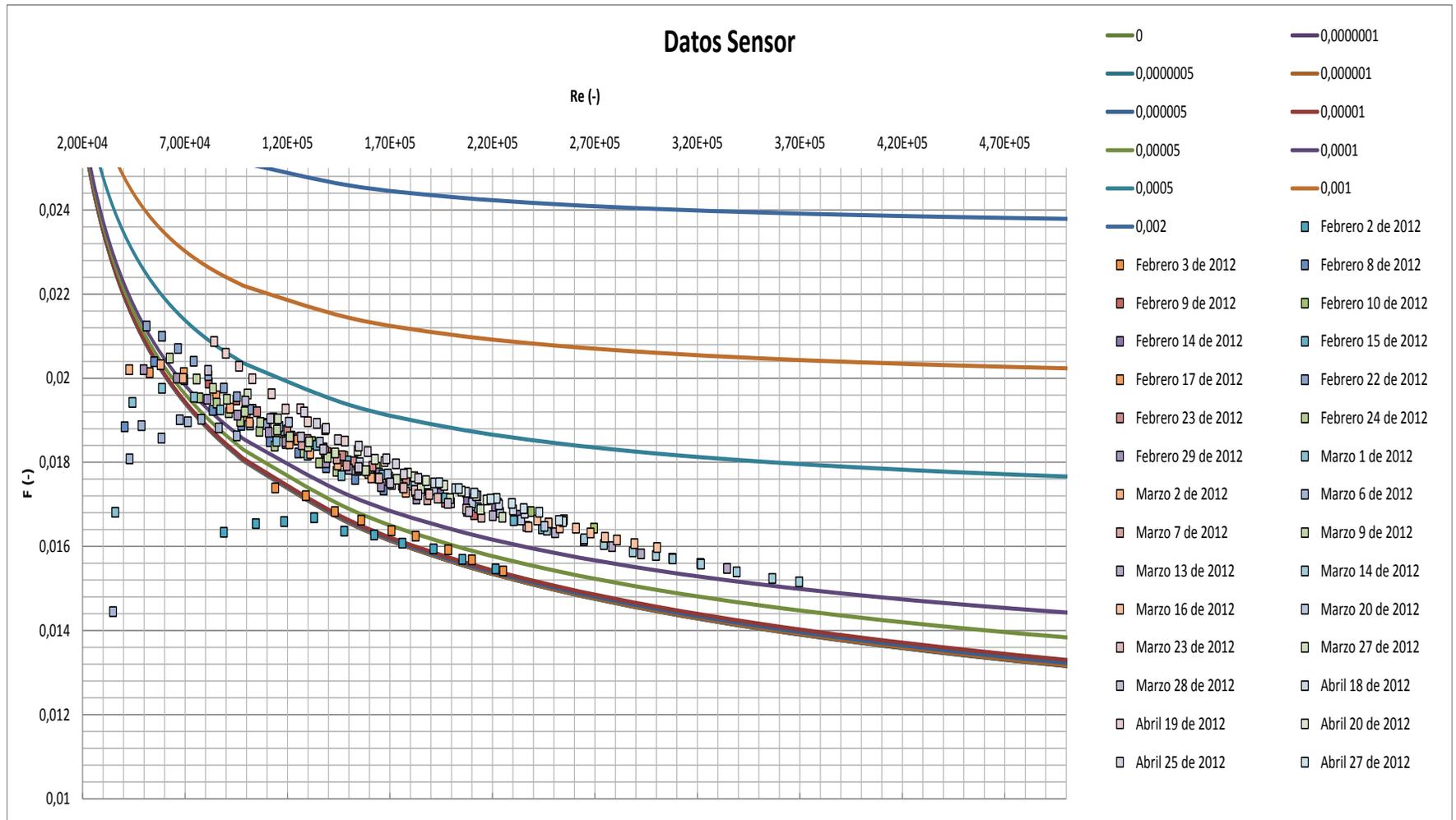


Figura 46. Factor de fricción vs. Número de Reynolds, datos tomados durante el semestre 2012-1.

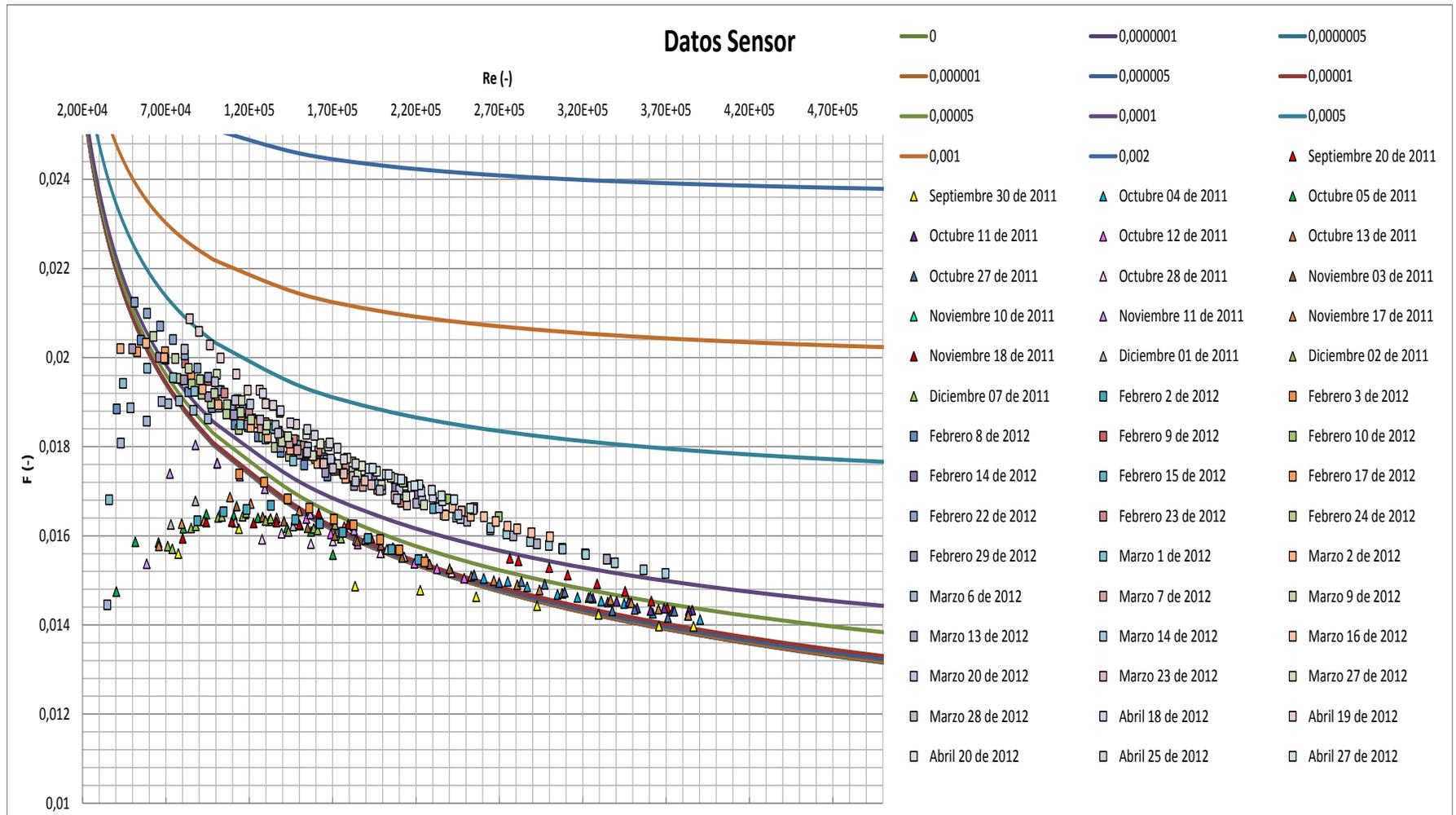


Figura 47. Factor de fricción vs. Número de Reynolds, datos tomados durante los semestres 2011-2 y 2012-1.

### 5.3.2 Diagrama de Moody basado en las diferentes ecuaciones desarrolladas

A lo largo de la historia se han desarrollado diferentes ecuaciones que describen el FTHL; sin embargo, desde su aparición, estas inducen a un error mínimo el cual ha ido aumentando debido a la creación de nuevos materiales para las tuberías que son mucho más lisos de los utilizados durante los estudios que dieron pie al desarrollo de las diferentes ecuaciones (Flechas, 2010).

Un flujo se puede clasificar como FTHL, según Colebrook y White (1939), cuando la rugosidad de la tubería es igual al 30% del espesor de la subcapa laminar viscosa. Por ello, si el tamaño de la rugosidad de la tubería es inferior a dicho valor, el flujo es hidráulicamente liso (Flechas, 2010).

Por lo anterior, las ecuaciones que expresan el límite inferior de la zona de transición, zona de especial interés para este estudio, se ilustran a continuación y se muestran gráficamente en la Figura 48 dentro del diagrama de Moody. En ella se pueden ver ligeras variaciones entre los resultados obtenidos por las diferentes ecuaciones.

Una vez identificadas las diferencias entre las ecuaciones se procedió a graficar los datos registrados durante todo el periodo de estudio (2011-2 y 2012-1) en el nuevo Diagrama de Moody, a fin de tener un mejor entendimiento del comportamiento del factor de fricción. En la Figura 48 se puede apreciar que todos los datos tomados durante estos dos semestres se encuentran por debajo del límite del FTHL establecido por Colebrook-White; por lo tanto la totalidad de los datos se encuentra por fuera de la zona de transición en el Diagrama de Moody. Además a esto, se puede observar que los datos pertenecientes al periodo 2011-2 se encuentran un tanto encima o sobre el límite del FTHL establecido por Prandtl, mientras que los datos registrados en el 2012-1 están casi en su totalidad ubicados por encima de dicho límite.

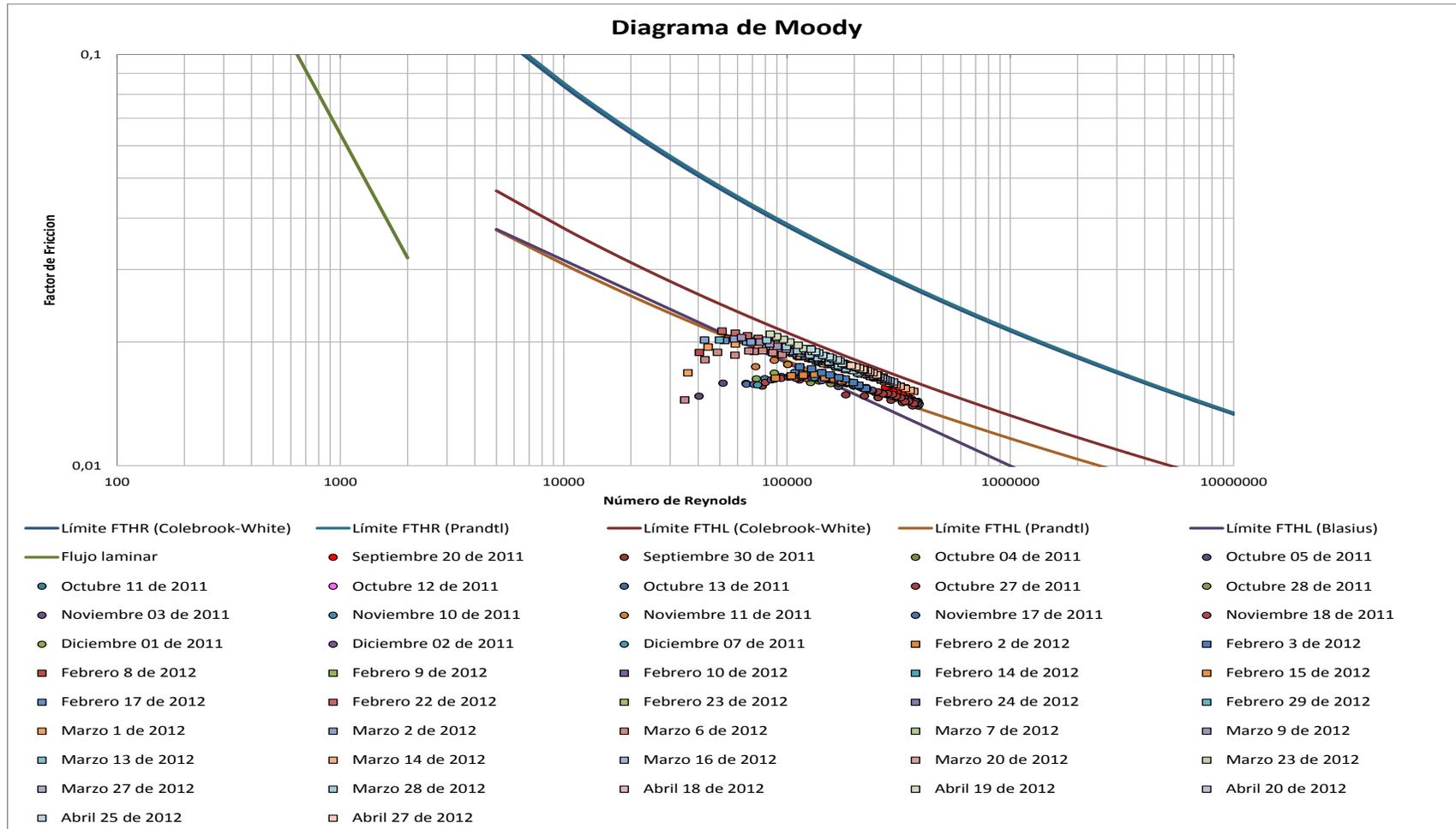


Figura 48. Diagrama de Moody, comprobación del ajuste de los datos registrados durante los semestres 2011-2 y 2012-1 en la zona de transición.

### 5.3.3 Análisis de rugosidad

Para poder calcular la rugosidad absoluta ( $k_s$ ) de la tubería en cada una de las pruebas se debía, en primer lugar, obtener el valor del caudal ( $Q$ ), de las pérdidas por fricción ( $h_f$ ) y el número de Reynolds ( $Re$ ), fuera del valor del diámetro de la tubería ( $d$ ) y la longitud de la misma ( $l$ ) que son constantes para este estudio.

Una vez se tienen estos datos, se procedió a calcular la rugosidad absoluta de la tubería así:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

Se procede a despejar el factor de fricción  $f$ :

$$f = \frac{2gdh_f}{lv^2}$$

Finalmente teniendo  $f$  se procede a despejar la rugosidad de la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

$$k_s = 3.7d \left[ 10^{-1/(2\sqrt{f})} - \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

Al observar los valores de  $k_s$  obtenidos durante el tiempo de estudio se encontraron rugosidades negativas (Tabla 8).

**Tabla 8. Resumen resultados toma de datos Marzo 1 de 2012.**

Marzo 1 de 2012			
Promedio			
Q (L/s)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)
20,36	0,01768207	146382,592	0,02670404
18,01	0,01816995	129867,654	0,03097483
15,87	0,01849615	114685,789	0,02969852
14,08	0,01888688	101787,414	0,03031074
12,04	0,01924413	87228,7929	0,02472861
10,27	0,01954569	74417,1371	0,01475303
8,09	0,01975777	58782,8154	-0,01301577
6,11	0,01942139	44365,852	-0,08612388
4,94	0,01680949	36004,1445	-0,22595861
3,94	0,00244362	28690,6641	-2,01394372

Debido a este fenómeno se llevó a cabo otro tipo de análisis encontrando una variable adimensional  $a$  para entender mejor el comportamiento de estas rugosidades. El cálculo de esta nueva variable se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.035 \log_{10} \left( \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{a}{Re\sqrt{f}} \right)$$

$$10^{-1/(2.035\sqrt{f})} = \frac{a}{Re\sqrt{f}}$$

$$a = Re\sqrt{f} 10^{-1/(2.035\sqrt{f})}$$

Una vez se obtenidos todos los valores de  $a$ , se procedió a realizar una gráfica de  $a$  vs. Número de Reynolds (Figura 49). En la Figura 49 se puede observar como ninguno de los datos sobrepasa el número 5.21, número establecido por Colebrook-White como límite del FTHL. Este resultado es coherente con el análisis obtenido del Diagrama de Moody basado en las diferentes ecuaciones desarrolladas en donde ninguno de los datos sobrepasaba la línea límite del FTHL establecida por Colebrook-White (Figura 48).

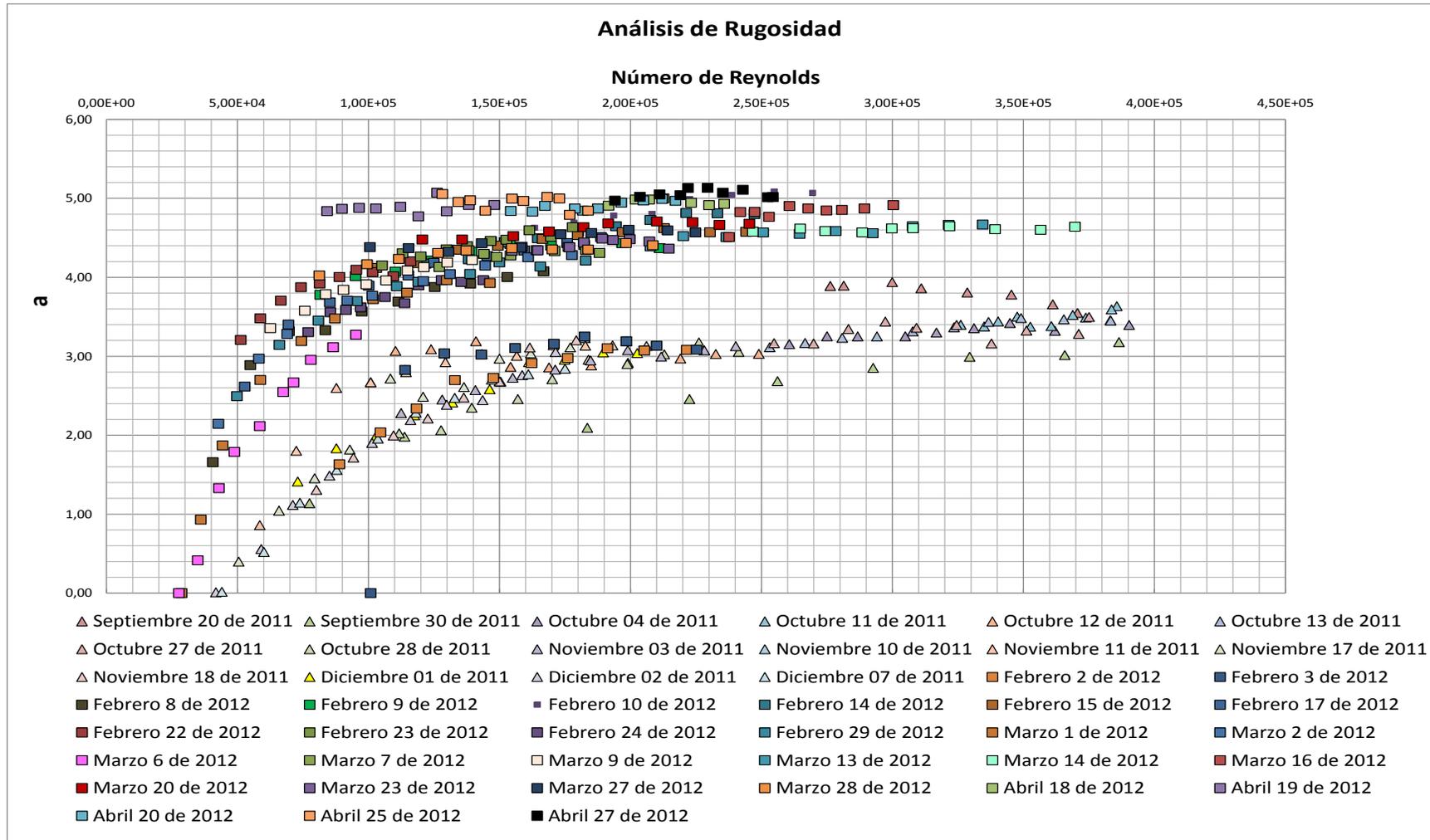


Figura 49.  $\alpha$  vs. Número de Reynolds. Esquema de análisis de rugosidad para los datos tomados durante los semestres 2011-2 y 2012-1.

Por otro lado, se realizó un análisis adicional para las rugosidades positivas obtenidas a partir de los datos registrados en cada una de las mediciones. Una vez calculada la variable  $a$  para  $k_s$  positivas se realizó un nuevo procesamiento de datos para obtener una nueva rugosidad ( $k'_s$ ). Esta nueva rugosidad se calculó con ayuda de la siguiente ecuación:

$$k'_s = 3.7d \left[ 10^{-1/(2.035\sqrt{f})} - \frac{a}{Re\sqrt{f}} \right]$$

En la Figura 50 se puede observar que todos los puntos se encuentran sobre la línea horizontal de las abscisas, mostrando que el  $k'_s$  es igual o muy cercano a cero. En este sentido, es posible intuir que la rugosidad de la tubería no se está percibiendo; fenómeno que se podría explicarse gracias al material de la tubería (PVC) y la forma como esta está hecha o al método como se está calculando la rugosidad absoluta ( $k_s$ ) en este estudio.

#### 5.3.4 Cálculo tipo del procedimiento para encontrar la variable $a$ y $k'_s$

A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de  $a$  y  $k'_s$  para el día 14 de marzo de 2012. El procedimiento para calcular los valores del factor de fricción y el número de Reynolds se encuentra descrito en la sección 4.6 de este documento.

$$d_{Tubería} = 0,16086 \text{ m}$$

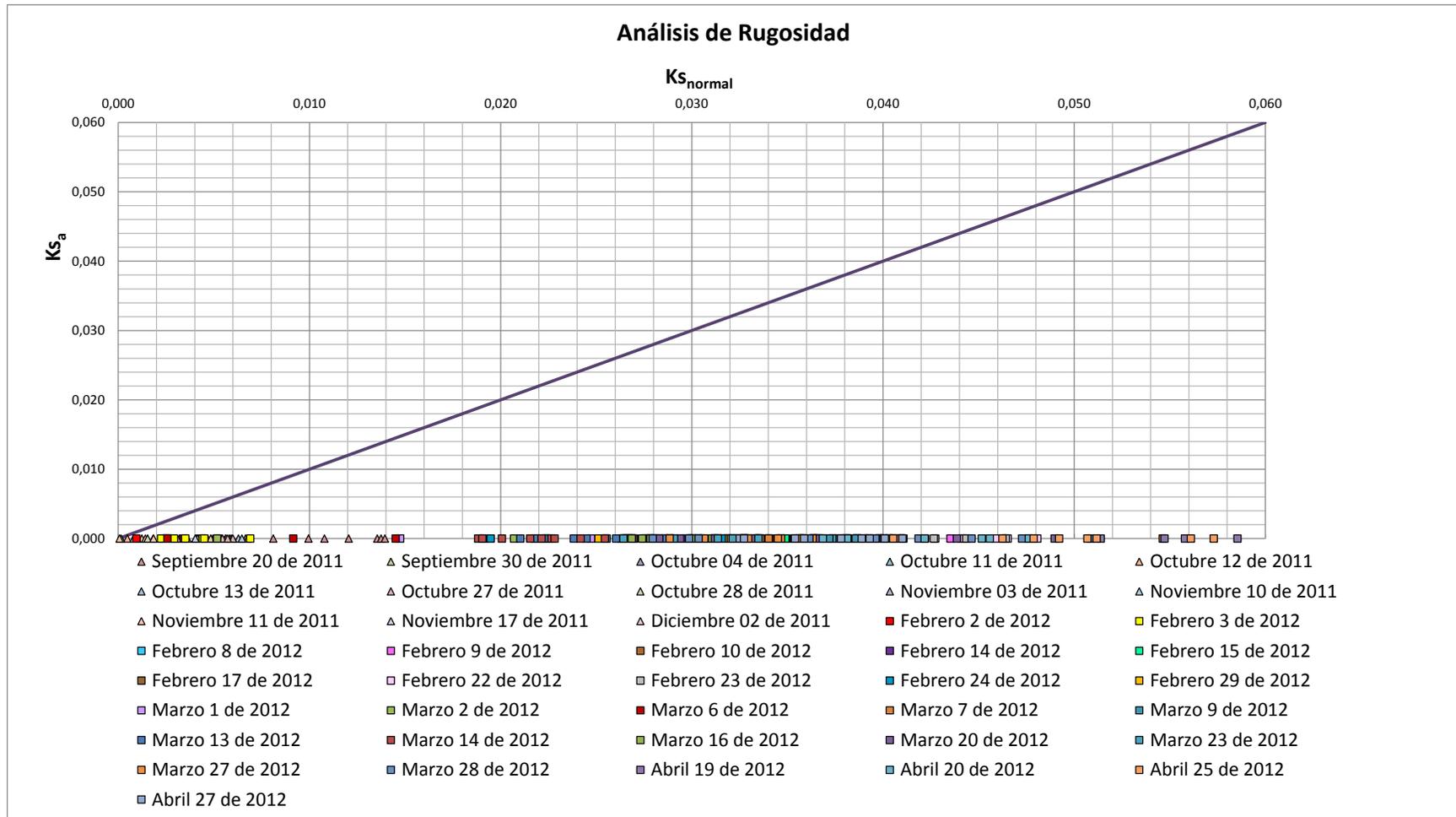
$$f = 0,01628$$

$$Re = 263089$$

$$a = Re\sqrt{f}10^{-1/(2.035\sqrt{f})} = 263089 \times \sqrt{0,01628} \times 10^{-1/(2.035\sqrt{0,01628})} = 4,73$$

$$k'_s = 3.7d \left[ 10^{-1/(2.035\sqrt{f})} - \frac{a}{Re\sqrt{f}} \right]$$

$$k'_s = 3.7 \times 160,86 \text{ mm} \left[ 10^{-1/(2.035\sqrt{0,01628})} - \frac{4,73}{263089\sqrt{0,01628}} \right] = -0,000046 \text{ mm}$$



**Figura 50. Rugosidad calculada a partir de  $a$  vs. Rugosidad normal. Esquema de análisis de rugosidad para los datos tomados durante los semestres 2011-2 y 2012-1.**

---

## 6. Conclusiones

---

A continuación se presentan las conclusiones, de acuerdo a como se mostraron los resultados:

### 6.1 Modelo físico

Al modelo físico usado para este estudio, aunque apropiado para la investigación, se le pueden hacer varias reformas.

En primer lugar se recomienda la apertura de nuevos testigos en otro lugar de la tubería debido a que las biopelículas no crecen uniformemente a lo largo de esta; esto permitiría una mejor caracterización del crecimiento de los microorganismos en el sistema.

En segundo lugar se recomienda que tanto el tanque de almacenamiento como el tanque vertical se cubran totalmente en su parte superior, pues al estar expuestos al ambiente se presenta el riesgo que el agua del sistema se contamine con otras sustancias y organismos ajenos al estudio llevado a cabo en esta tesis.

Por último se aconseja realizar una base de cemento que permita una nivelación adecuada de la tubería y evite su continua desnivelación por efecto del crecimiento de los pastos de la zona; en caso que esta solución no sea viable económicamente se aconseja realizar al menos tres nivelaciones topográficas del terreno a lo largo del semestre a fin de evaluar el efecto que tiene este desnivel en las variables del estudio.

### 6.2 Aspectos microbiológicos

Se comprobó la existencia de algas y cianobacterias con kits que detectan su ausencia y su presencia.

Los resultados para detección de algas fueron contundentes, tanto en las muestras de los testigos como en las del vertedero y gaviones, debido al cambio total del color de la muestra a verde intenso. Gracias a los resultados obtenidos en estas pruebas es posible afirmar con total seguridad que existen colonias de microalgas en todo el sistema.

Por otra parte, los cambios de color para las muestras en los kits de detección de cianobacterias fueron muy leves, por lo cual no es posible afirmar con total seguridad la existencia de estos microorganismos en el sistema. Debido a esto, se recomienda realizar pruebas más específicas, preferiblemente de tipo molecular, con el fin de identificar si existen o no cianobacterias en este montaje.

### 6.3 Aspectos hidráulicos

A lo largo del periodo de recirculación se pudo observar un aumento del factor de fricción. El aumento en este valor fue mayor a lo esperado, por lo que se recomienda analizar las formaciones de lechos móviles en el fondo de la tubería. Dichos lechos pueden presentarse en el montaje utilizado para este estudio como precipitados de materiales extraños, material vegetal y humus que entran al sistema debido a que los tanques de almacenamiento y vertical no se encuentran cubiertos de manera adecuada. En caso que existan lechos móviles en el fondo de la tubería se debe tener en cuenta que a velocidades bajas se tiende a sedimentar el material y a medida que las velocidades aumentan este se puede resuspender ocasionando una disminución a las pérdidas atribuidas a estos lechos. Es así como el factor de fricción no solo se vería afectado por las pérdidas por fricción sino a la suma de las pérdidas por fricción más unas pérdidas representadas por la existencia de lechos móviles; fenómeno que explicaría el aumento en el valor del factor de fricción.

Al analizar los resultados obtenidos por el cálculo de la rugosidad absoluta, es posible ver una relación entre ésta variable y la ubicación de los puntos en el Diagrama de Moody con respecto al límite establecido por Prandtl (Figura 48). En los casos donde las rugosidades son positivas, se observa que los puntos se encuentran por encima del límite de 2.51, pero cuando las rugosidades son negativas los datos se ubican por debajo del límite de 2.51. Por último, cuando el valor de la rugosidad absoluta es muy cercano a cero, los datos tienden a localizarse sobre la línea límite equivalente al valor teórico de 2.51. Por otra parte, es importante tener en cuenta que la forma en la que se está calculando la rugosidad absoluta hace que ésta dependa del valor de fricción, por lo cual es posible deducir que los valores obtenidos para la rugosidad absoluta también se pueden estar viendo afectados por la posible presencia de lechos móviles en el fondo de la tubería.

A pesar del incremento de la rugosidad detectado a lo largo del periodo de estudio, el flujo se mantuvo como FTHL según el límite establecido por Colebrook-White, lo que ratifica que los resultados hidráulicos no se encuentran dentro de la zona de transición, sino dentro de la zona del FTHL. Lo anterior también se demostró mediante el análisis de rugosidad generado por la nueva variable  $\alpha$  (Figura 49), donde los valores obtenidos nunca superaron el número 5.21, establecido por la ecuación Colebrook-White como el límite de la zona de FTHL.

Finalmente, los resultados que arrojó el cálculo de la nueva rugosidad ( $ks'$ ) son un poco extraños, pues la mayoría de estos valores son cero o muy cercanos a este valor. Este fenómeno se puede relacionar con el hecho que los materiales con los que se fabrican las tuberías en la actualidad, en el caso de este estudio el PVC, pueden ser considerados muy lisos para el análisis convencional que se utiliza para el estudio de la hidráulica de tuberías. Debido a esto, se recomienda, para estudios posteriores de tipo experimental, plantear una nueva ecuación con el objetivo de poder realizar un análisis apropiado de la rugosidad de los nuevos materiales.

## 7. Referencias

---

- Carrasco, D. (2007). *Cianobacterias plantónicas y cianotoxinas en embalses españoles*. Madrid.
- Flechas, R. (2010). *Efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach vs la ecuación de Hazen-Williams sobre los costos de diseños optimizados en acueductos, teniendo en cuenta la rugosidad de las tuberías, línea del gradiente hidráulico y temperatura*. Bogotá: Universidad de Los Andes, Tesis.
- Gacharná, S. C. (2011). *Factores que favorecen la generación y crecimiento de algas en las redes de distribución de agua potable*. Bogotá: Universidad de Los Andes, Tesis.
- García, S. I. (2005). *Cianobacterias y cianotoxinas. Impactos sobre la salud humana*.
- Hernández, M. X. (2010). *Influencia de la fuente de carbono en el desarrollo de biopelículas y su efecto hidráulico en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá: Universidad de Los Andes, Tesis.
- Keinanen-Toivola, M. M. (2006). Functions of drinking water pipe materials - reason or result of water quality? *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*. Cincinnati.
- Kerr, C., Osborn, K., Robson, G., & Handley, P. (s.f.). The relationship between pipe material and biofilm formation in a laboratory model system. *Journal of Applied Microbiology*, 85, 29S-38S.
- Mohapatra, P. K. (2008). The Cyanobacteria. En P. K. Mohapatra, *Textbook of Environmental Microbiology* (Vol. 2.4, págs. 37-40). Nueva Deli: I.K International Publishing House Pvt. Ltd.
- Mohapatra, P. K. (2008). The World of Algae. En P. K. Mohapatra, *Textbook of Environmental Microbiology* (págs. 45-50). Nueva Deli: I.K International Publishing House Pvt. Ltd.
- Nieto, L. (2011). *Estudio de las ecuaciones que describen el flujo turbulento hidráulicamente liso: revisión del Diagrama de Moody y las ecuaciones de Colebrook-White y Blasius*. Bogotá: Universidad de Los Andes, Tesis.
- Niquette, P., Servais, P., & Savoie, R. (2000). Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system. *Water Research*, 34, 1952-1956.
- Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2005). The Algae. En L. M. Prescott, J. P. Harley, & D. A. Klein, *Microbiology* (Sexta ed., págs. 553-575). New York: McGraw-Hill.
- Richardson, S., & Ternes, T. (2011). Water Analysis: Emerging contaminants and current issues. *Analytical Chemistry*, 83, 4614-4648.

- Rogers, J., Downsett, A., Dennis, P., Lee, J., & Keevil, C. (1994). Influence of Plumbing Materials on Biofilm Formation and Growth of *Legionella pneumophila* in Potable Water Systems. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(6), 1842-1851.
- Saldarriaga, J. G. (2007). *Hidráulica de Tuberías: abastecimiento de agua, redes, riesgos*. Bogotá D.C: Alfaomega.
- Shen, Q., Zhu, J., Cheng, L., Zhang, J., Zhang, Z., & Xu, X. (2010). Enhanced algae removal by drinking water treatment of chlorination coupled with coagulation. *Desalination*, 271, 236-240.
- Sherman, B., Ransom, G., Lawrence, I., Bormans, M., Ford, P., Sho, N., y otros. (2000). *Factors controlling algal growth and composition in reservoirs*. Australian Government, Report of Reservoir Managers' Workshops.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *Health Risks from Microbial Growth and Biofilms in Drinking Water Distribution Systems*. Office of Ground Water and Drinking Water, Washington.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Distribution System Indicators of Drinking Water Quality*. Office of Ground Water and Drinking Water, Washington.
- Vargas, A. (2004). *Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable. Estado del arte*. Bogotá: Universidad de Los Andes, Tesis.
- World Health Organization. (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. Londres.
- World Health Organization. (2003). *Guidelines for Safe Recreational Water Environment. Volume 1, Coastal and Fresh Waters*.



## **8. Anexos**

---

**Anexo 1. Resultados correspondientes a cada día de pruebas para el periodo 2012-1.**

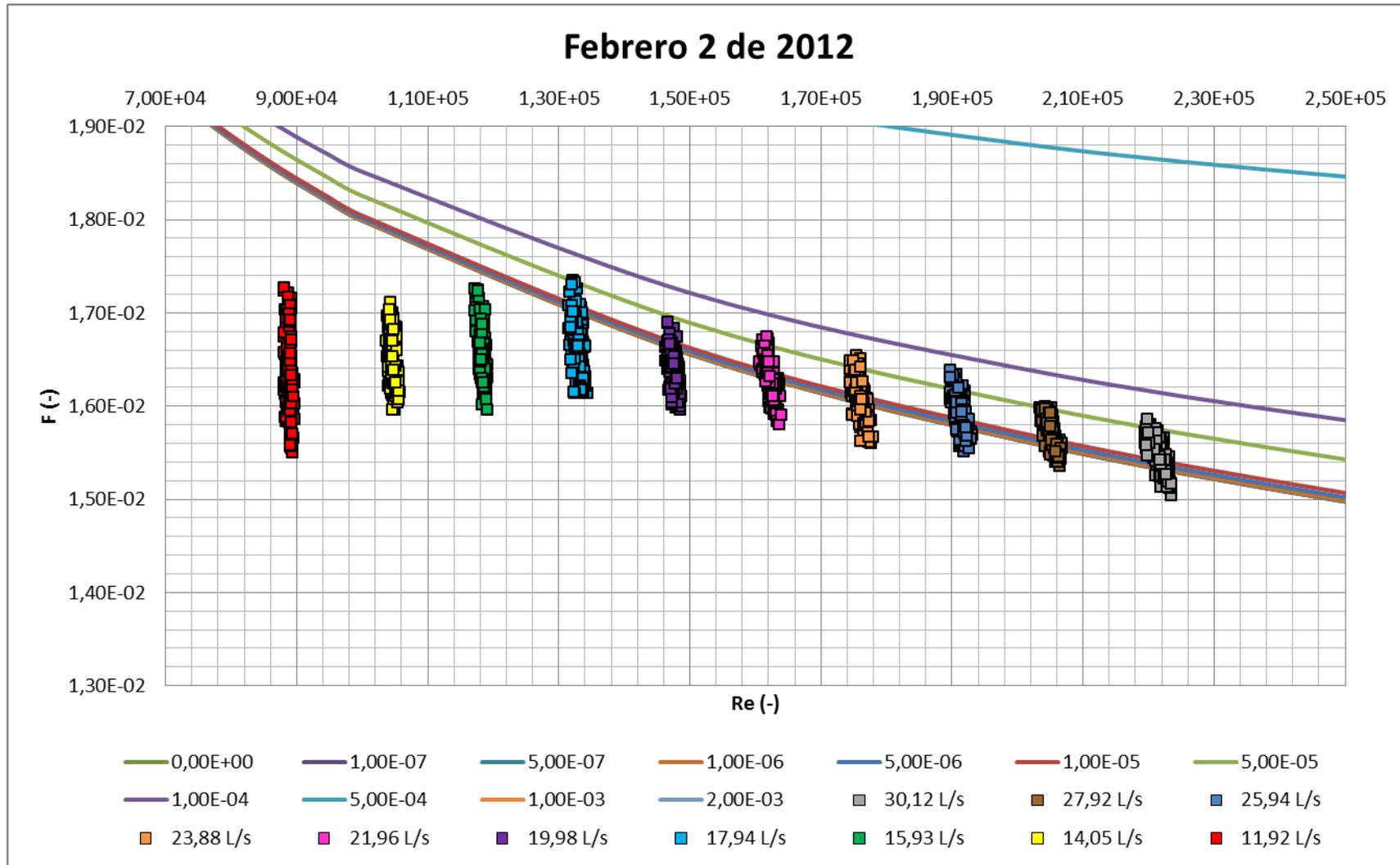
**Anexo 2. Resultados correspondientes a cada día de pruebas para el periodo 2011-2.**

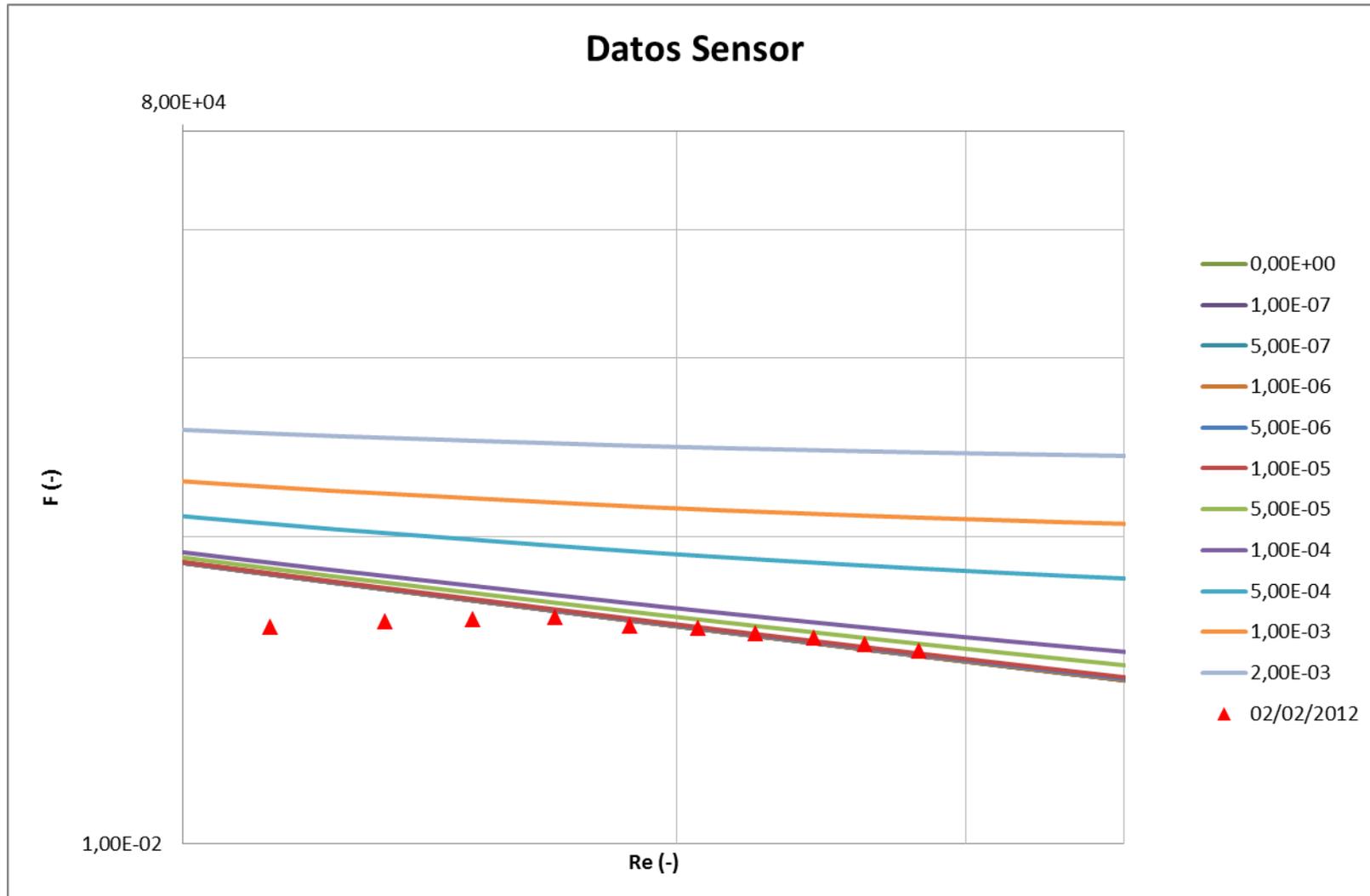


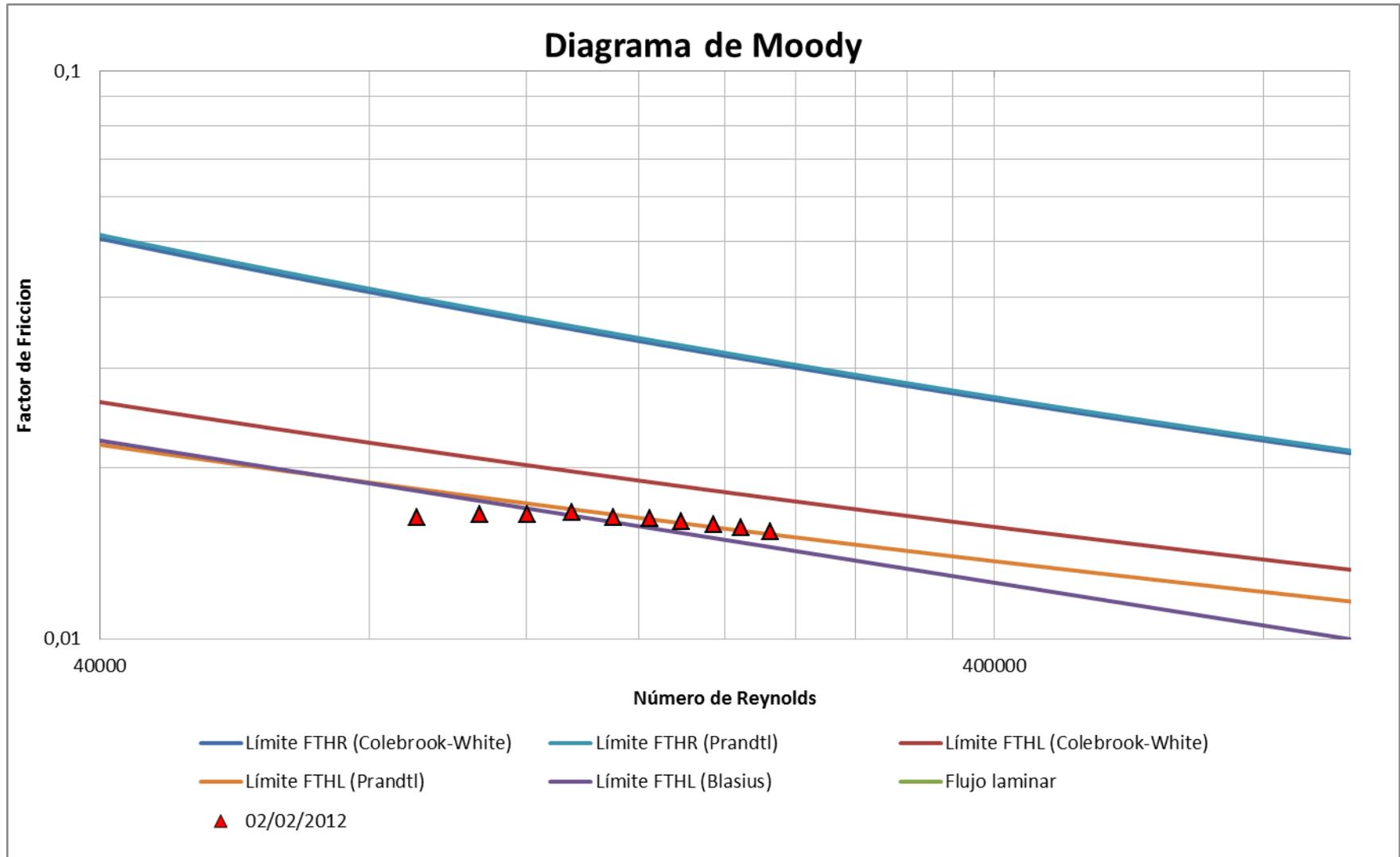
# ANEXO I – Resultados correspondientes a cada día de pruebas para el periodo 2012-1

**Semana 1: Febrero 2 de 2012**

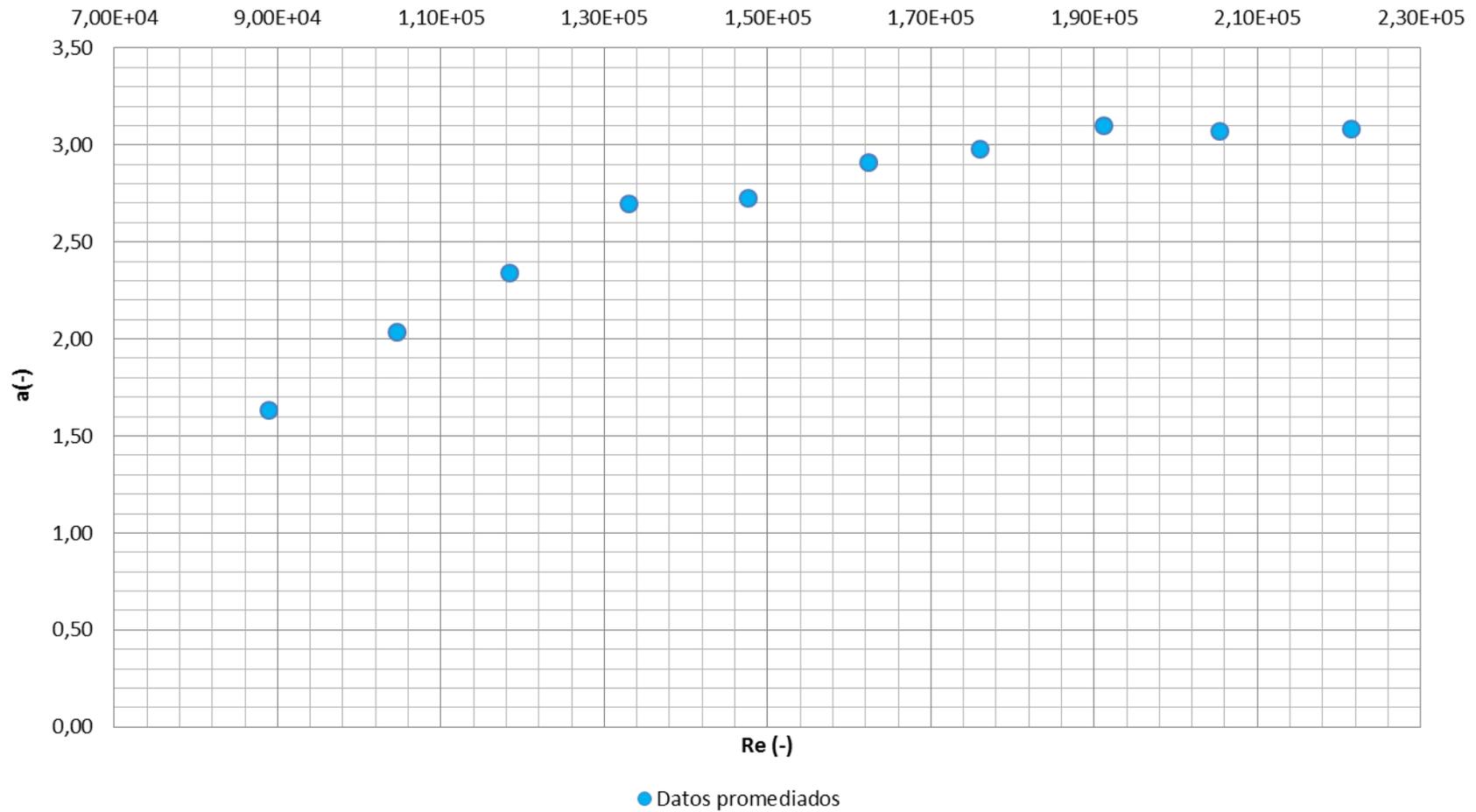
Febrero 2 de 2012									
Q	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
30,12 L/s	0,0150	219541,51	0,0159	223551,01	0,0155	221555,68	0,0025	3,07981	0,0000E+00
27,92 L/s	0,0154	206753,73	0,0160	206753,73	0,0157	205344,04	0,0026	3,07294	-4,0331E-19
25,94 L/s	0,0155	189694,51	0,0164	193153,60	0,0159	191240,16	0,0034	3,09958	-1,6631E-19
23,88 L/s	0,0156	174448,43	0,0166	177976,20	0,0161	176069,41	0,0010	2,97656	4,0331E-20
21,96 L/s	0,0158	160731,91	0,0167	163944,08	0,0163	162319,69	-0,0005	2,91158	
19,98 L/s	0,0159	146291,77	0,0169	148954,90	0,0164	147673,54	-0,0056	2,72384	
17,94 L/s	0,0161	131475,57	0,0174	134433,57	0,0167	132969,61	-0,0069	2,69689	
15,93 L/s	0,0160	117211,29	0,0173	119169,74	0,0166	118359,85	-0,0198	2,33737	
14,05 L/s	0,0160	103749,75	0,0171	105734,35	0,0165	104623,14	-0,0339	2,03533	
11,92 L/s	0,0155	88065,88	0,0174	89821,27	0,0163	88961,67	-0,0583	1,63272	







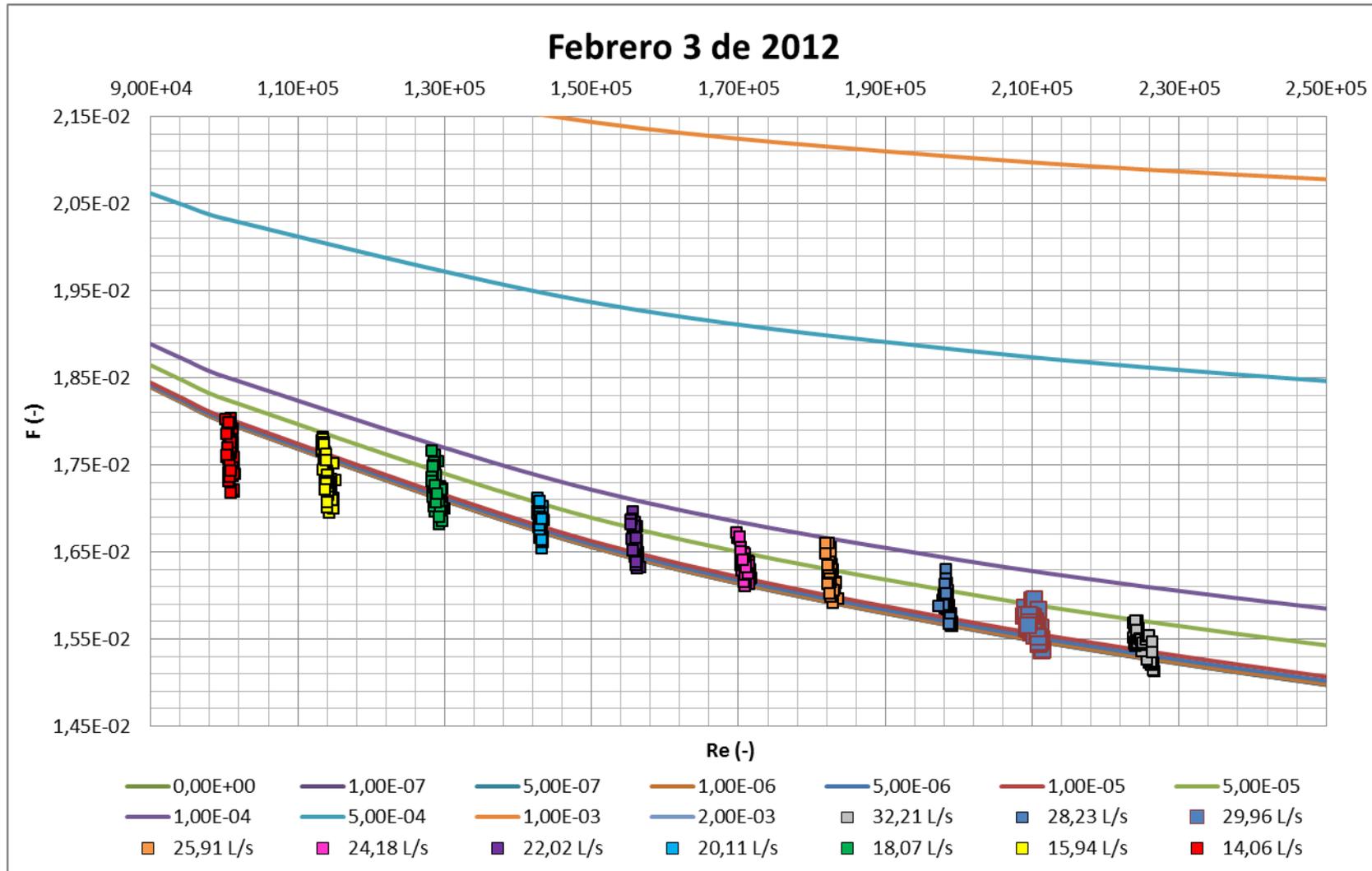
## Análisis de Rugosidad

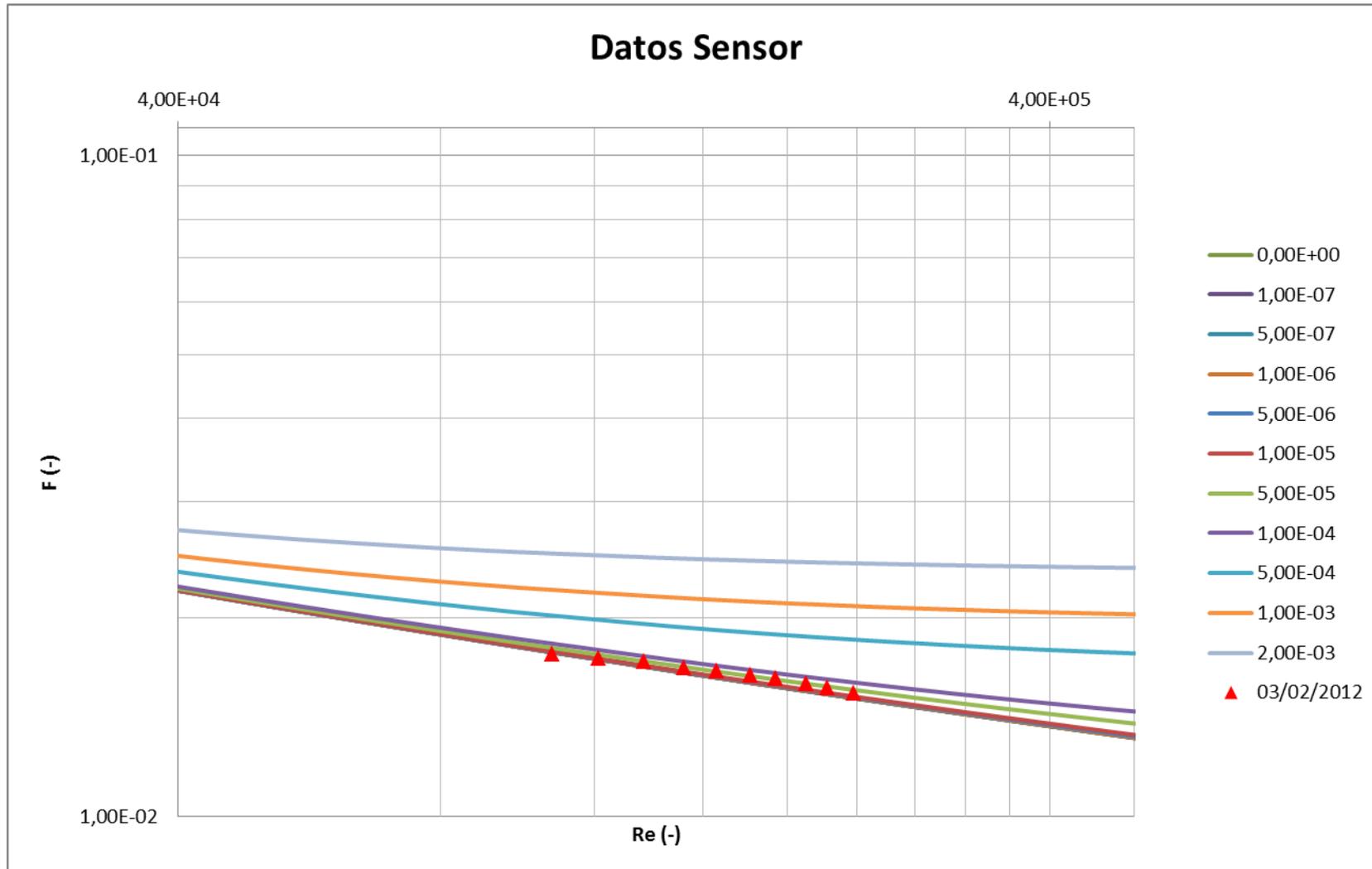


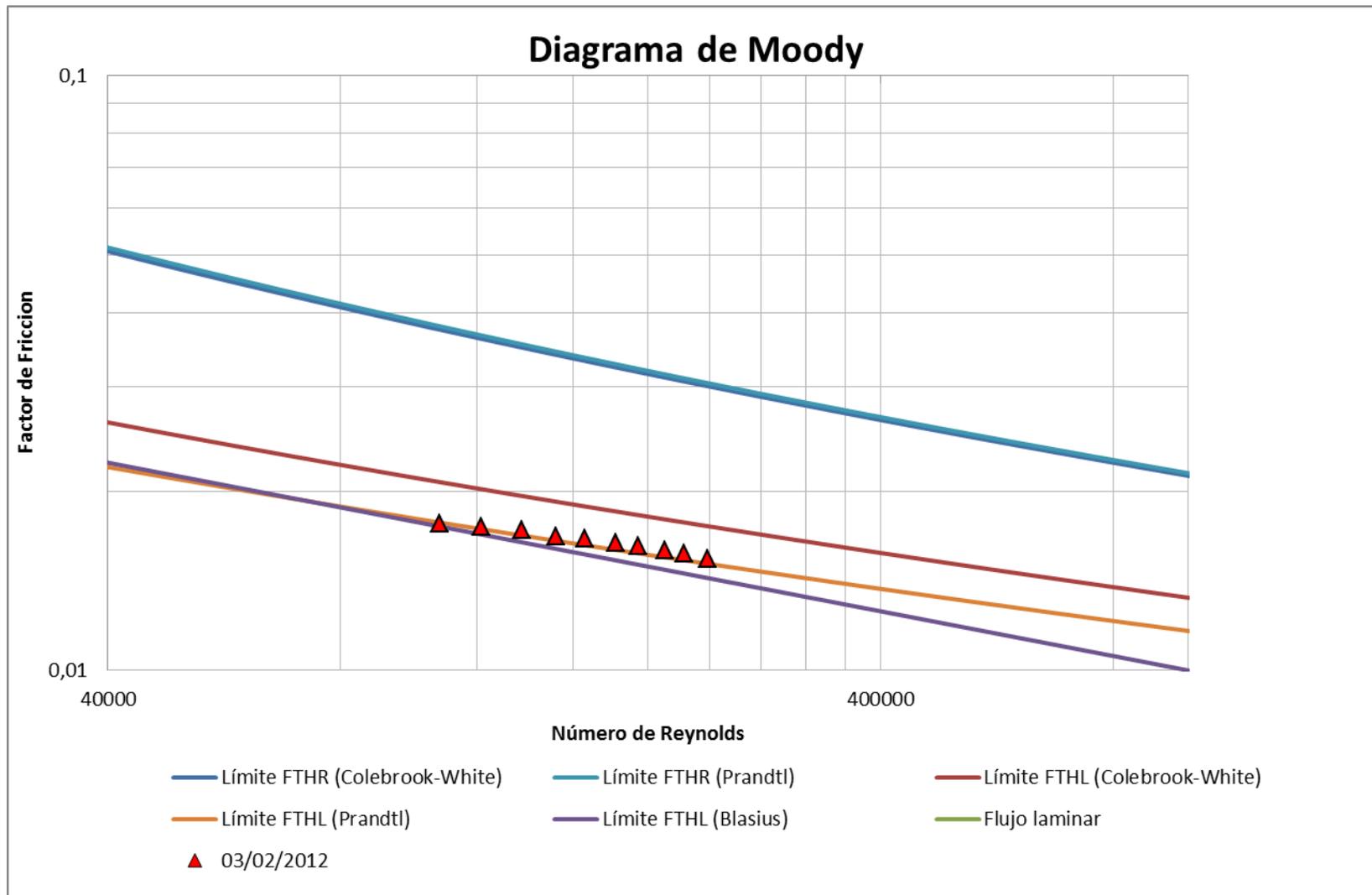


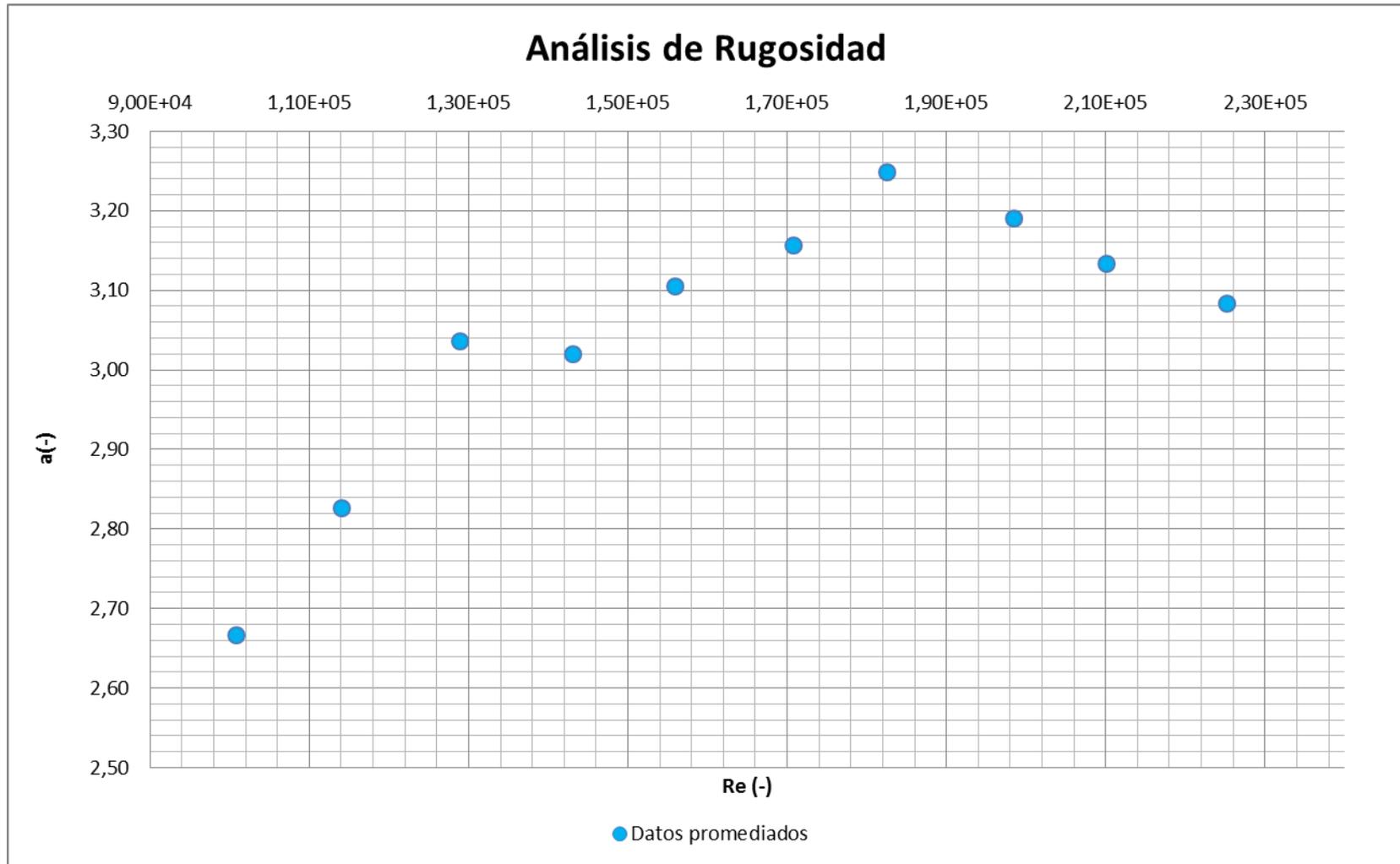
**Semana 1: 3 de Febrero de 2012**

Febrero 3 de 2012									
Q	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
32,21 L/s	0,0151	223772,22	0,0157	226644,54	0,0154	225239,29	0,0025	3,08276	-3,23E-19
29,96 L/s	0,0154	211353,86	0,0160	211353,86	0,0157	210040,92	0,0029	3,13393	-1,61E-19
28,23 L/s	0,0156	197328,32	0,0163	199105,07	0,0159	198460,89	0,0052	3,19059	1,61E-19
25,91 L/s	0,0159	181883,30	0,0166	183668,14	0,0162	182556,36	0,0069	3,24809	0,00E+00
24,18 L/s	0,0161	169782,97	0,0167	171758,97	0,0164	170811,46	0,0044	3,15632	0,00E+00
22,02 L/s	0,0163	155337,91	0,0170	156718,22	0,0166	155998,88	0,0045	3,10460	0,00E+00
20,11 L/s	0,0165	142661,52	0,0171	143524,90	0,0168	143131,68	0,0023	3,01980	0,00E+00
18,07 L/s	0,0168	128240,66	0,0177	129946,64	0,0172	128959,44	0,0035	3,03540	0,00E+00
15,94 L/s	0,0169	113320,45	0,0178	115147,17	0,0174	114055,42	-0,0031	2,82594	
14,06 L/s	0,0172	100183,13	0,0180	101535,64	0,0176	100845,98	-0,0095	2,66688	



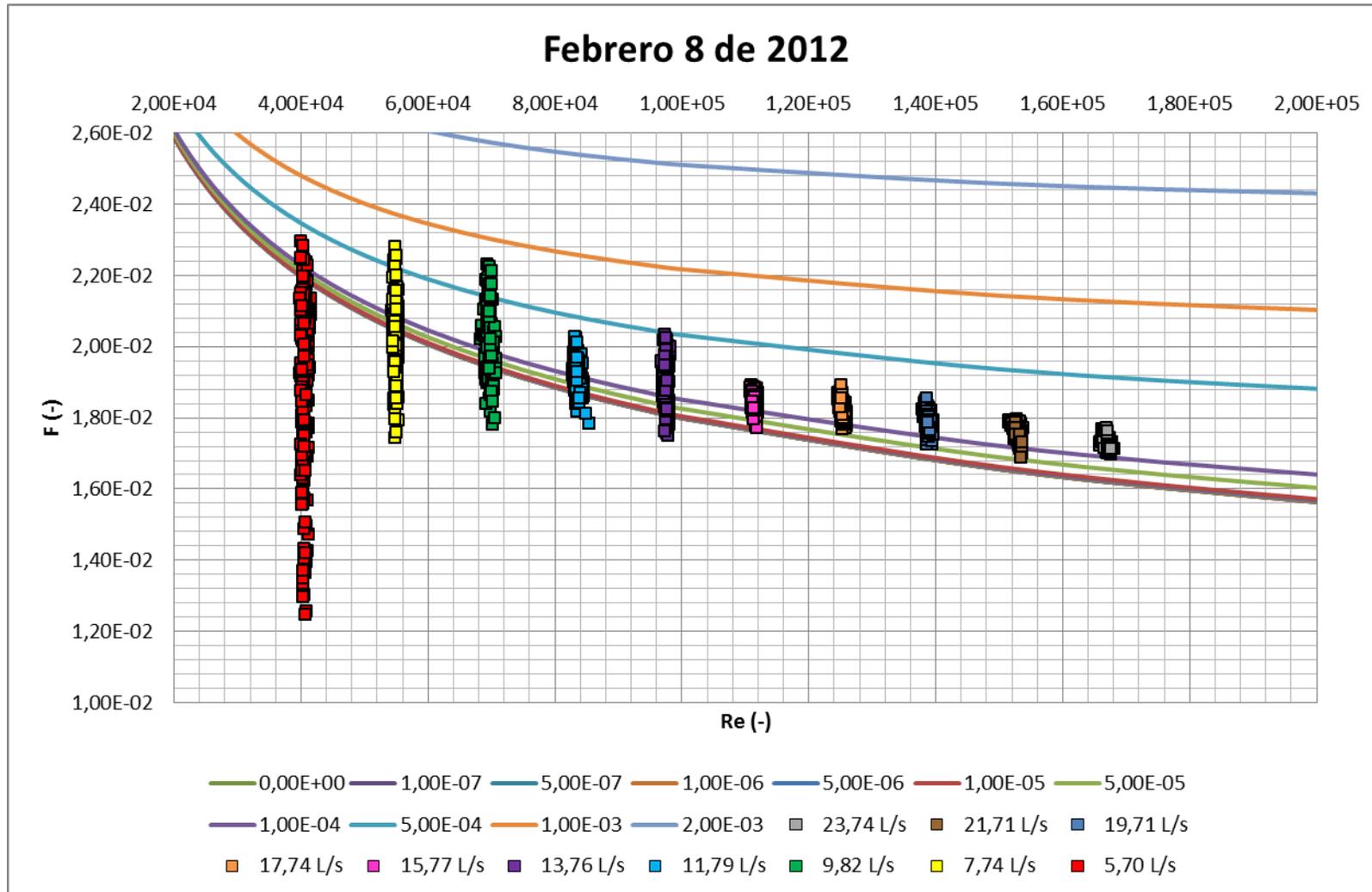


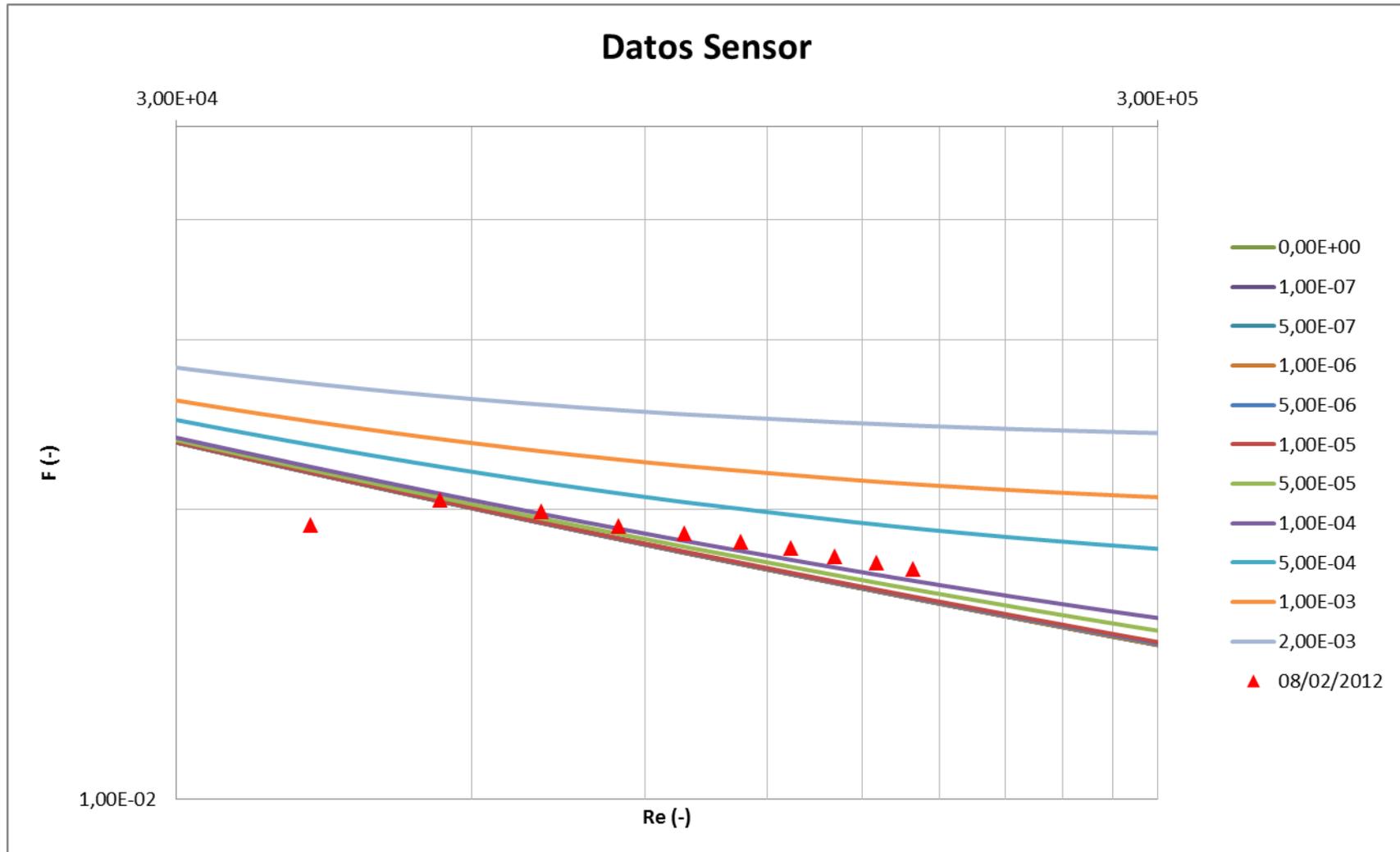


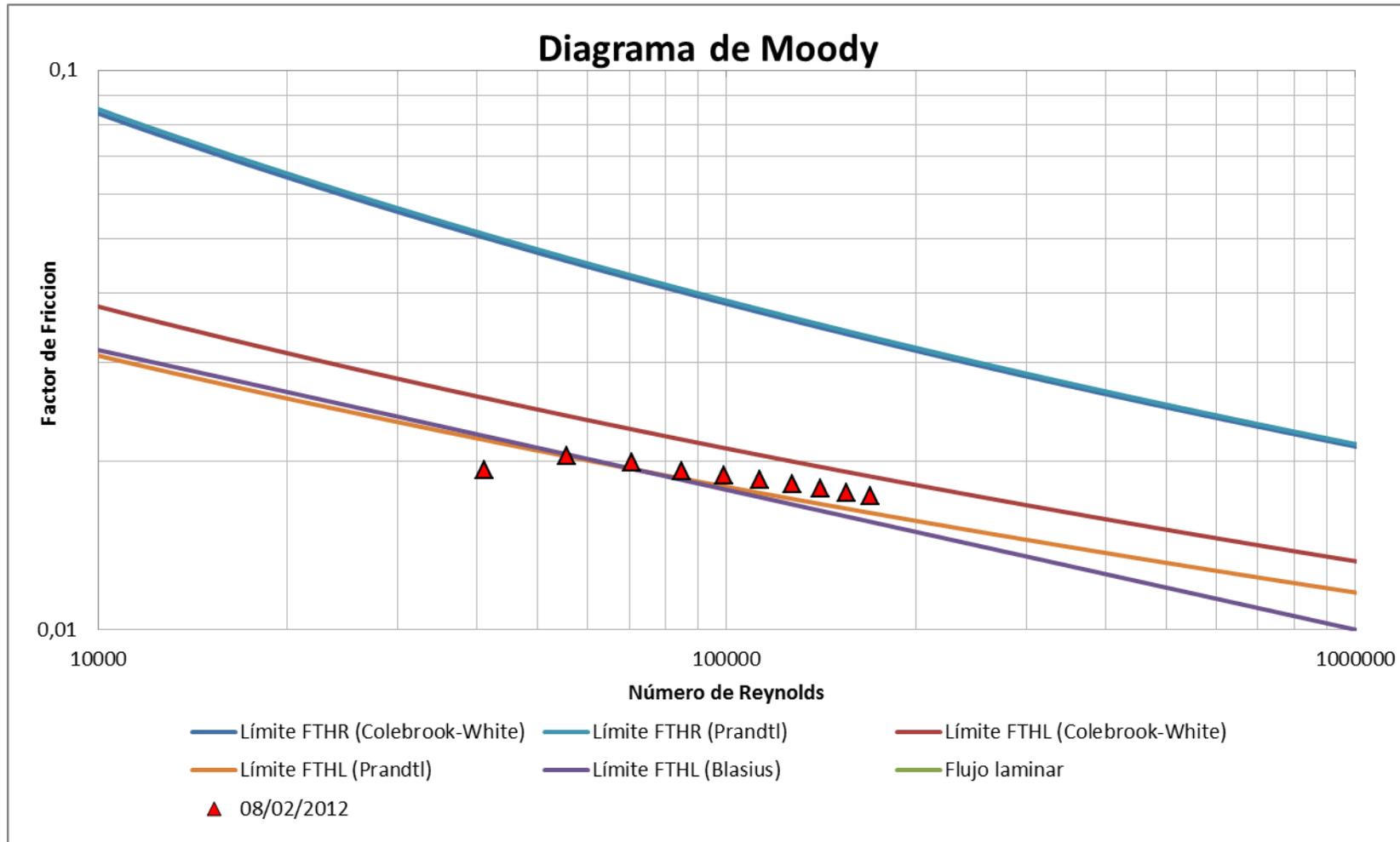


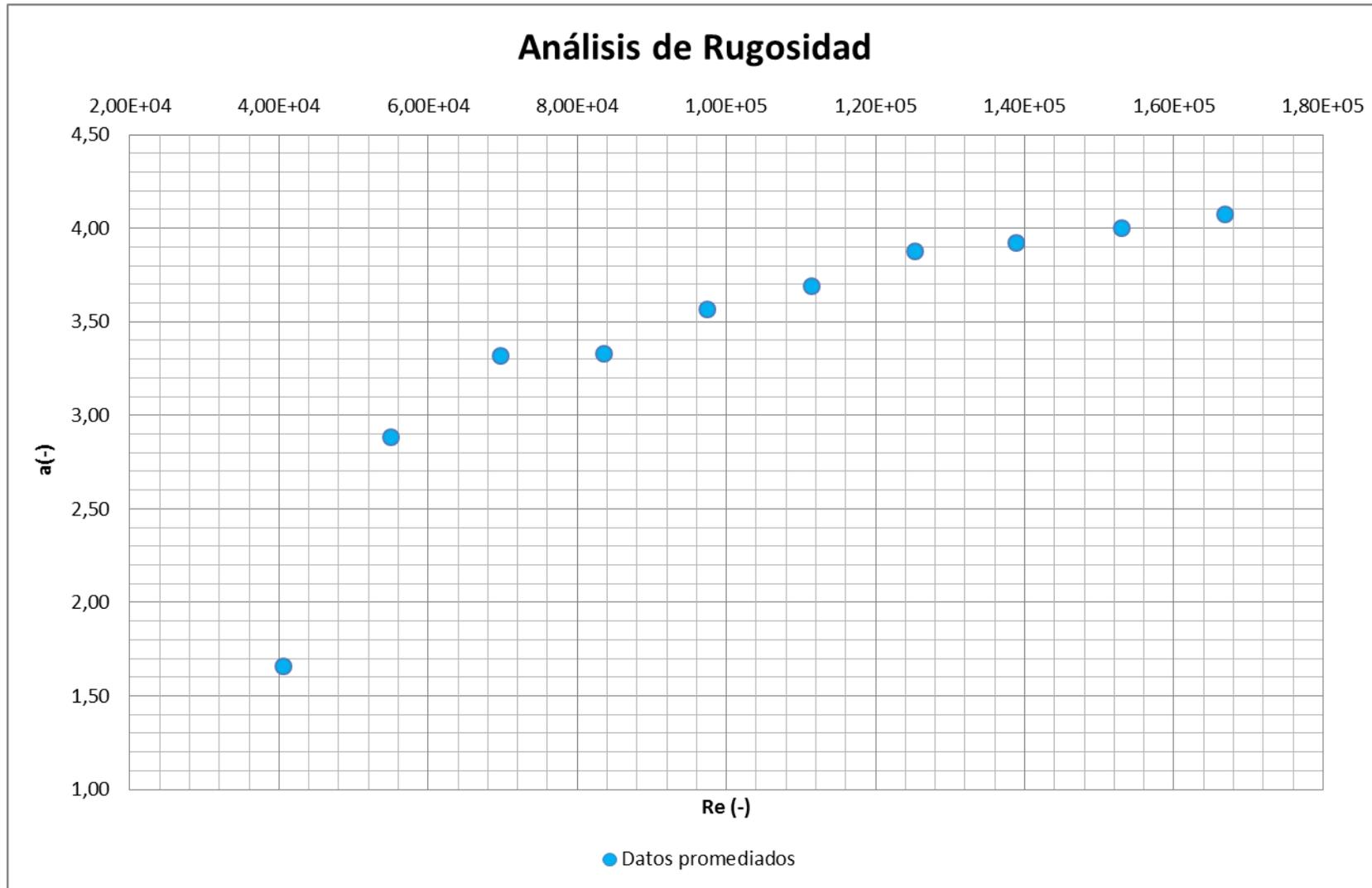
**Semana 2: 8 de Febrero de 2012**

Febrero 8 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
23,74 L/s	0,0170	165921,96	0,0177	168054,79	0,0173	166895,41	0,0270	4,07546	3,2265E-19
21,71 L/s	0,0169	153753,50	0,0180	153753,50	0,0176	152998,57	0,0275	4,00222	0,0000E+00
19,71 L/s	0,0172	137935,87	0,0186	139604,72	0,0179	138868,46	0,0279	3,92000	0,0000E+00
17,74 L/s	0,0177	124558,39	0,0189	126027,40	0,0182	125344,08	0,0294	3,87655	0,0000E+00
15,77 L/s	0,0177	110789,75	0,0189	112050,26	0,0185	111448,89	0,0267	3,69178	0,0000E+00
13,76 L/s	0,0175	96877,25	0,0203	98142,99	0,0189	97495,29	0,0255	3,56747	0,0000E+00
11,79 L/s	0,0178	82854,41	0,0203	85389,76	0,0192	83538,31	0,0192	3,32798	0,0000E+00
9,82 L/s	0,0178	68323,56	0,0223	70794,53	0,0200	69715,46	0,0219	3,31670	0,0000E+00
7,74 L/s	0,0174	54421,44	0,0228	55414,52	0,0204	54945,13	-0,0007	2,88586	
5,70 L/s	0,0125	39867,16	0,0230	41559,16	0,0188	40586,85	-0,1208	1,65833	





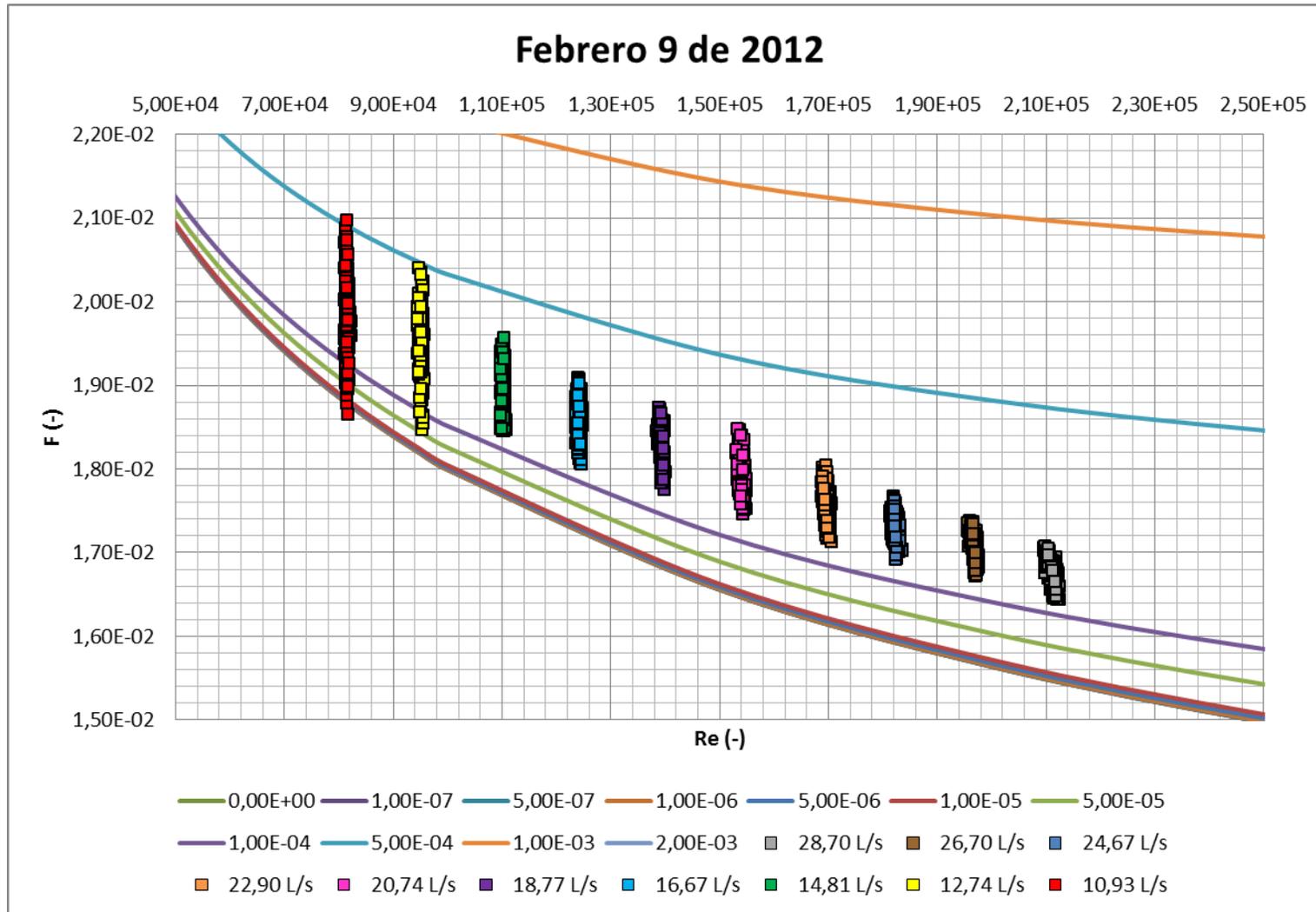


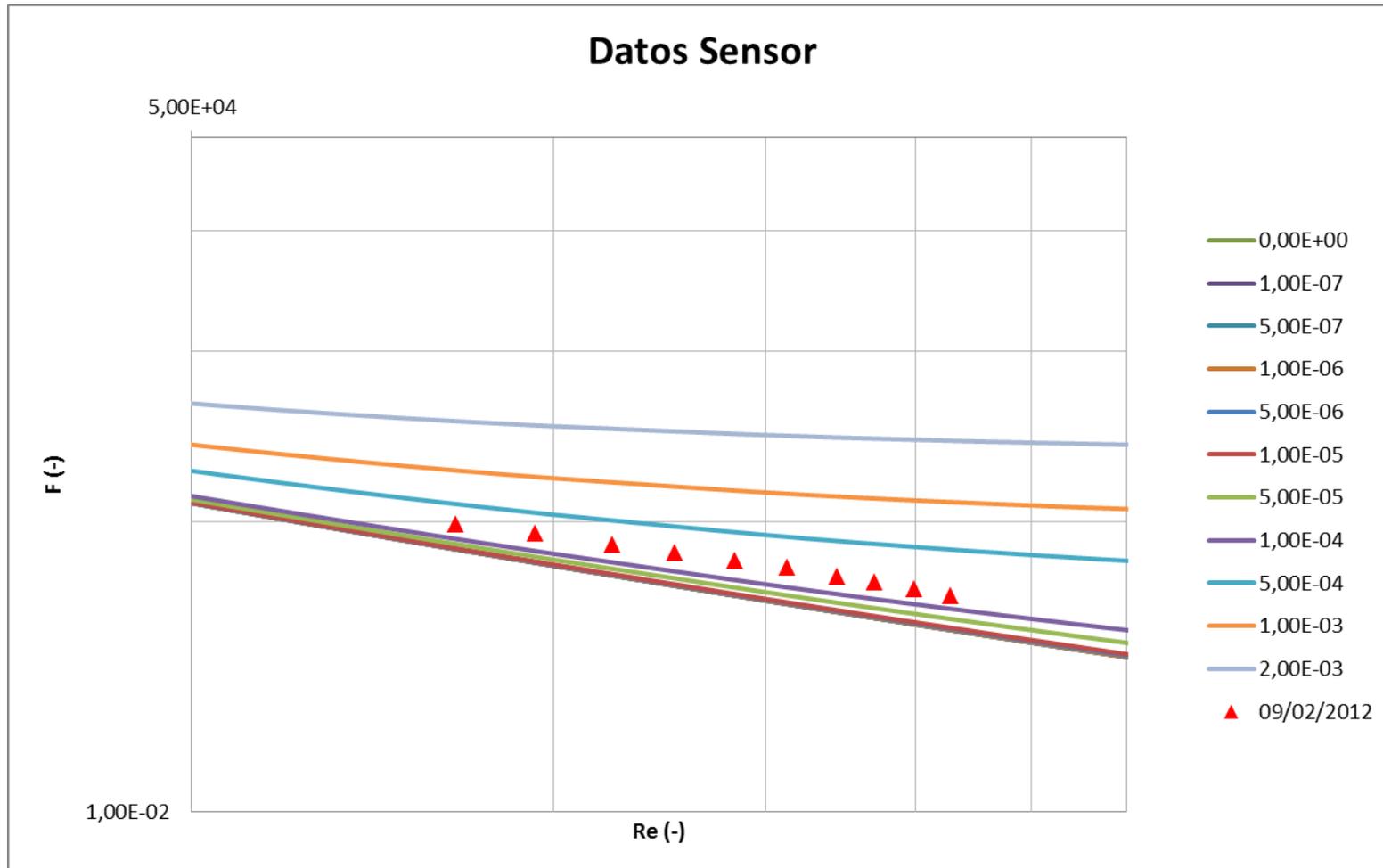


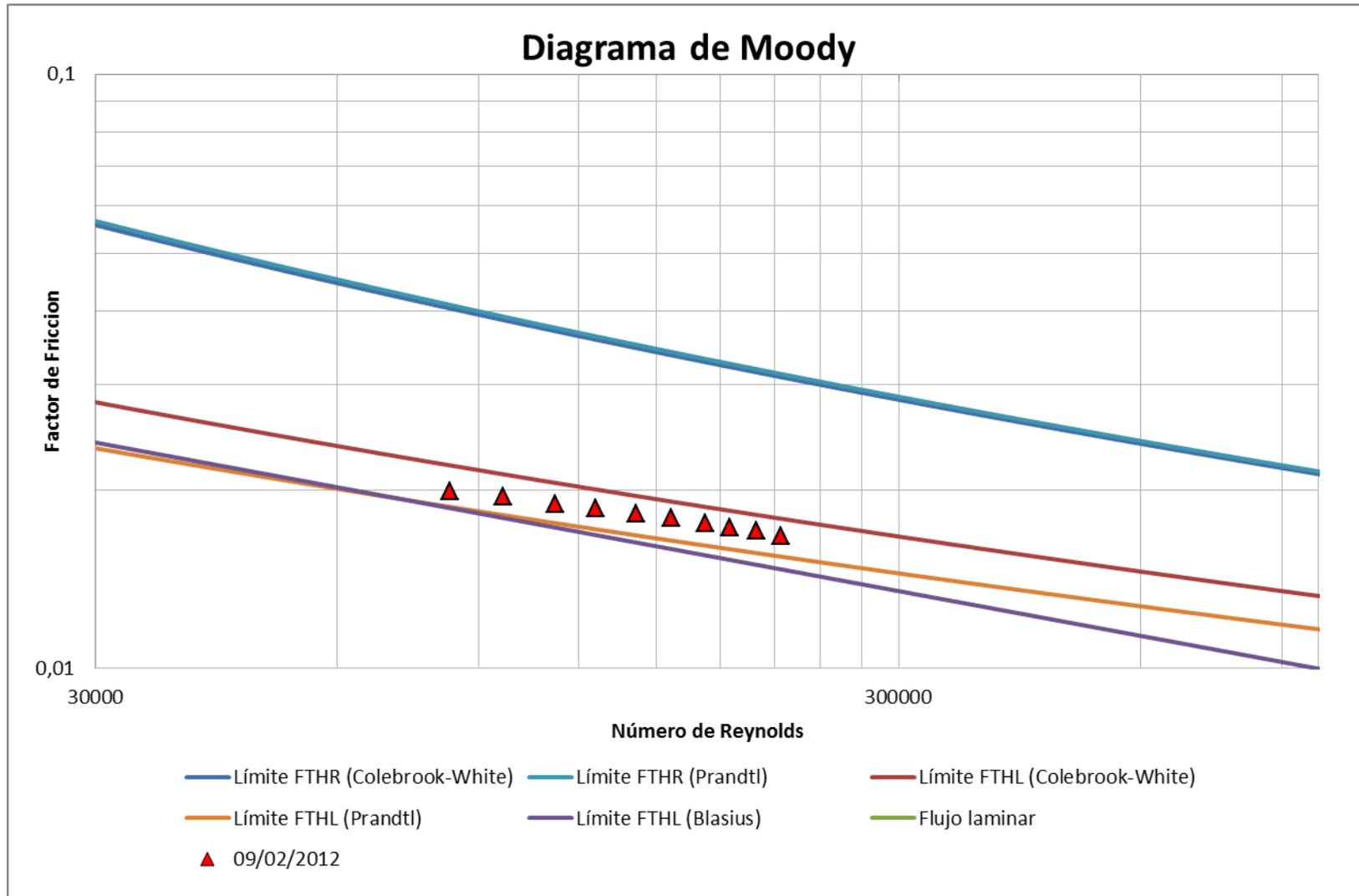


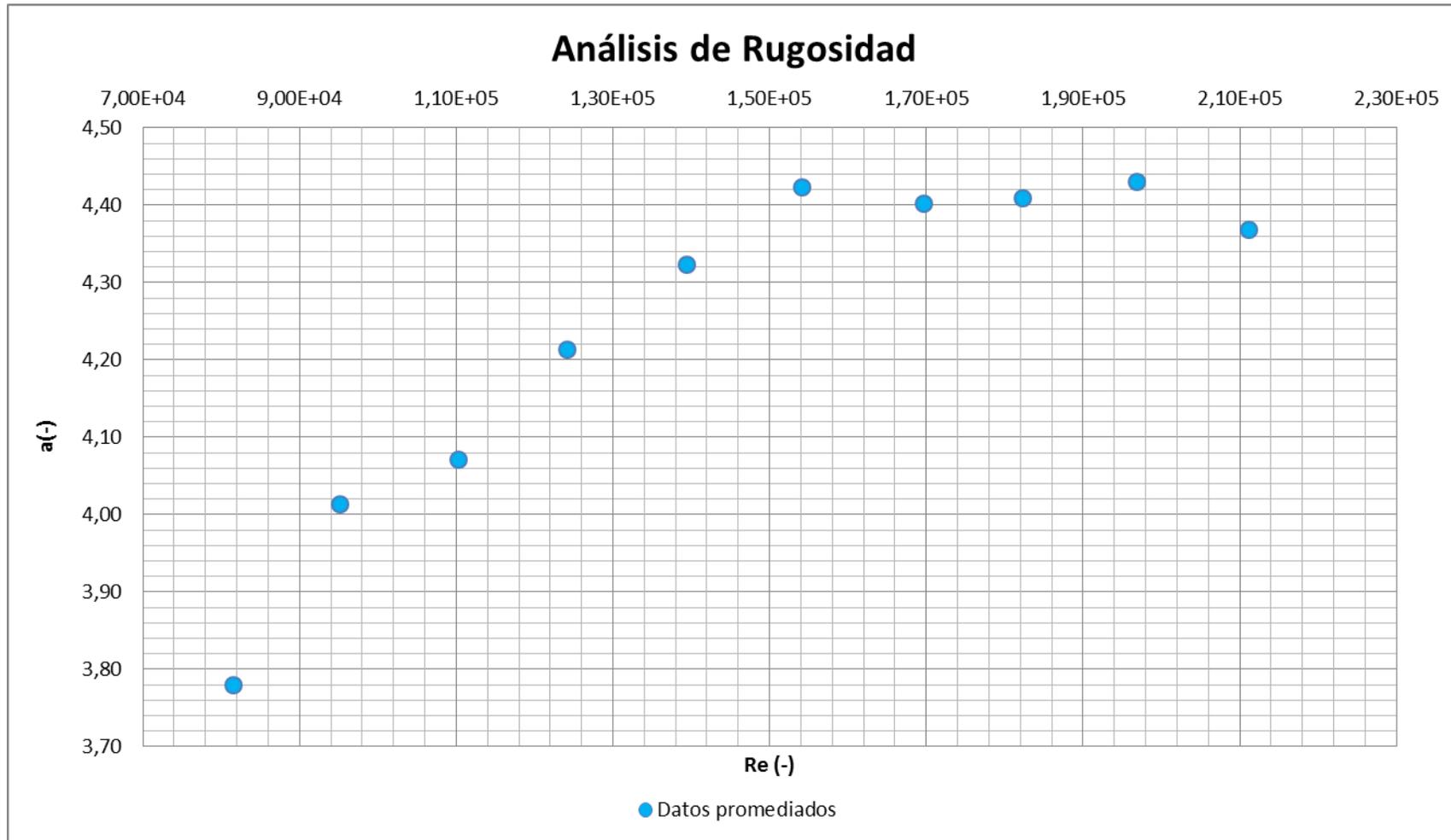
**Semana 2: 9 de Febrero de 2012**

Febrero 9 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
28,70 L/s	0,0164	209596,95	0,0171	212515,51	0,0168	211118,38	0,0270	4,36776	8,3588E-20
26,70 L/s	0,0167	197760,64	0,0174	197760,64	0,0170	196879,16	0,0300	4,43046	0,0000E+00
24,67 L/s	0,0169	181387,41	0,0177	183734,68	0,0173	182361,18	0,0318	4,40890	0,0000E+00
22,90 L/s	0,0171	168836,69	0,0180	170597,56	0,0176	169680,82	0,0339	4,40130	0,0000E+00
20,74 L/s	0,0175	153169,80	0,0185	155014,17	0,0179	154073,88	0,0376	4,42306	0,0000E+00
18,77 L/s	0,0177	138457,63	0,0187	140023,15	0,0182	139410,29	0,0386	4,32244	0,0000E+00
16,67 L/s	0,0181	123590,79	0,0191	124874,80	0,0186	124170,31	0,0398	4,21280	0,0000E+00
14,81 L/s	0,0184	109757,02	0,0196	110893,42	0,0189	110296,83	0,0398	4,07085	0,0000E+00
12,74 L/s	0,0185	94459,32	0,0204	95754,04	0,0195	95105,31	0,0435	4,01379	0,0000E+00
10,93 L/s	0,0187	81016,98	0,0210	82271,29	0,0199	81578,92	0,0399	3,77878	0,0000E+00





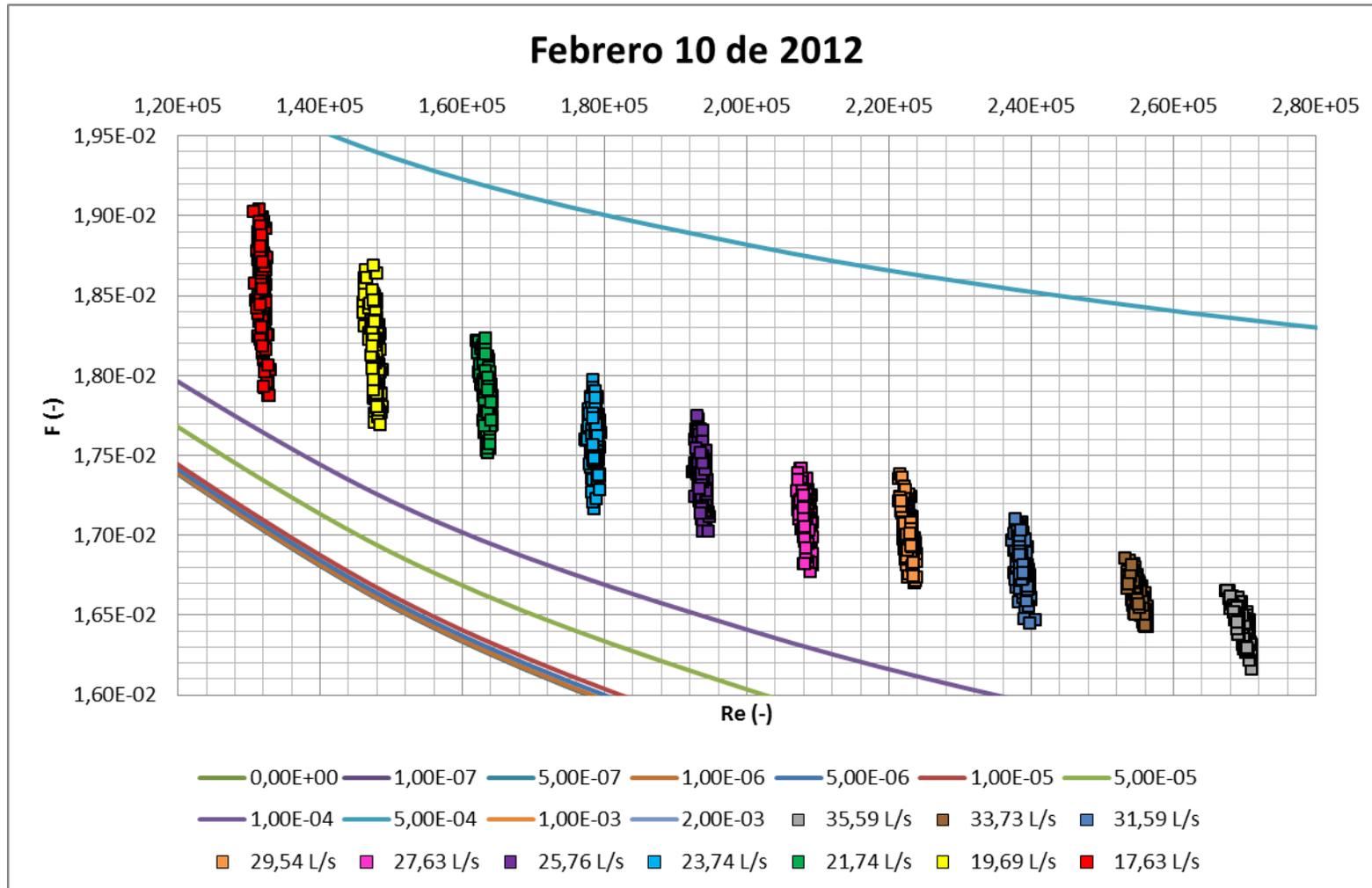


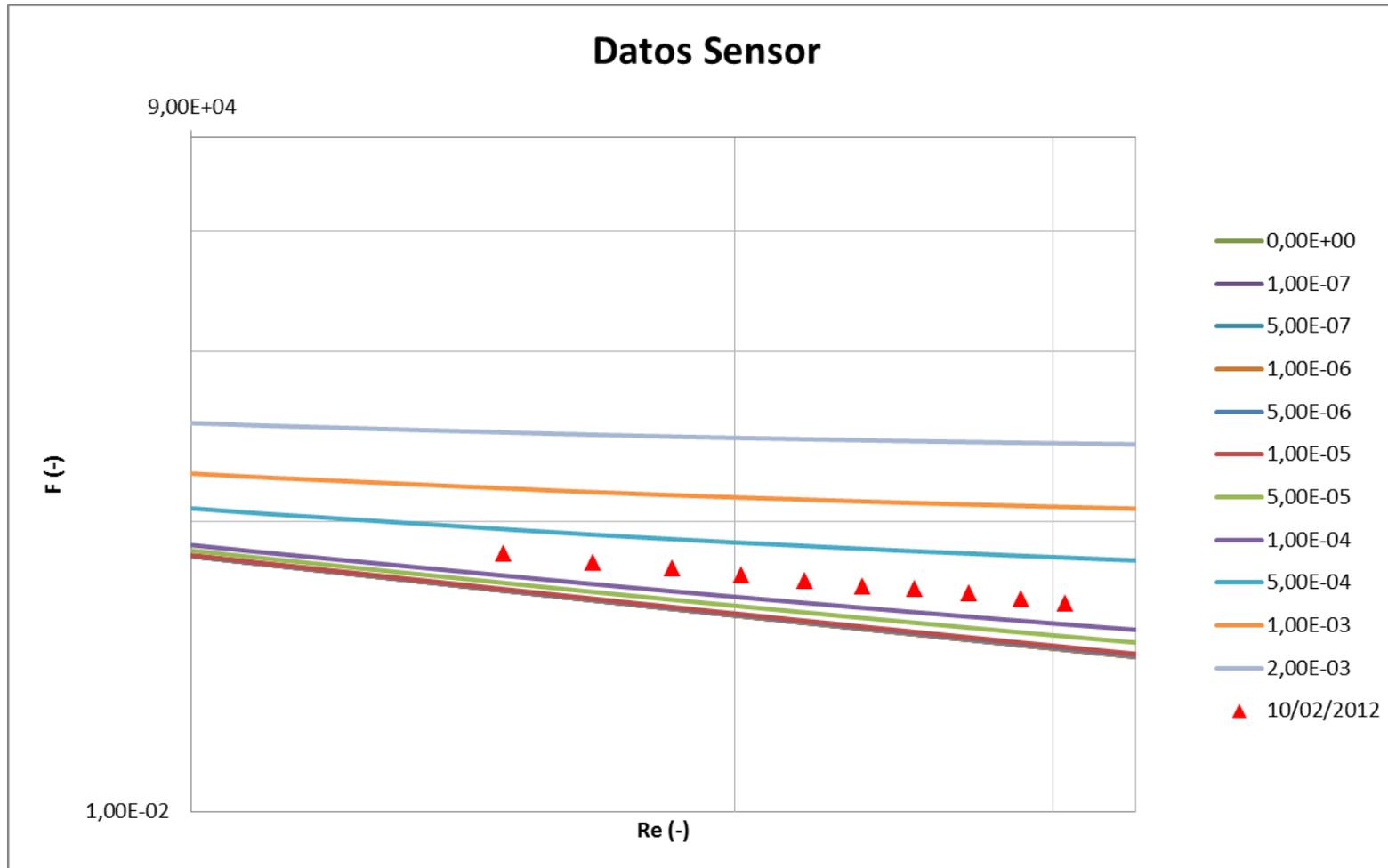


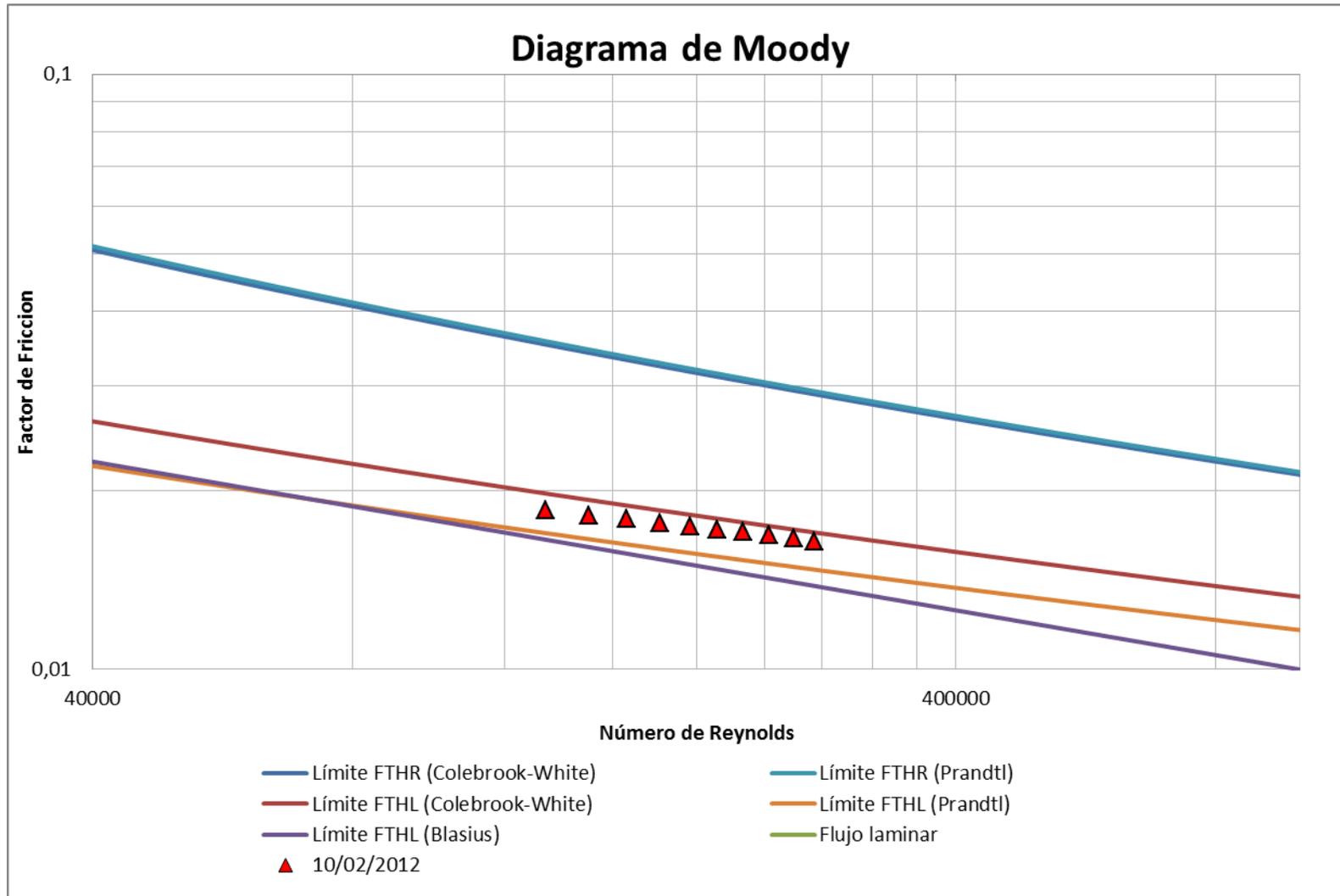


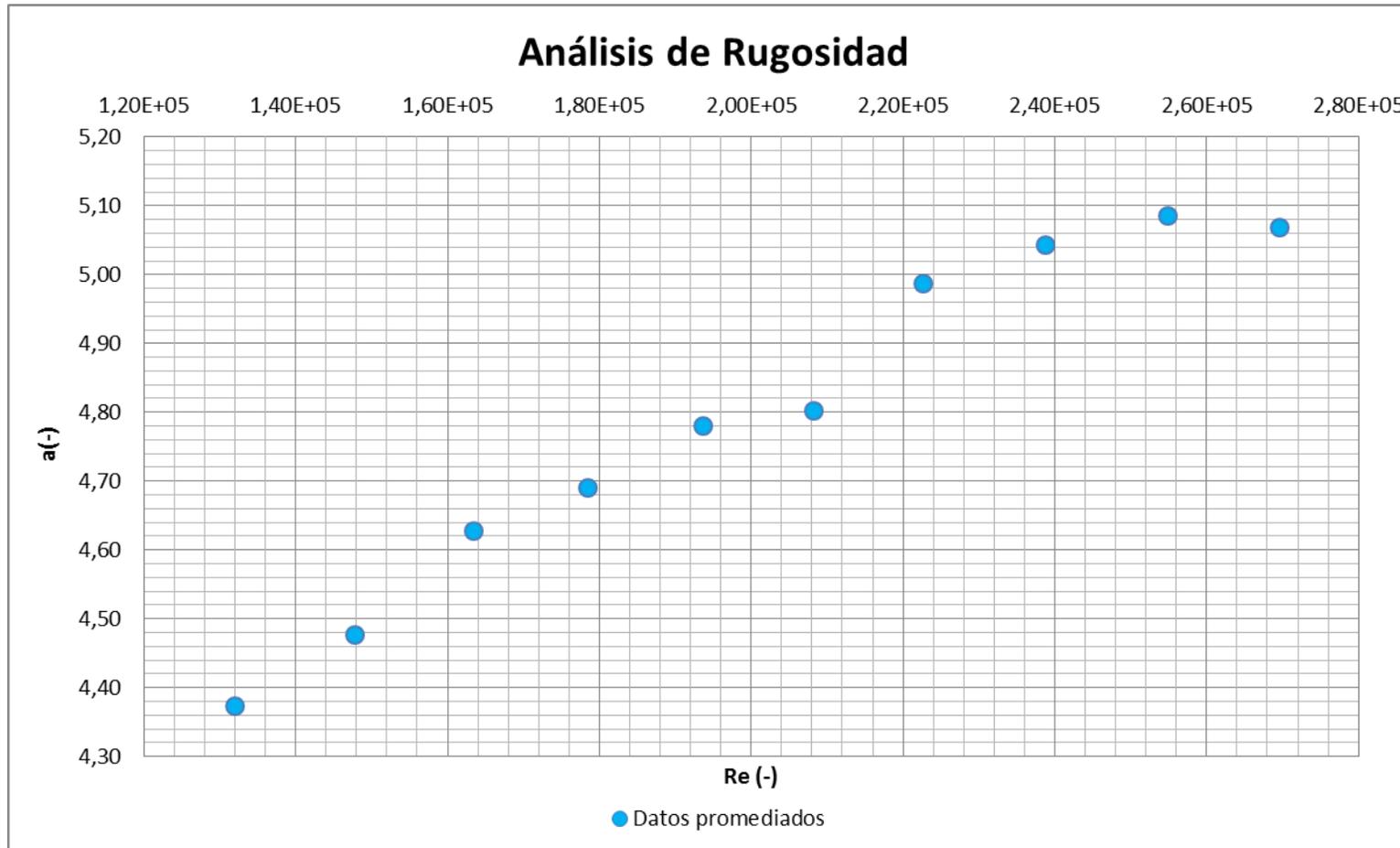
**Semana 2: Febrero 10 de 2012**

Febrero 10 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
35,59 L/s	0,0162	267387,03	0,0166	271079,42	0,0164	269617,07	0,0316	5,06885	0,0000E+00
33,73 L/s	0,0164	256396,02	0,0169	256396,02	0,0166	254942,80	0,0335	5,08517	0,0000E+00
31,59 L/s	0,0164	237361,91	0,0171	240619,11	0,0168	238710,71	0,0349	5,04243	0,0000E+00
29,54 L/s	0,0167	221470,78	0,0174	223943,33	0,0170	222717,65	0,0363	4,98704	0,0000E+00
27,63 L/s	0,0168	207121,34	0,0174	209358,24	0,0171	208293,87	0,0353	4,80190	0,0000E+00
25,76 L/s	0,0170	192472,85	0,0177	194799,48	0,0174	193700,91	0,0374	4,78039	0,0000E+00
23,74 L/s	0,0172	177384,44	0,0180	179483,73	0,0176	178536,75	0,0384	4,69068	0,0000E+00
21,74 L/s	0,0175	162049,91	0,0182	164251,14	0,0179	163496,07	0,0403	4,62719	0,0000E+00
19,69 L/s	0,0177	146192,54	0,0187	148850,81	0,0181	147742,58	0,0405	4,47679	0,0000E+00
17,63 L/s	0,0179	130656,04	0,0190	133044,93	0,0185	131930,95	0,0421	4,37392	0,0000E+00



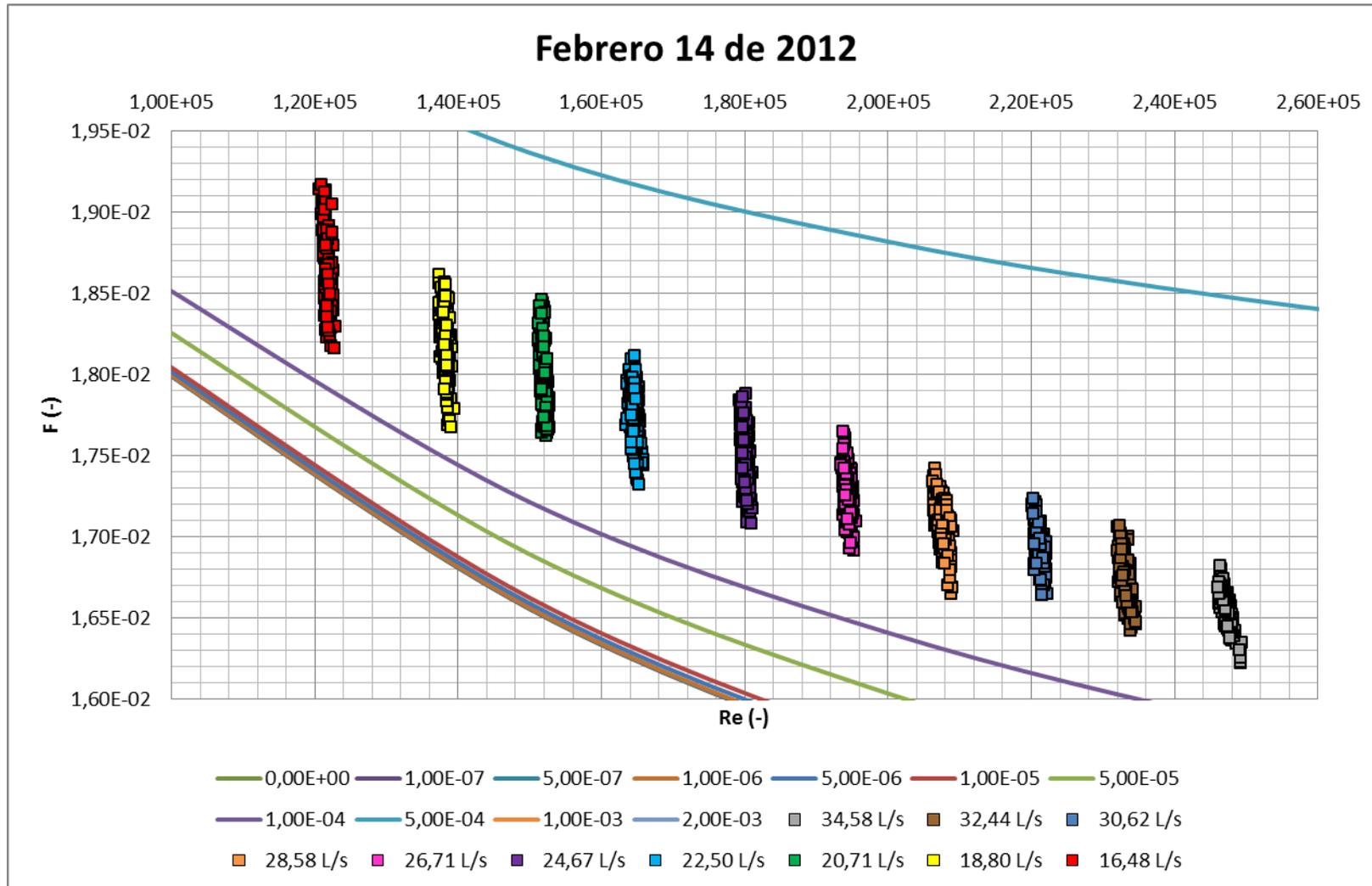


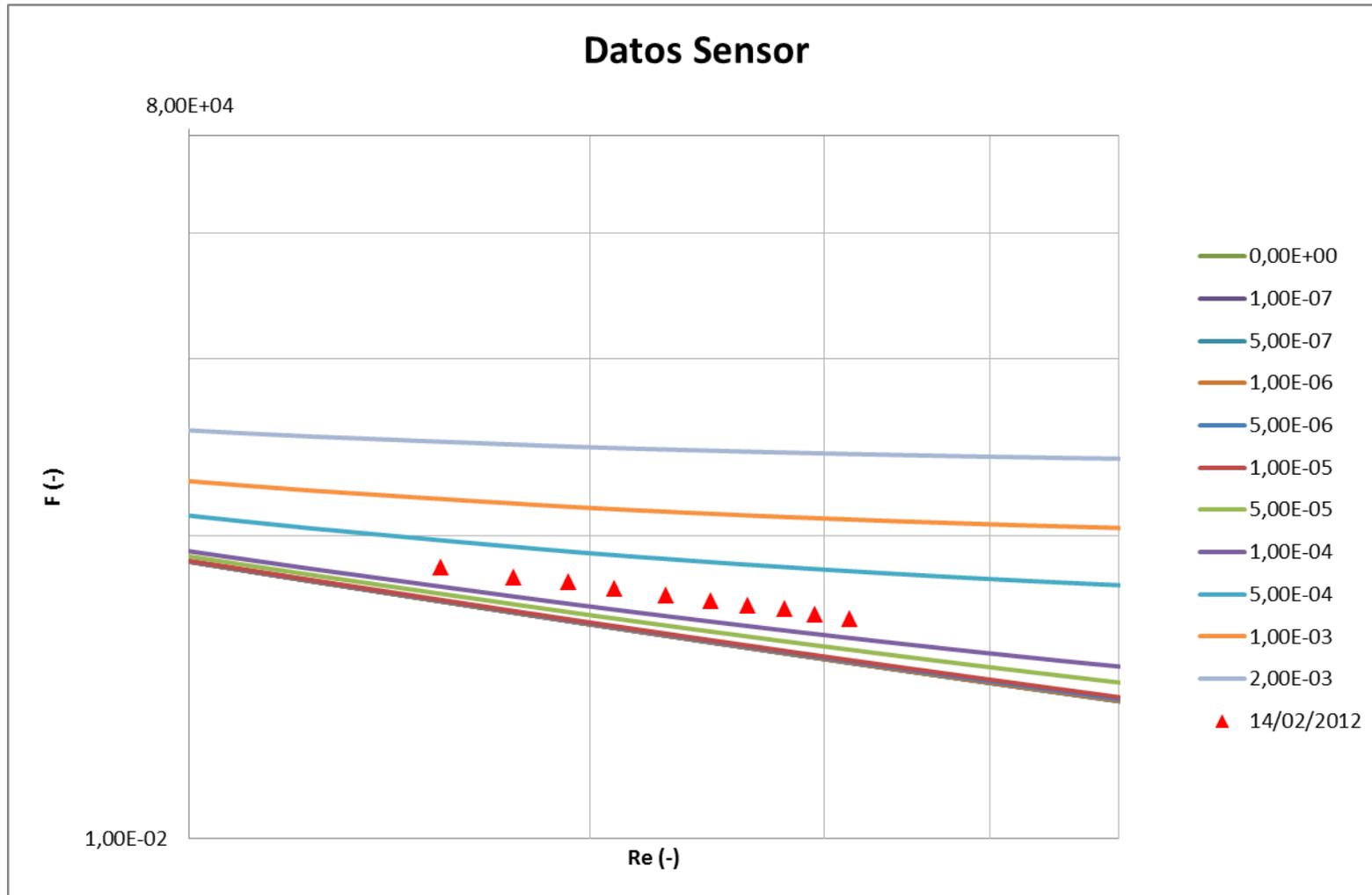


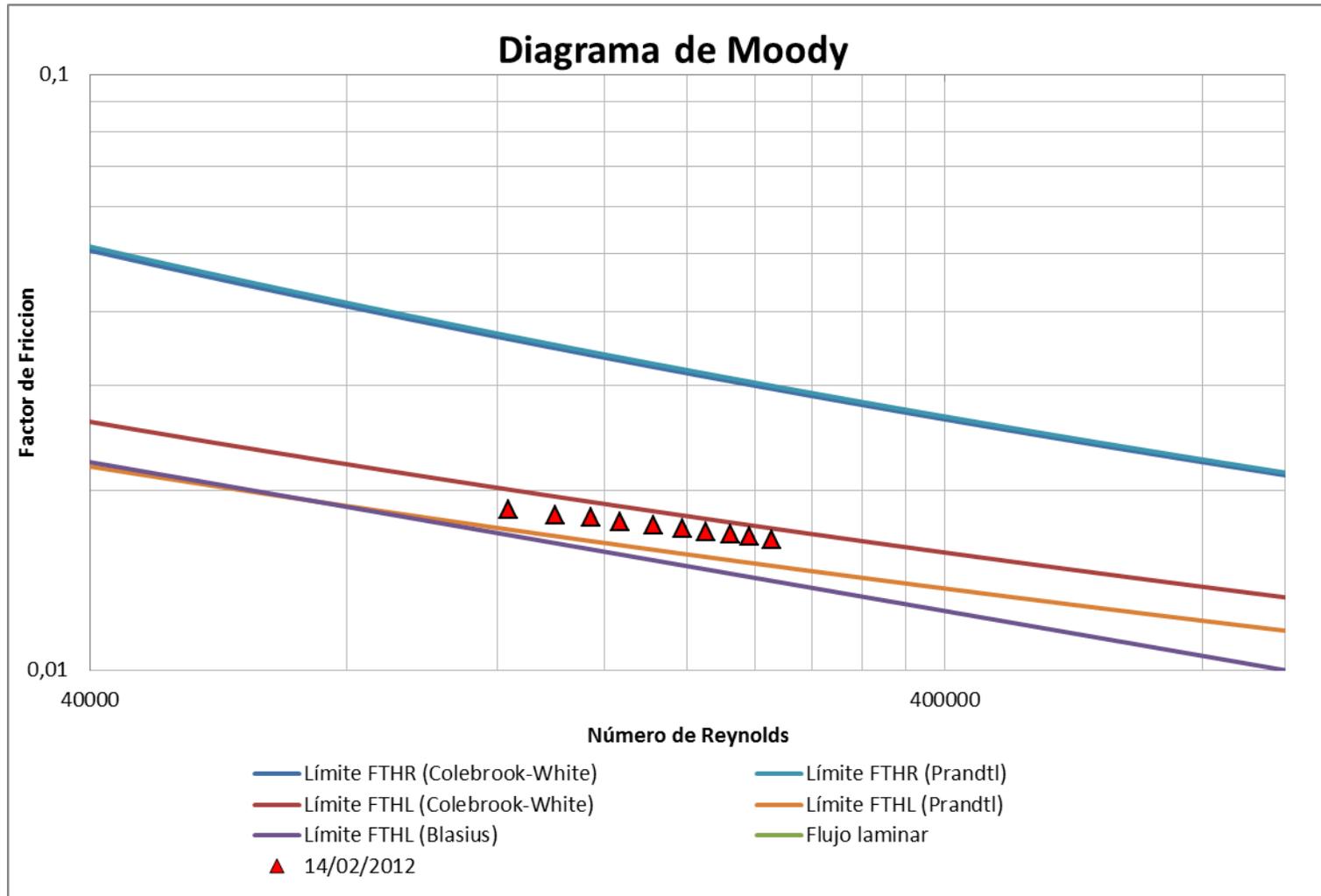


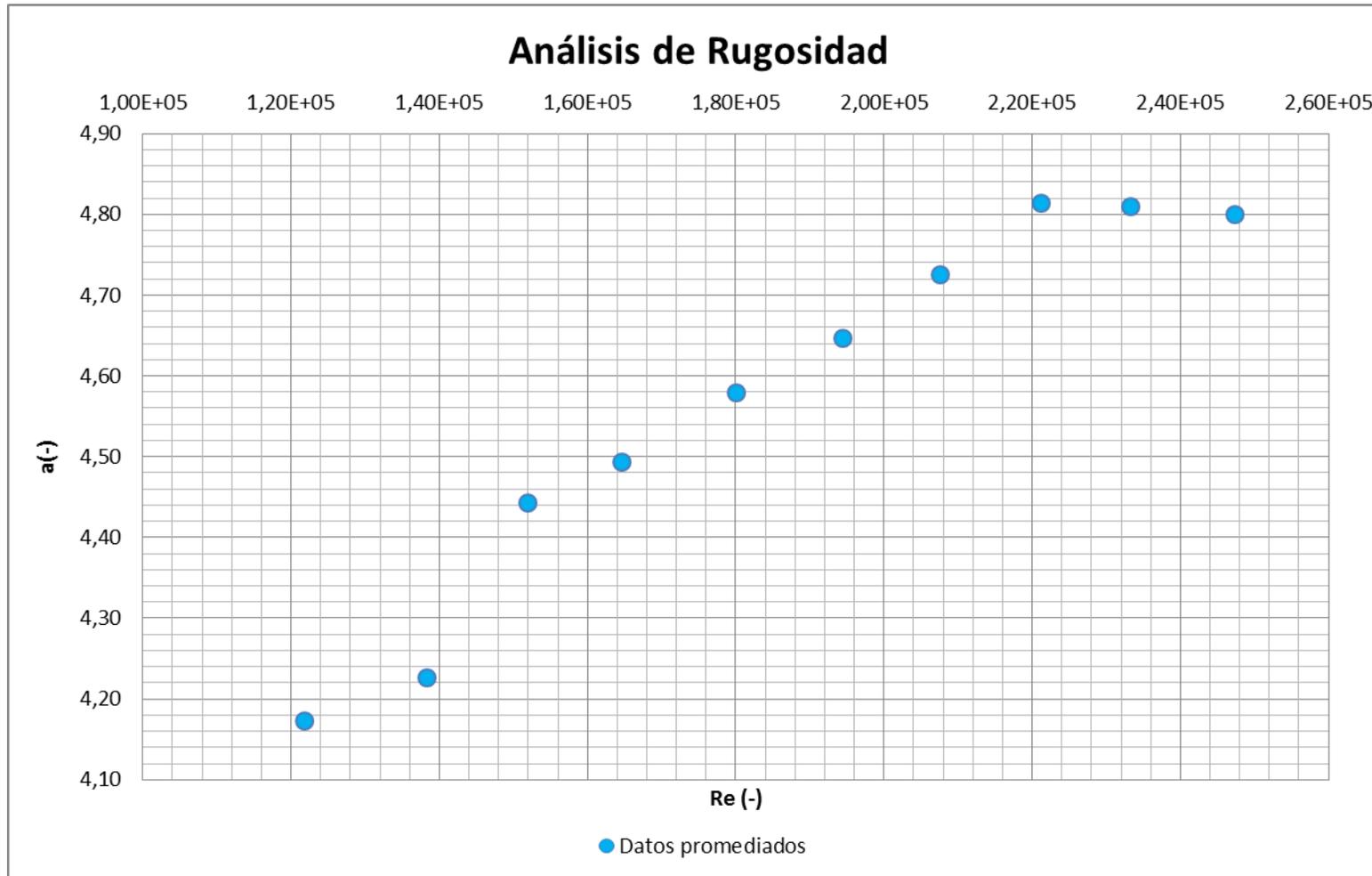
**Semana 3: Febrero 14 de 2012**

Febrero 14 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
34,58 L/s	0,0162	246045,04	0,0168	249379,72	0,0165	247390,14	0,0300	4,80028	-8,0662E-20
32,44 L/s	0,0164	234692,07	0,0171	234692,07	0,0167	233256,25	0,0319	4,80970	0,0000E+00
30,62 L/s	0,0166	220133,25	0,0172	222210,31	0,0169	221286,94	0,0336	4,81312	0,0000E+00
28,58 L/s	0,0167	206343,64	0,0174	209086,51	0,0171	207602,01	0,0340	4,72535	0,0000E+00
26,71 L/s	0,0169	193430,16	0,0176	195498,90	0,0173	194478,51	0,0346	4,64637	0,0000E+00
24,67 L/s	0,0171	179295,08	0,0179	181072,75	0,0175	180132,14	0,0358	4,57878	0,0000E+00
22,50 L/s	0,0173	163505,22	0,0181	165898,05	0,0177	164676,68	0,0370	4,49327	0,0000E+00
20,71 L/s	0,0176	151187,60	0,0185	152798,74	0,0180	151967,45	0,0386	4,44253	0,0000E+00
18,80 L/s	0,0177	137308,05	0,0186	139450,65	0,0182	138267,45	0,0364	4,22679	0,0000E+00
16,48 L/s	0,0182	120674,16	0,0192	122846,79	0,0186	121828,51	0,0393	4,17272	0,0000E+00



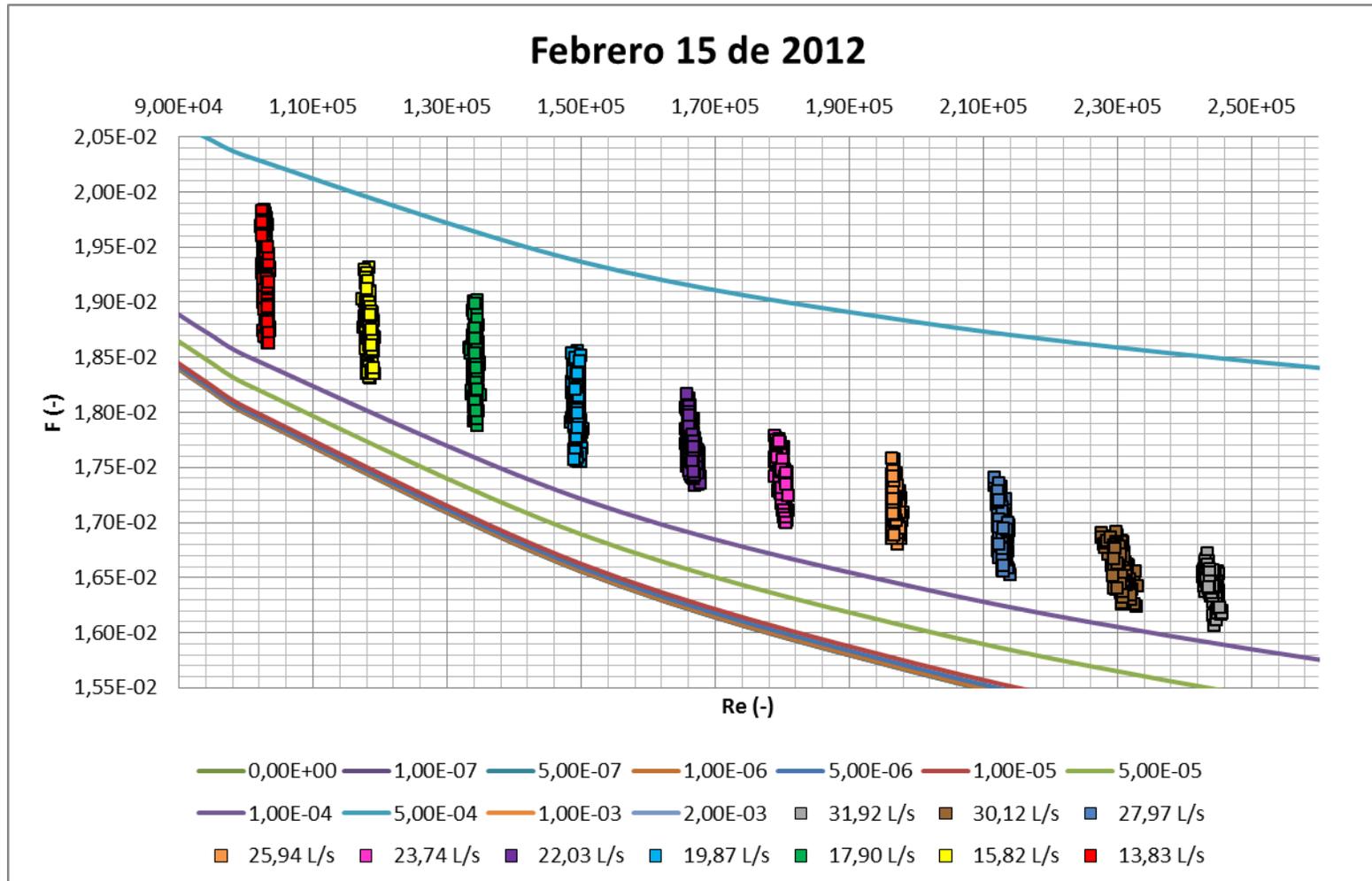


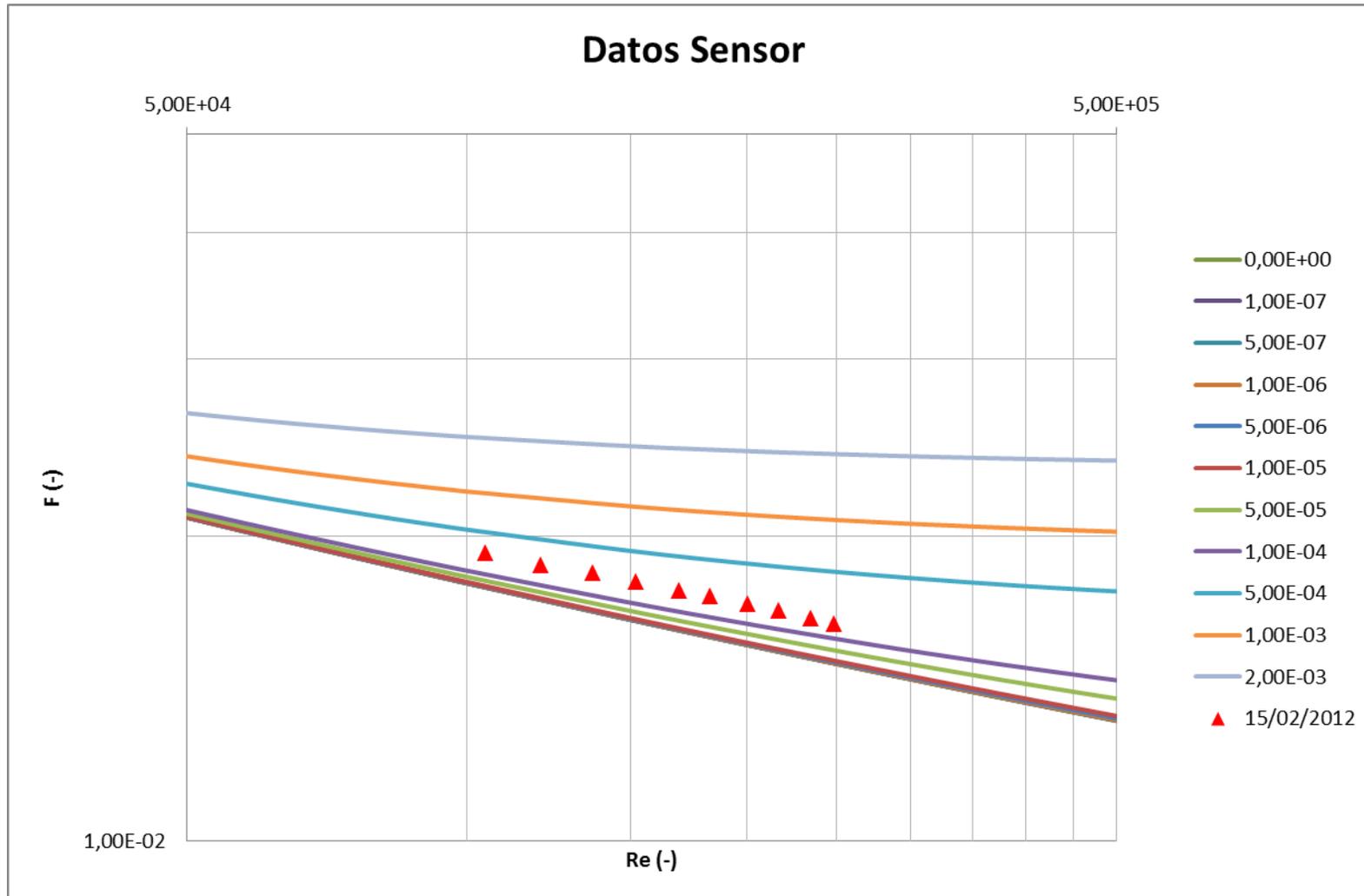


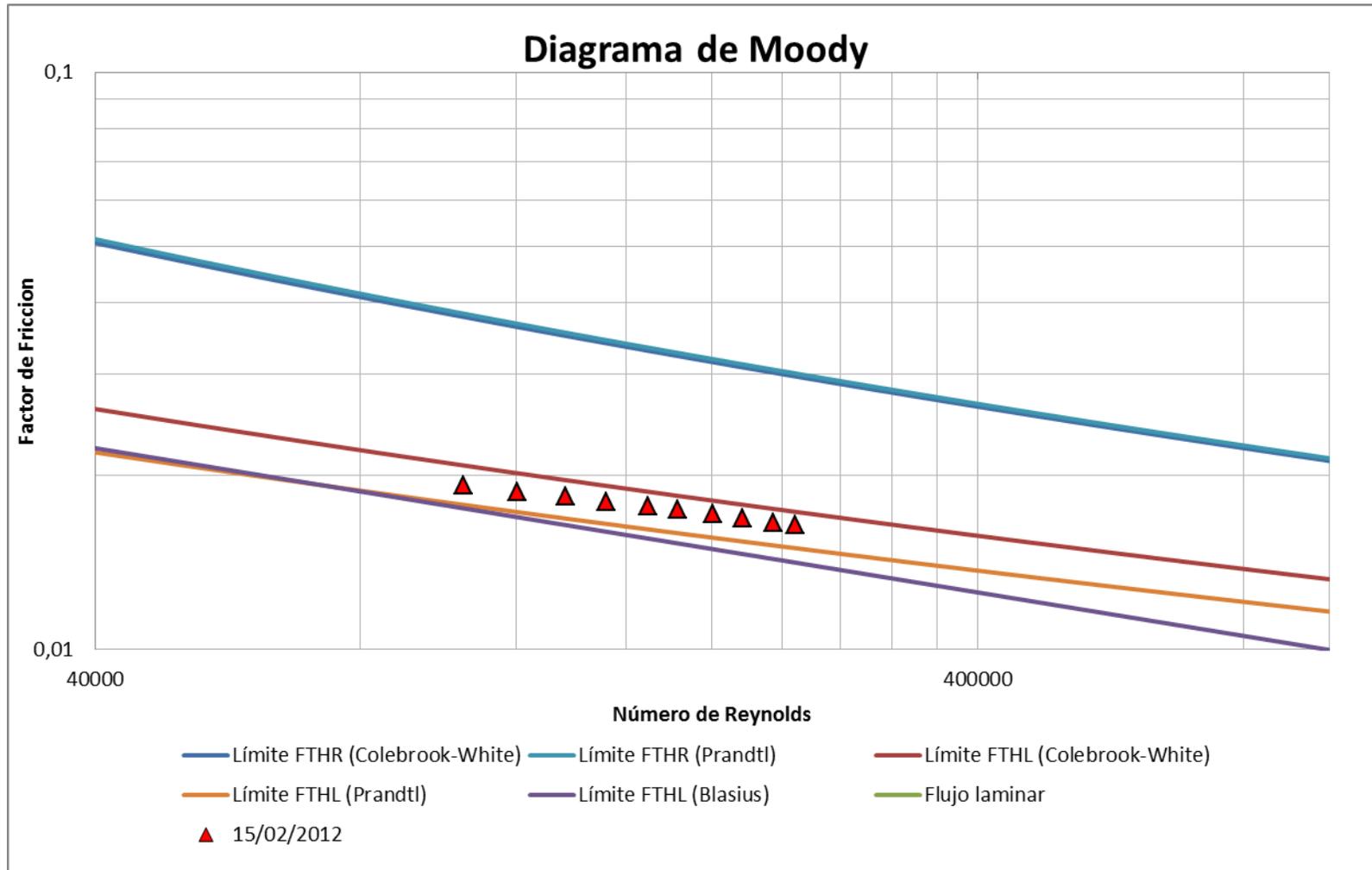


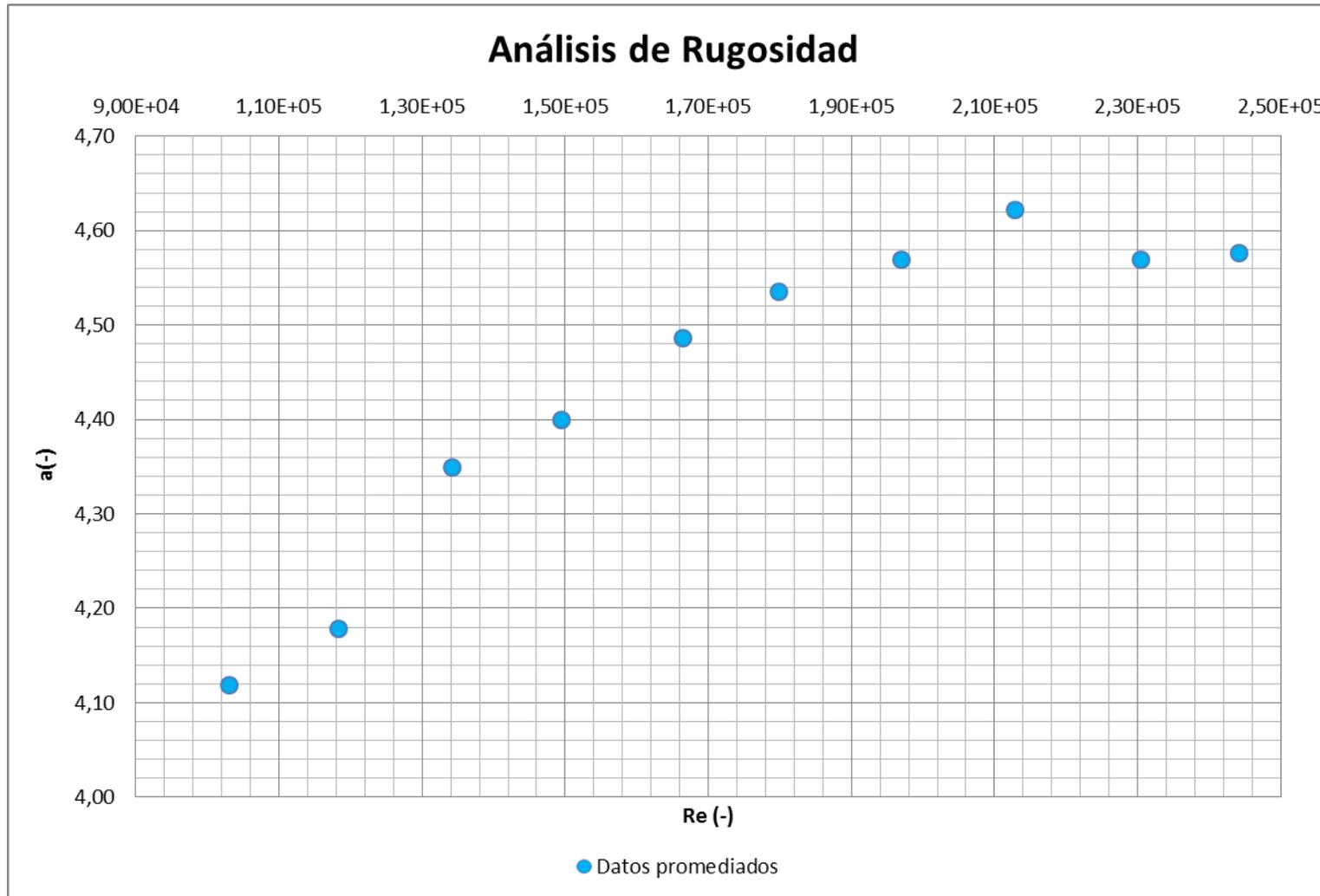
**Semana 3: Febrero 15 de 2012**

Febrero 15 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
31,92 L/s	0,0161	242783,35	0,0167	245633,43	0,0164	244208,96	0,0268	4,57632	-8,0662E-20
30,12 L/s	0,0162	233081,18	0,0169	233081,18	0,0166	230395,25	0,0282	4,56914	0,0000E+00
27,97 L/s	0,0165	211700,93	0,0174	214023,19	0,0169	212892,27	0,0314	4,62239	0,0000E+00
25,94 L/s	0,0168	196361,08	0,0176	198086,68	0,0172	196997,77	0,0327	4,56954	0,0000E+00
23,74 L/s	0,0170	178930,00	0,0178	181016,42	0,0175	179881,73	0,0349	4,53499	0,0000E+00
22,03 L/s	0,0173	165669,07	0,0182	167836,06	0,0177	166490,53	0,0364	4,48600	0,0000E+00
19,87 L/s	0,0176	148495,17	0,0186	150366,26	0,0180	149397,45	0,0381	4,39950	0,0000E+00
17,90 L/s	0,0179	133419,44	0,0190	134999,22	0,0184	134275,05	0,0407	4,34893	0,0000E+00
15,82 L/s	0,0183	117446,82	0,0193	119304,68	0,0187	118381,83	0,0406	4,17784	0,0000E+00
13,83 L/s	0,0186	102294,86	0,0198	103623,86	0,0193	102980,75	0,0441	4,11863	0,0000E+00



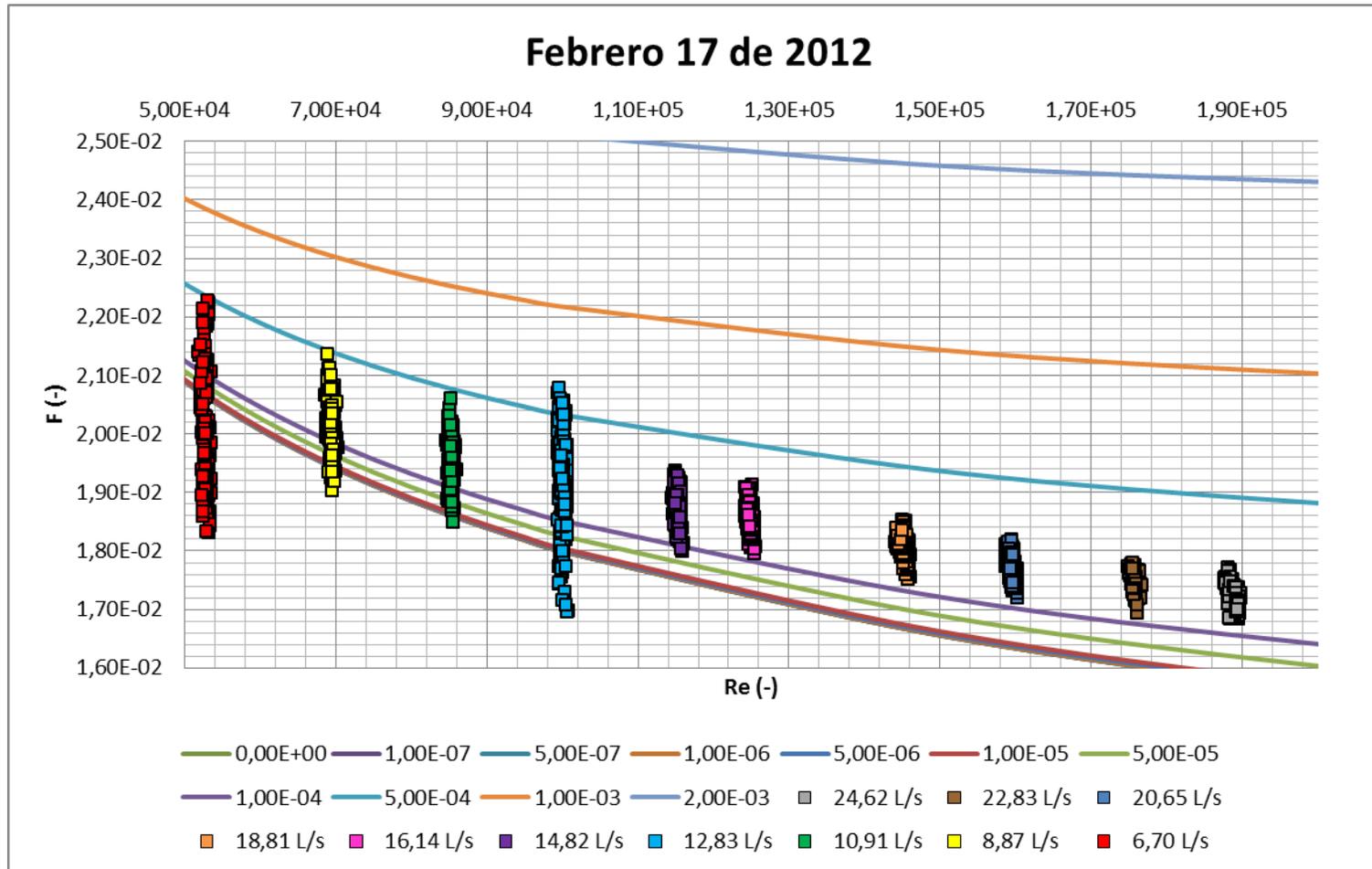


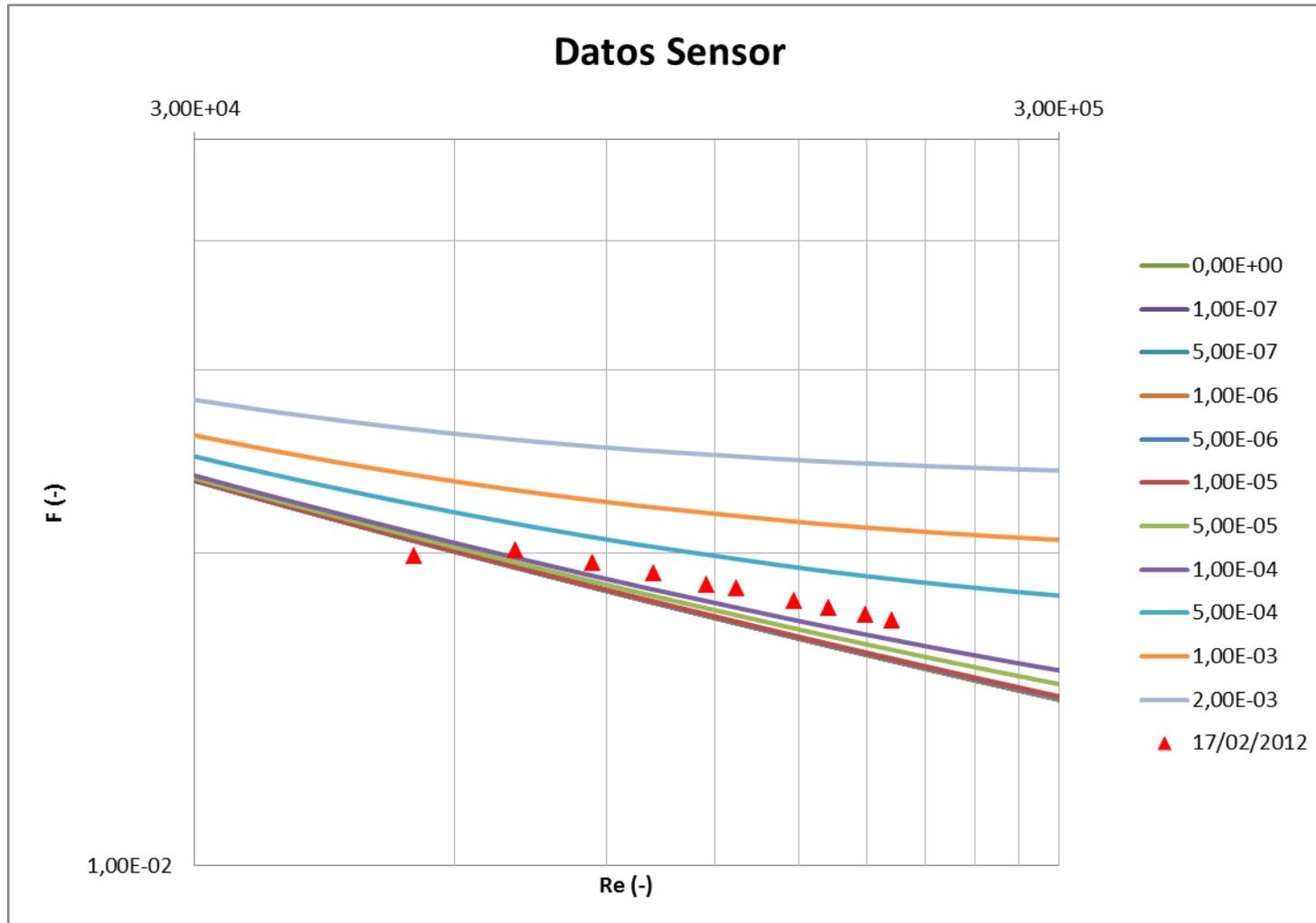


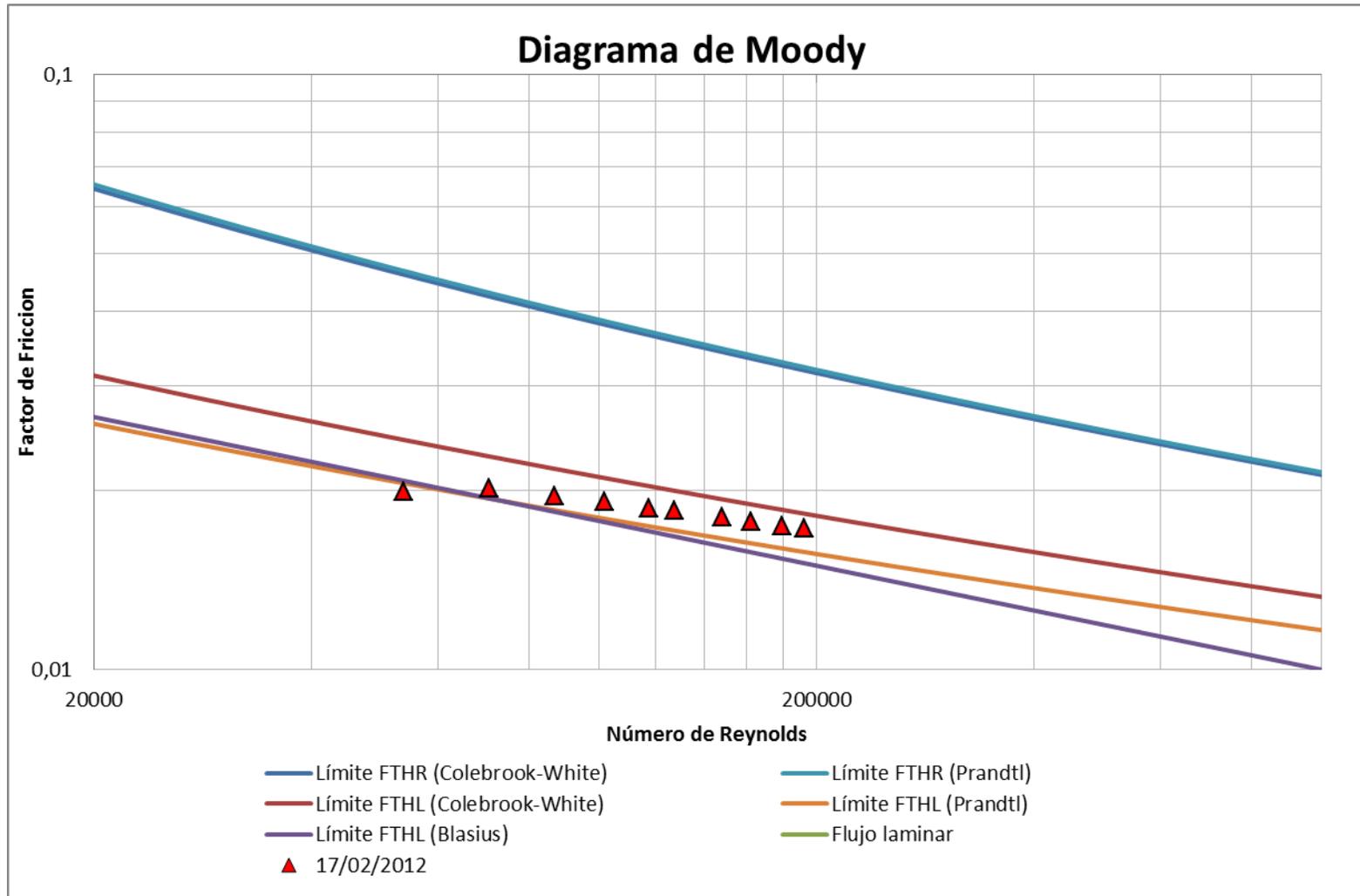


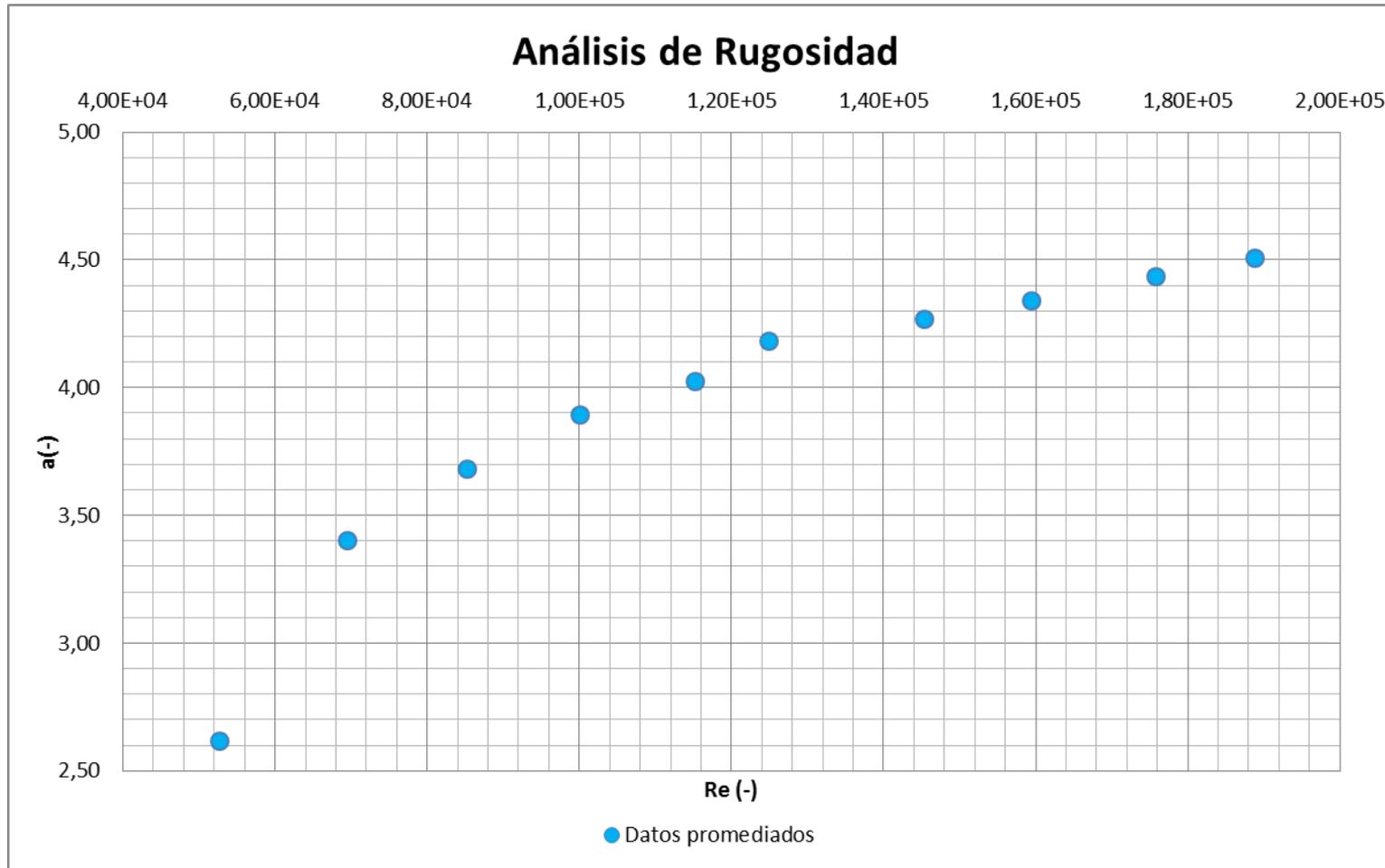
**Semana 3: Febrero 17 de 2012**

Febrero 17 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
24,62 L/s	0,0168	187681,57	0,0177	189816,90	0,0173	188761,47	0,0328	4,50844	2,1285E-01
22,83 L/s	0,0169	176752,51	0,0178	176752,51	0,0175	175885,12	0,0334	4,43272	0,0000E+00
20,65 L/s	0,0172	158726,46	0,0182	160291,40	0,0177	159476,94	0,0345	4,33969	0,0000E+00
18,81 L/s	0,0175	144166,99	0,0185	146071,77	0,0180	145324,21	0,0358	4,26851	0,0000E+00
16,14 L/s	0,0180	124181,39	0,0191	125592,80	0,0185	124955,81	0,0387	4,18175	0,0000E+00
14,82 L/s	0,0180	114572,76	0,0194	116124,94	0,0187	115291,13	0,0366	4,02234	0,0000E+00
12,83 L/s	0,0170	99409,36	0,0208	100787,71	0,0191	100081,93	0,0367	3,89296	0,0000E+00
10,91 L/s	0,0185	84652,13	0,0206	85978,44	0,0196	85285,13	0,0341	3,68142	0,0000E+00
8,87 L/s	0,0190	68694,40	0,0213	70306,57	0,0201	69471,86	0,0269	3,40058	0,0000E+00
6,70 L/s	0,0183	51893,45	0,0223	53539,01	0,0201	52773,06	-0,0196	2,61452	



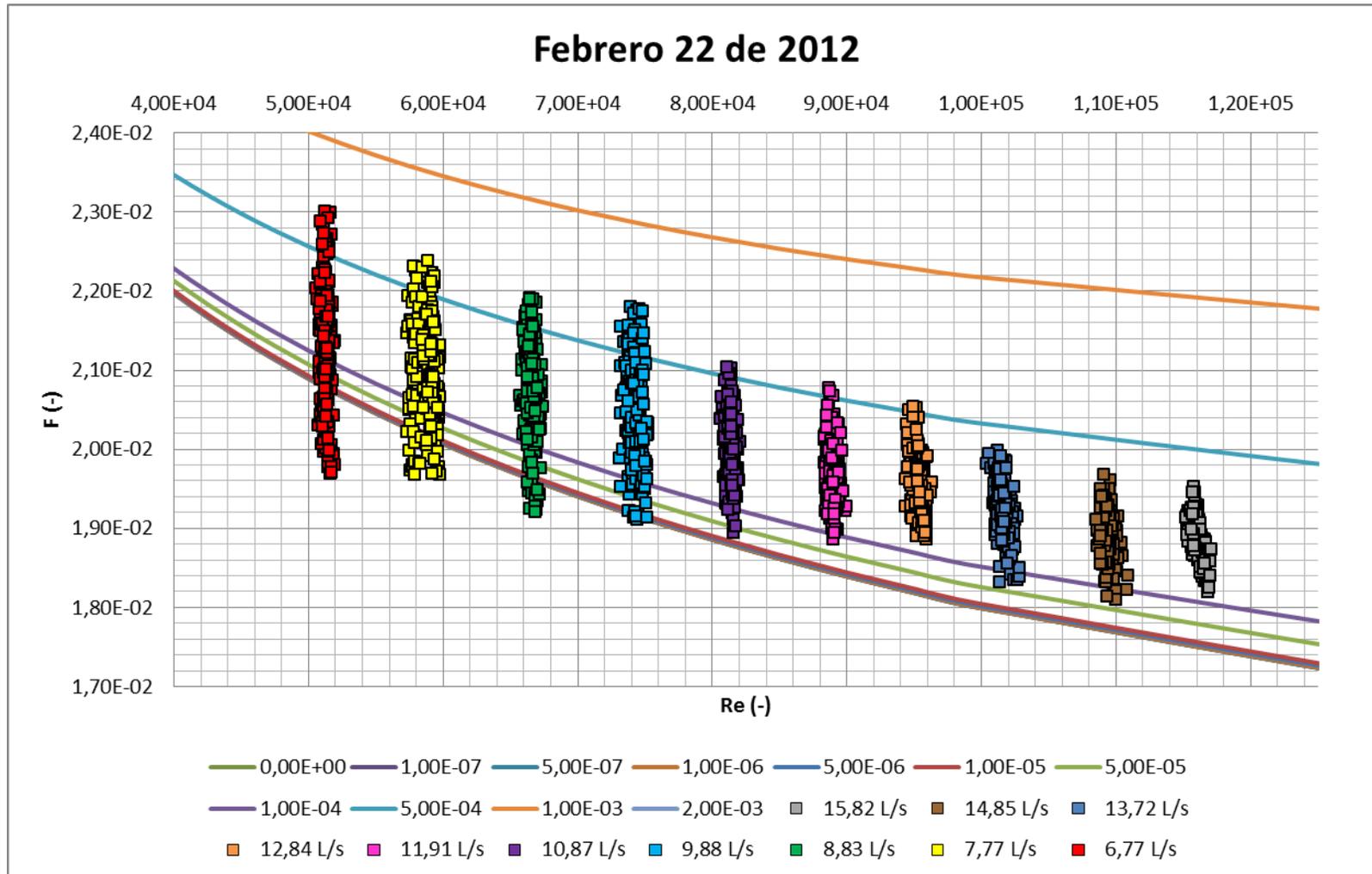


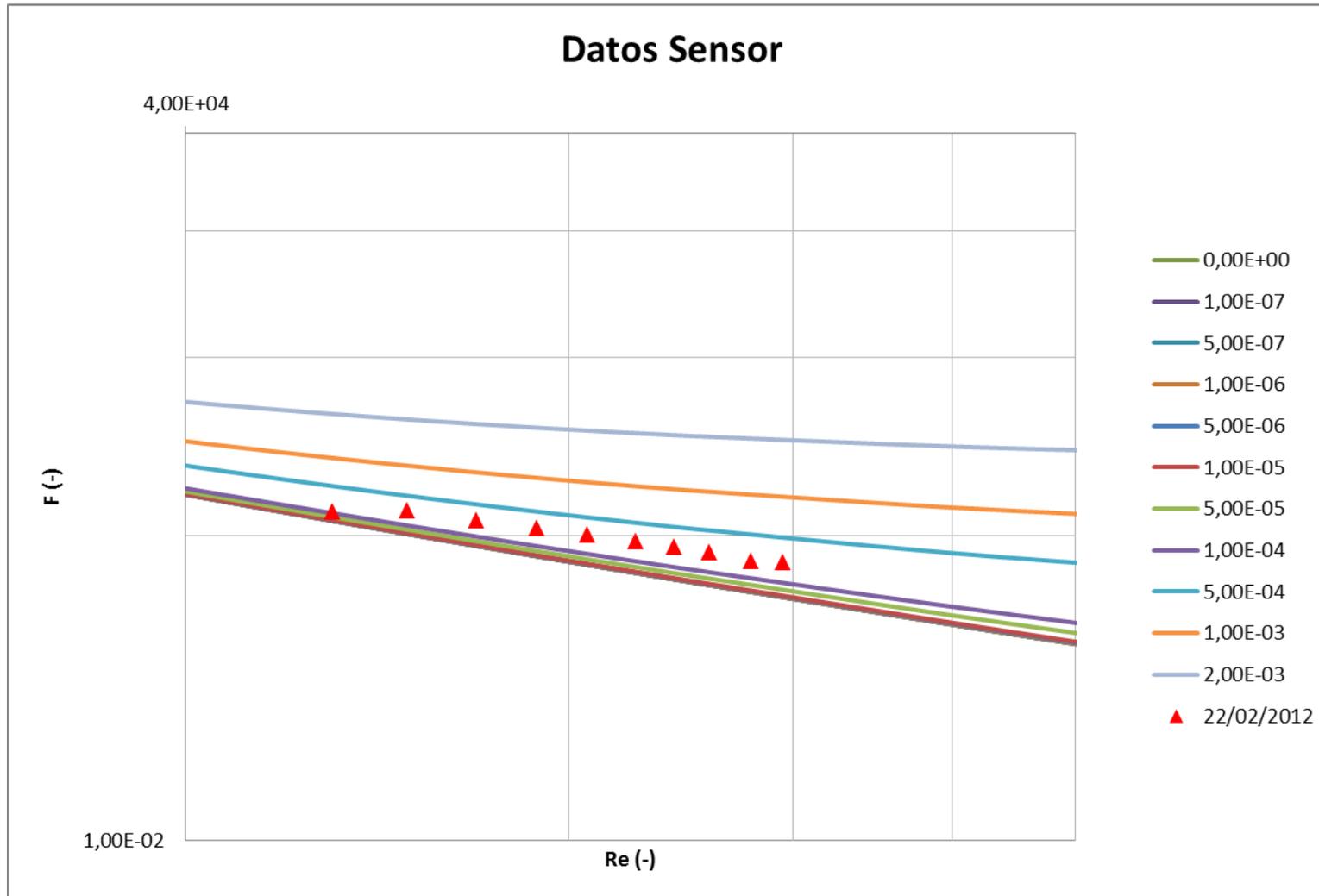


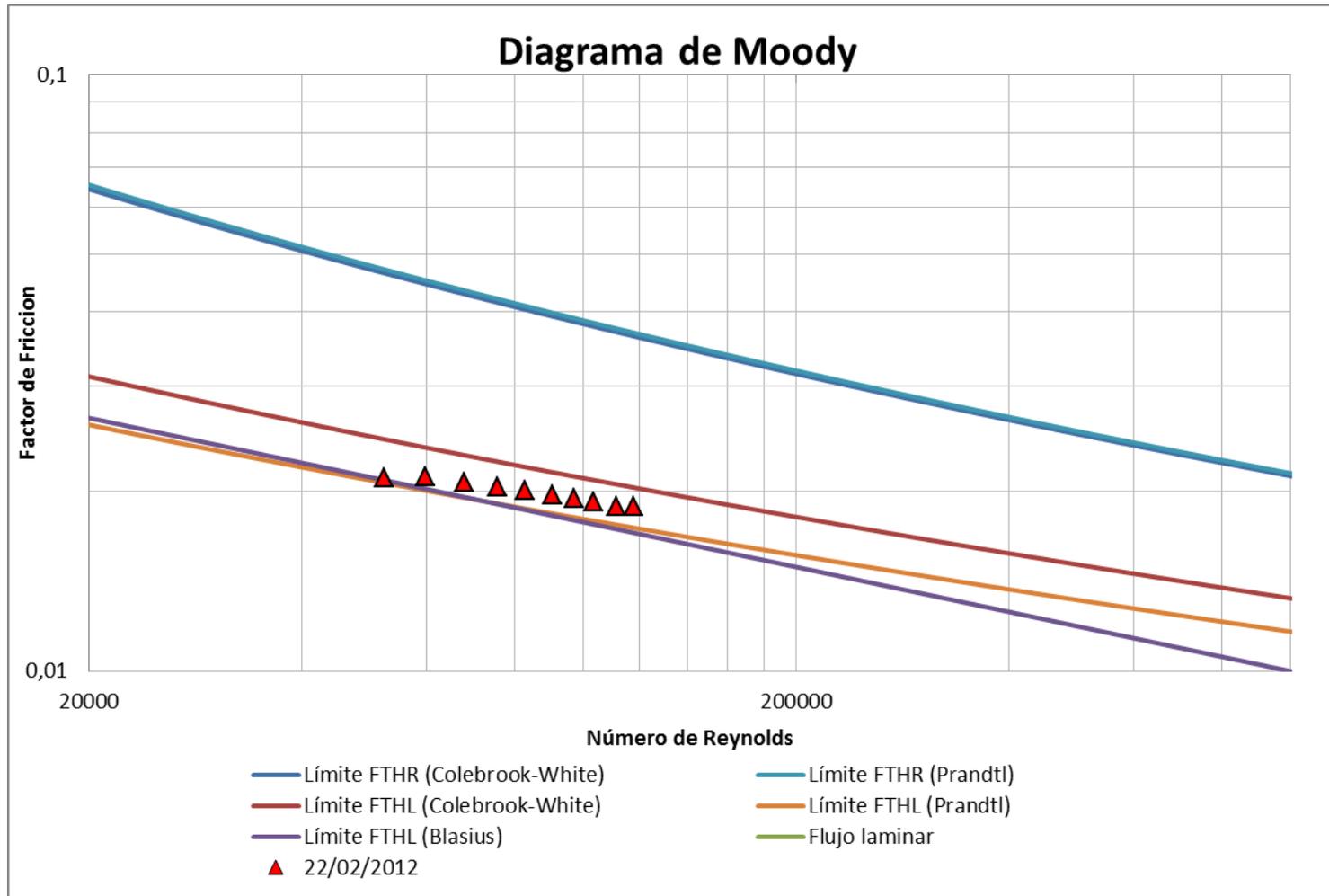


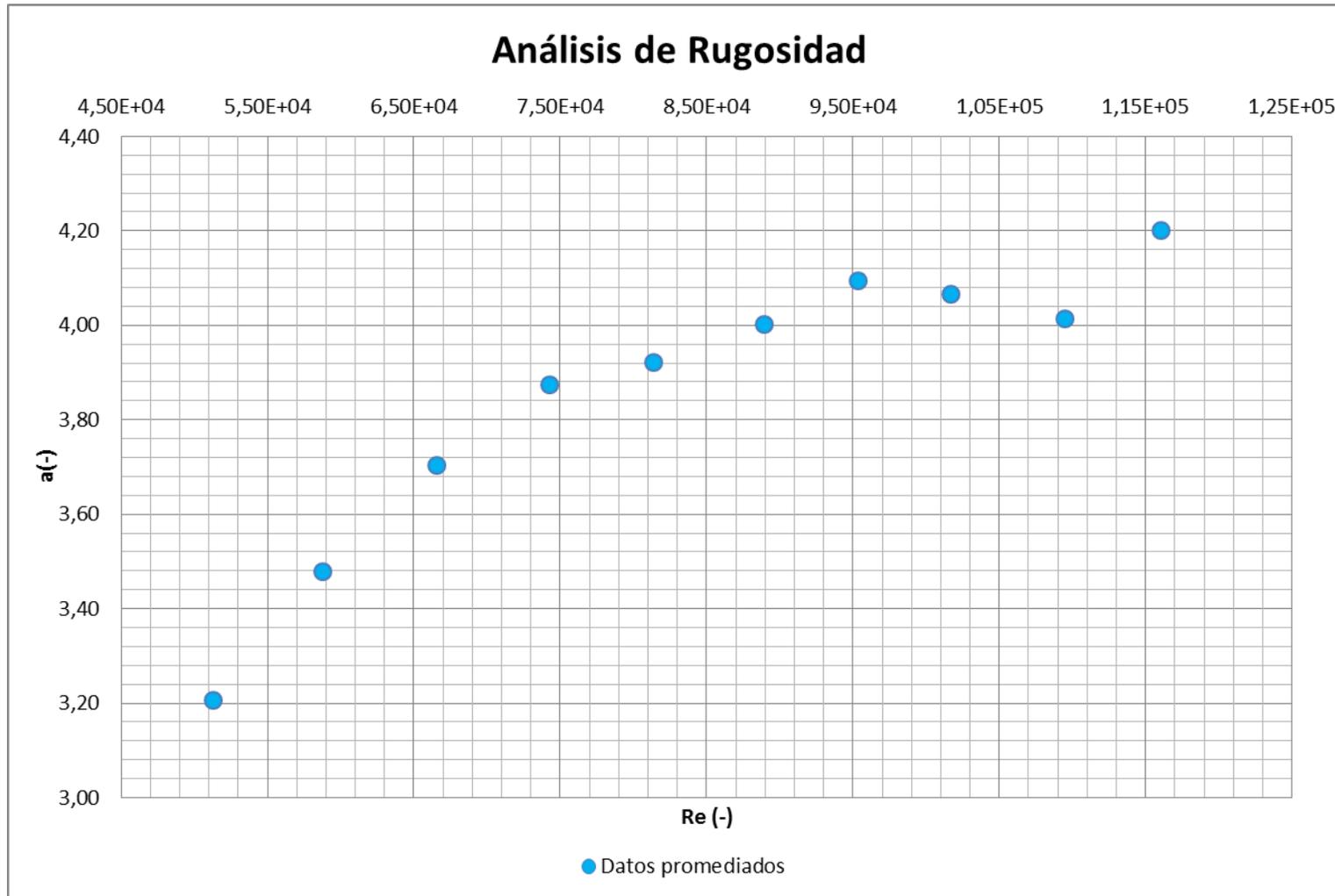
**Semana 4: Febrero 22 de 2012**

Febrero 22 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
15,82 L/s	0,0182	115217,90	0,0195	117055,51	0,0188	116089,28	0,0421	4,20199	3,3119E-01
14,85 L/s	0,0181	110930,79	0,0197	110930,79	0,0189	109492,14	0,0381	4,01305	0,0000E+00
13,72 L/s	0,0183	100442,17	0,0200	102863,92	0,0193	101659,13	0,0427	4,06491	0,0000E+00
12,84 L/s	0,0189	94393,55	0,0205	96339,81	0,0196	95379,42	0,0465	4,09527	0,0000E+00
11,91 L/s	0,0189	88377,95	0,0208	89946,72	0,0198	88931,41	0,0459	4,00237	0,0000E+00
10,87 L/s	0,0189	80613,04	0,0210	82044,12	0,0201	81381,94	0,0463	3,92070	0,0000E+00
9,88 L/s	0,0191	73154,65	0,0218	75260,06	0,0204	74300,66	0,0481	3,87444	0,0000E+00
8,83 L/s	0,0192	65751,86	0,0219	67434,16	0,0207	66600,04	0,0442	3,70329	0,0000E+00
7,77 L/s	0,0197	57327,92	0,0224	59814,14	0,0210	58754,35	0,0362	3,47867	0,0000E+00
6,77 L/s	0,0197	50569,11	0,0230	51962,84	0,0212	51282,29	0,0223	3,20516	0,0000E+00



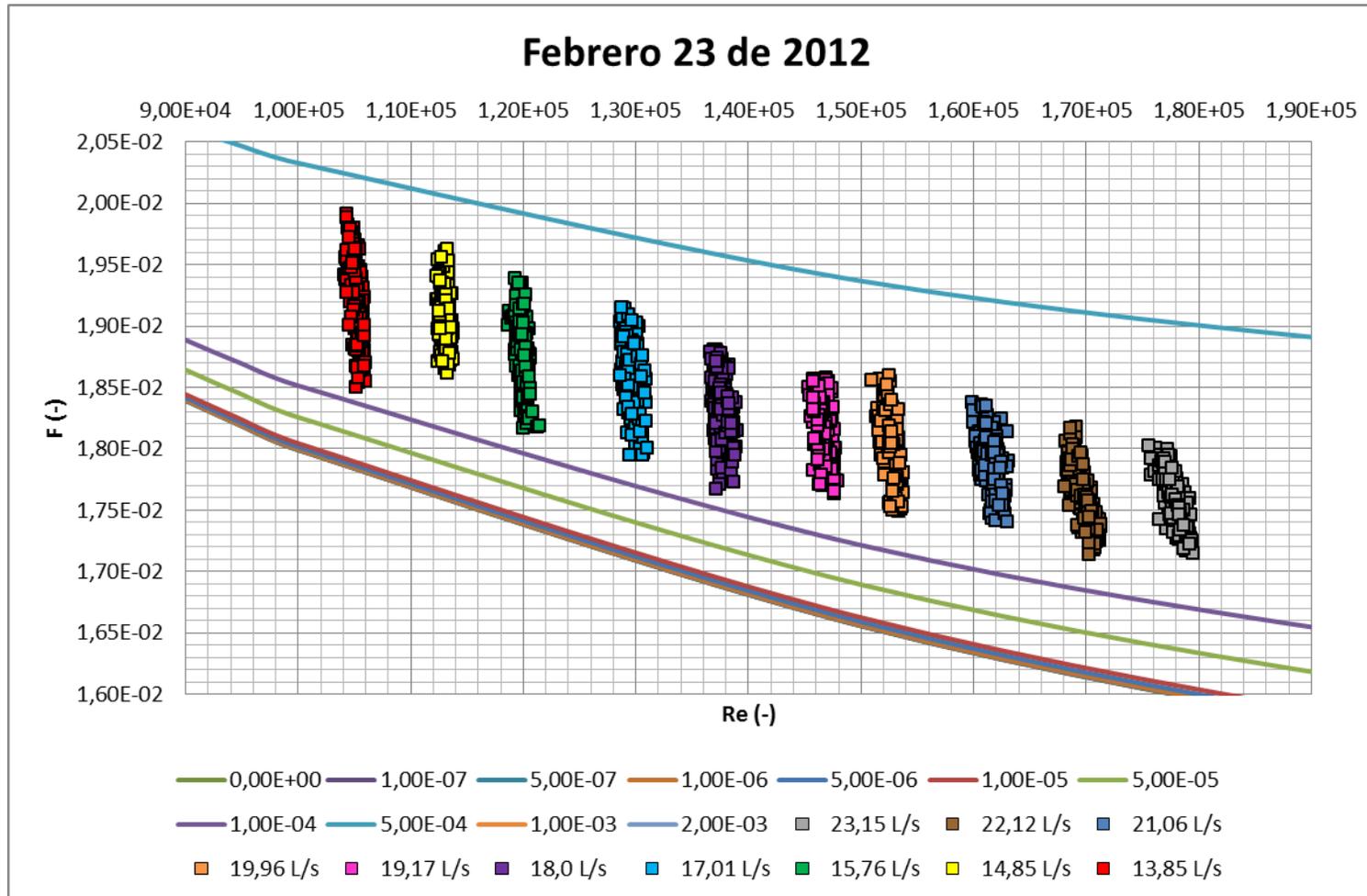


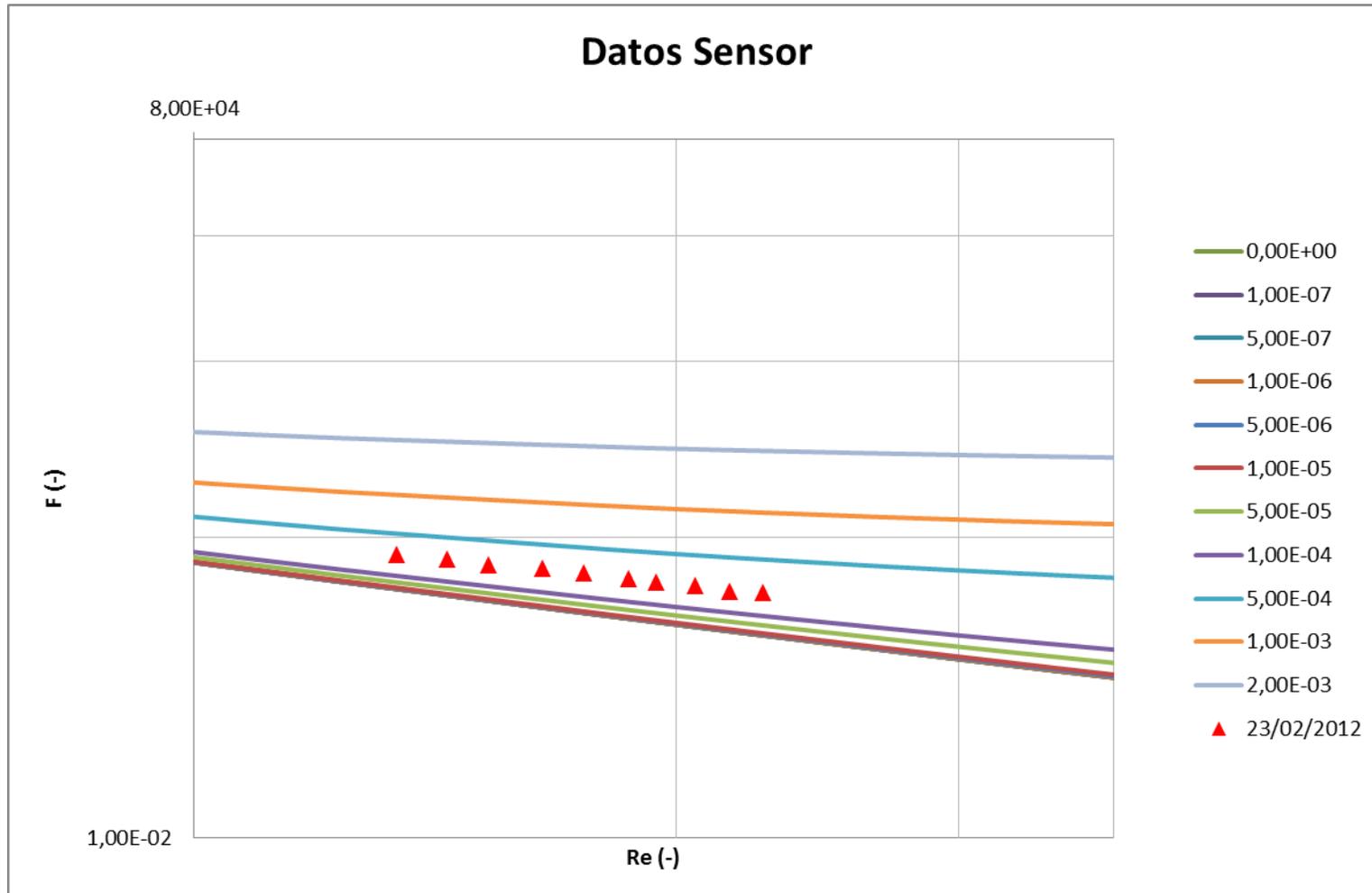


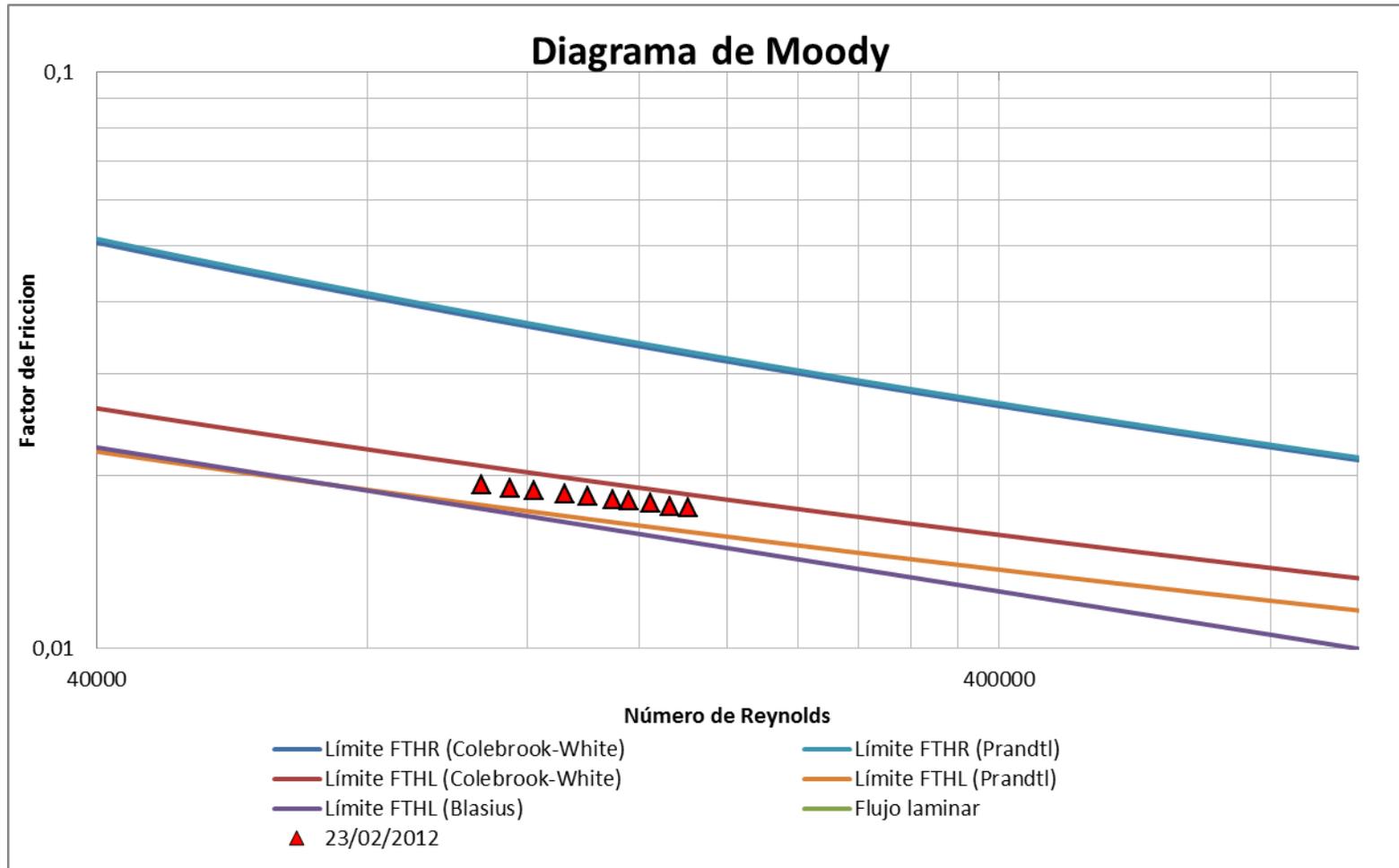


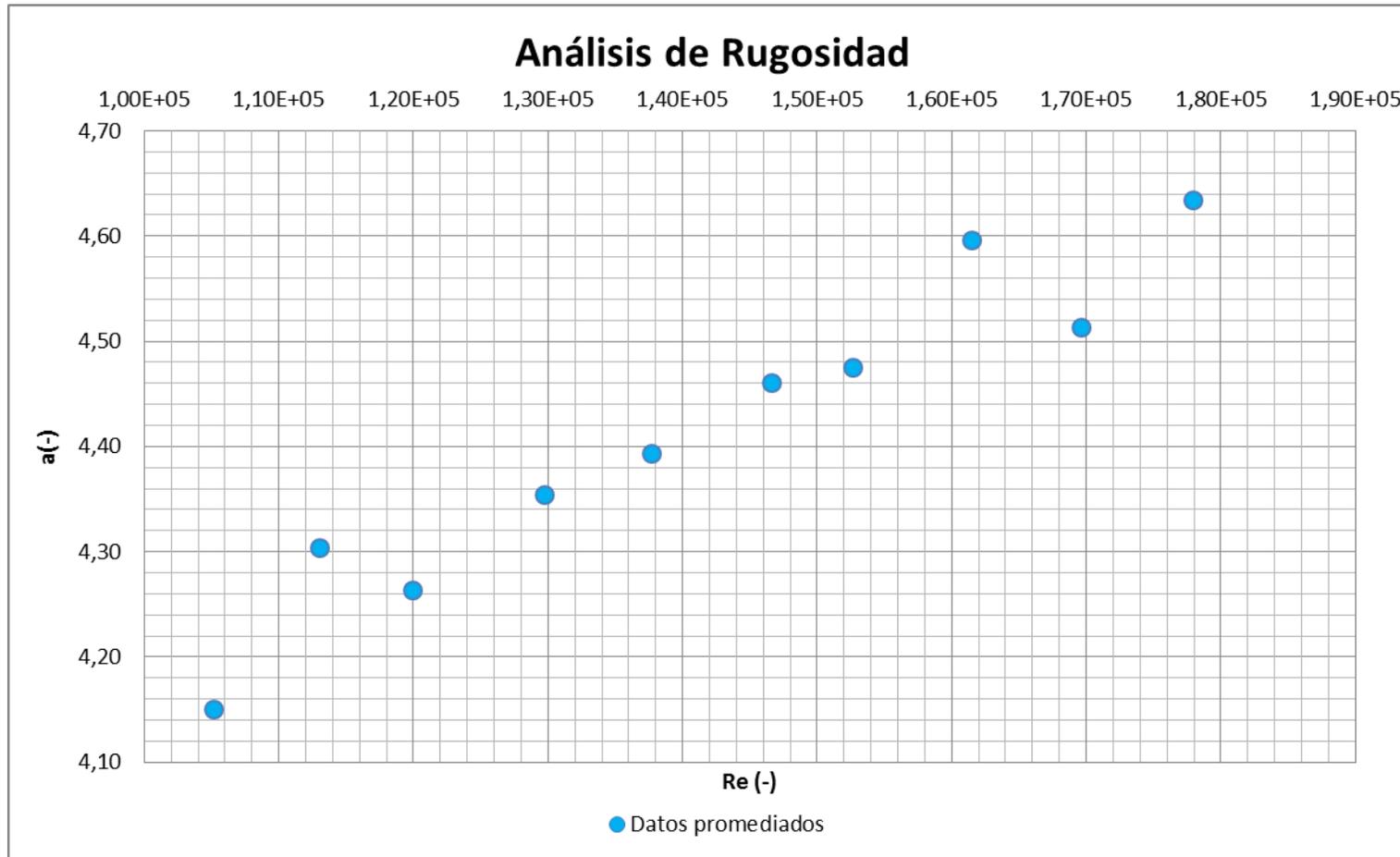
**Semana 4: Febrero 23 de 2012**

Febrero 23 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
23,15 L/s	0,0171	175601,31	0,0180	179511,12	0,0176	177935,16	0,0374	4,63438	-2,4443E-19
22,12 L/s	0,0171	171348,25	0,0182	171348,25	0,0176	169634,22	0,0364	4,51339	0,0000E+00
21,06 L/s	0,0174	159859,07	0,0184	163096,84	0,0179	161468,83	0,0400	4,59531	0,0000E+00
19,96 L/s	0,0175	150964,43	0,0186	153780,17	0,0180	152706,24	0,0392	4,47519	0,0000E+00
19,17 L/s	0,0176	145393,13	0,0186	147974,79	0,0182	146667,19	0,0403	4,45993	0,0000E+00
18,0 L/s	0,0177	136670,27	0,0188	138997,87	0,0183	137675,43	0,0410	4,39286	0,0000E+00
17,01 L/s	0,0179	128627,07	0,0191	131030,92	0,0185	129791,13	0,0422	4,35342	0,0000E+00
15,76 L/s	0,0182	118689,79	0,0194	121442,37	0,0188	119983,92	0,0427	4,26317	0,0000E+00
14,85 L/s	0,0186	112293,62	0,0196	113805,04	0,0191	113085,30	0,0464	4,30334	0,0000E+00
13,85 L/s	0,0185	104148,44	0,0199	106028,77	0,0192	105199,37	0,0444	4,15030	0,0000E+00



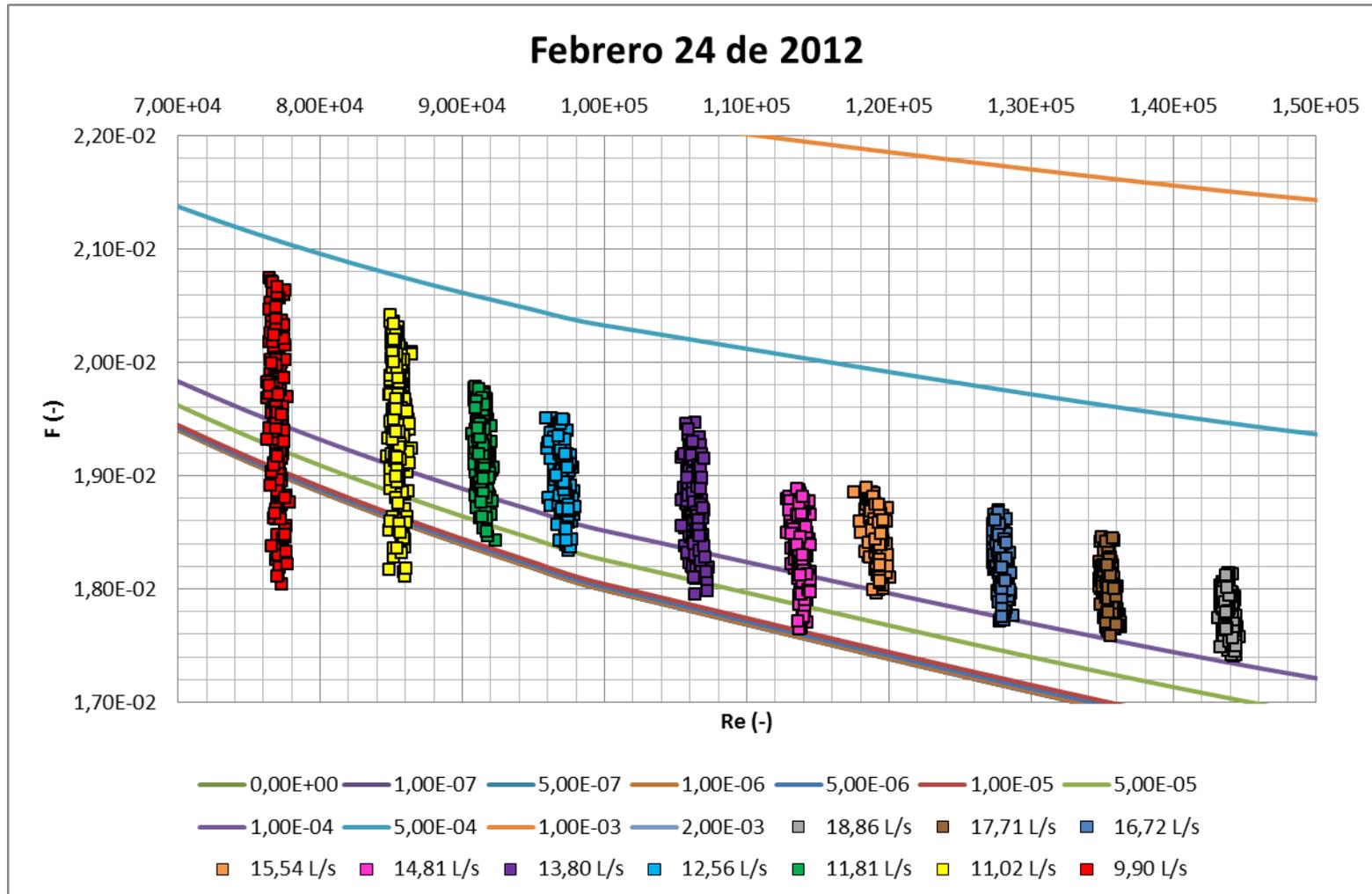


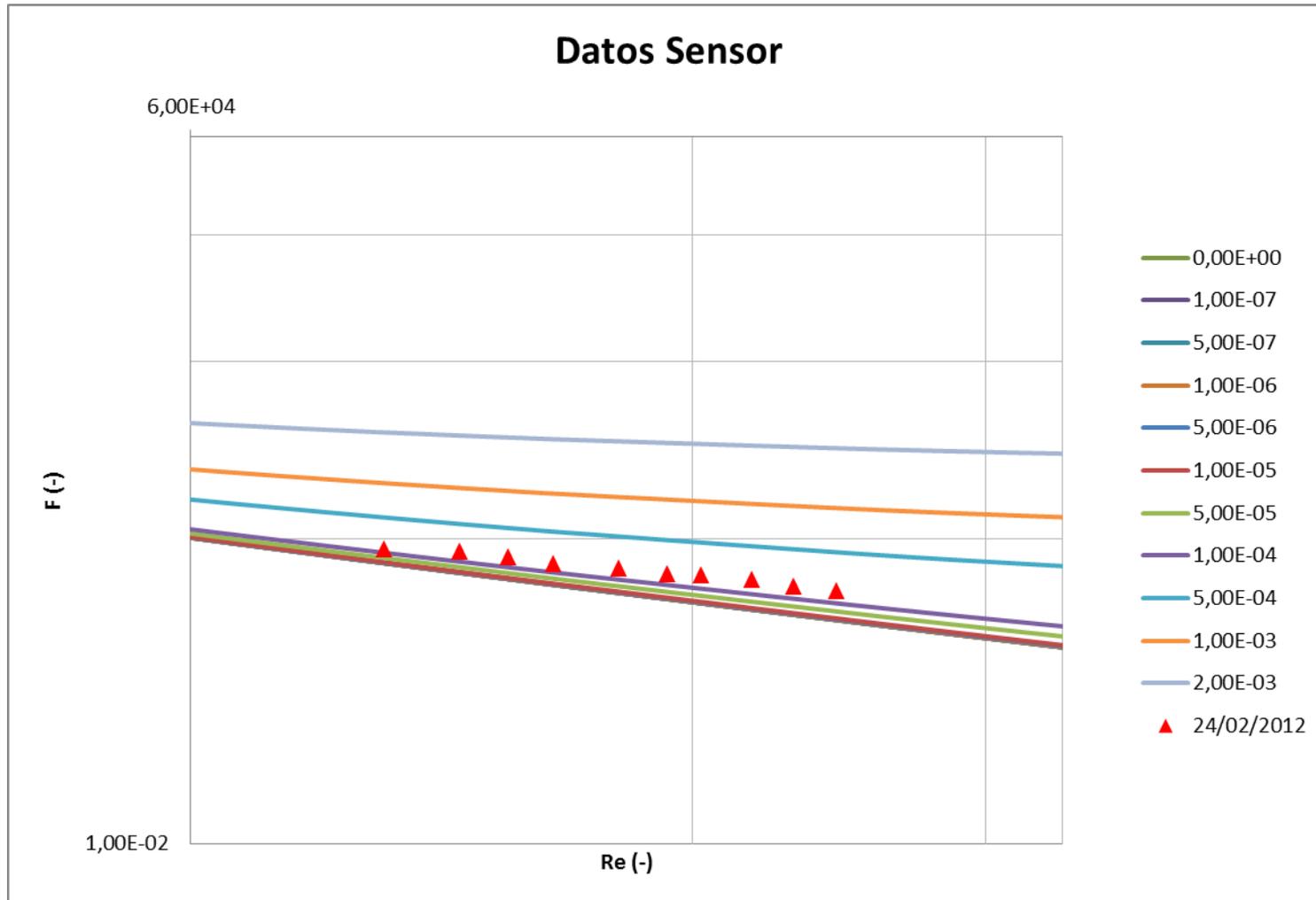


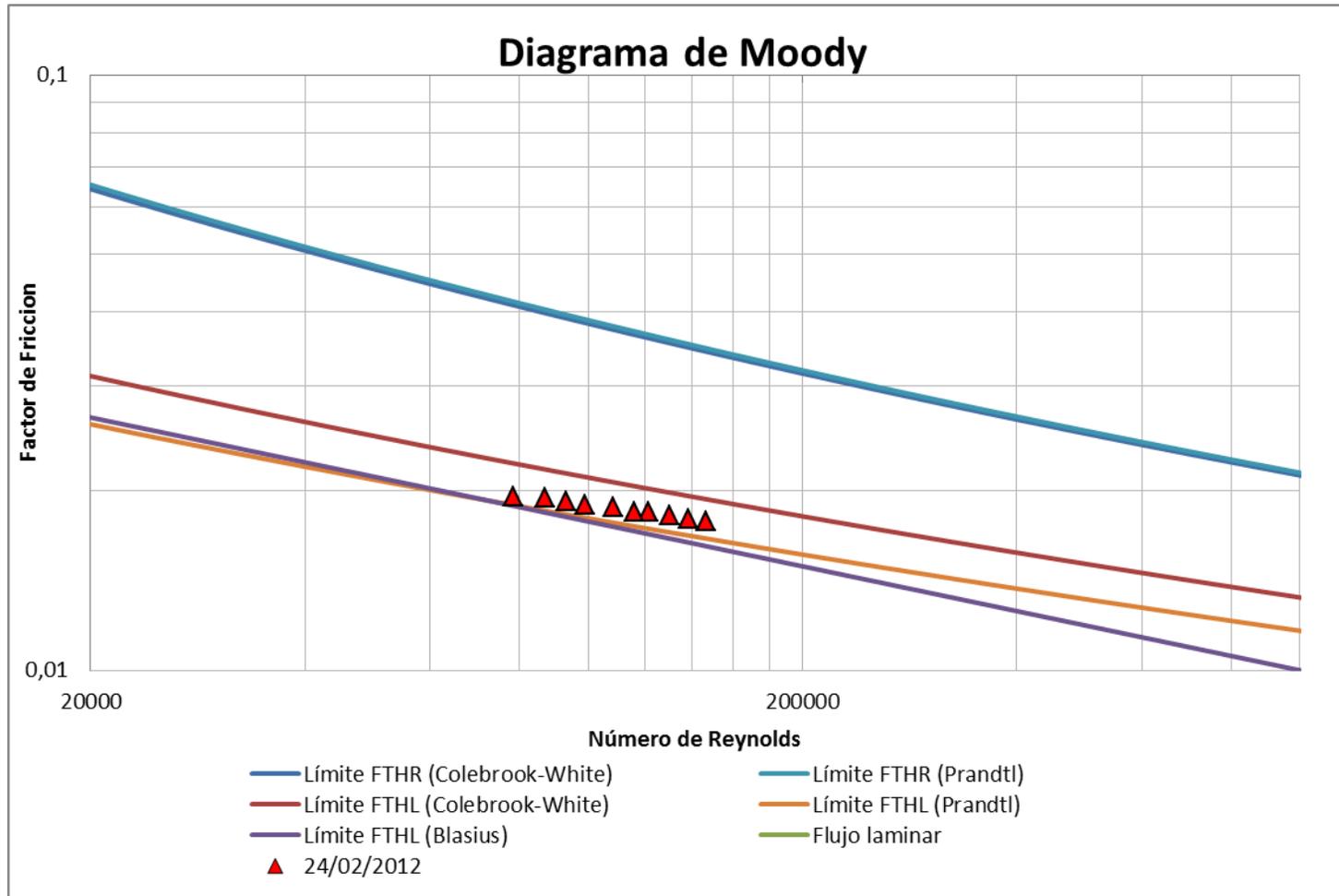


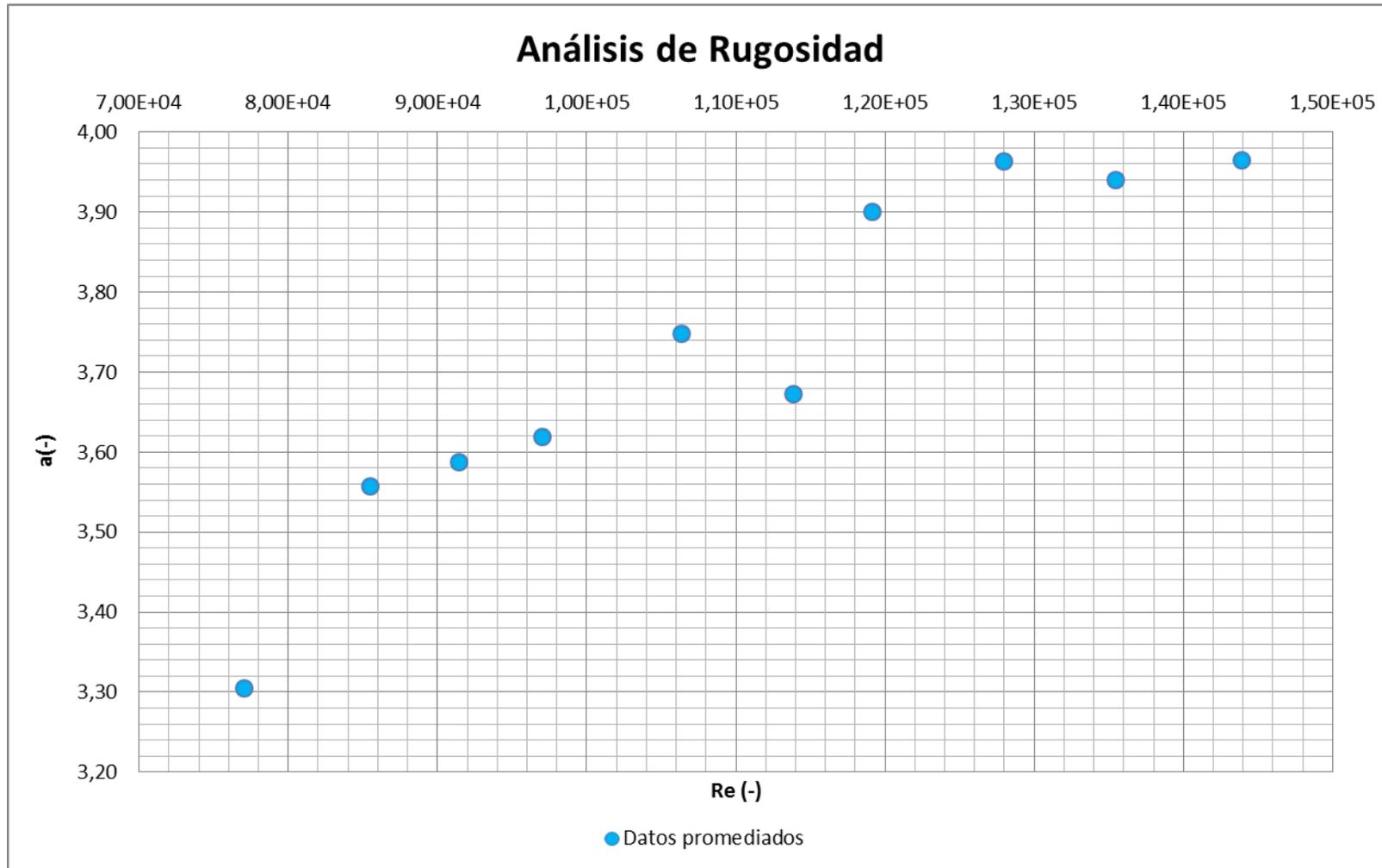
**Semana 4: Febrero 24 de 2012**

Febrero 24 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
18,86 L/s	0,0174	143148,04	0,0181	144624,85	0,0178	143902,33	0,0281	3,96459	-3,3092E-19
17,71 L/s	0,0176	136313,14	0,0185	136313,14	0,0180	135462,40	0,0291	3,93942	0,0000E+00
16,72 L/s	0,0177	127282,40	0,0187	128731,86	0,0182	127931,39	0,0314	3,96274	0,0000E+00
15,54 L/s	0,0180	117580,28	0,0189	120095,73	0,0184	119165,54	0,0316	3,90015	0,0000E+00
14,81 L/s	0,0176	112819,61	0,0189	114515,50	0,0184	113820,46	0,0256	3,67295	0,0000E+00
13,80 L/s	0,0179	105404,57	0,0195	107338,99	0,0187	106342,85	0,0299	3,74837	0,0000E+00
12,56 L/s	0,0183	95936,91	0,0195	97908,31	0,0190	97036,91	0,0278	3,61896	0,0000E+00
11,81 L/s	0,0184	90673,03	0,0198	92393,56	0,0192	91444,39	0,0281	3,58688	0,0000E+00
11,02 L/s	0,0181	84752,80	0,0204	86475,28	0,0194	85509,36	0,0285	3,55685	0,0000E+00
9,90 L/s	0,0180	76267,88	0,0207	77846,13	0,0195	77025,81	0,0195	3,30499	0,0000E+00



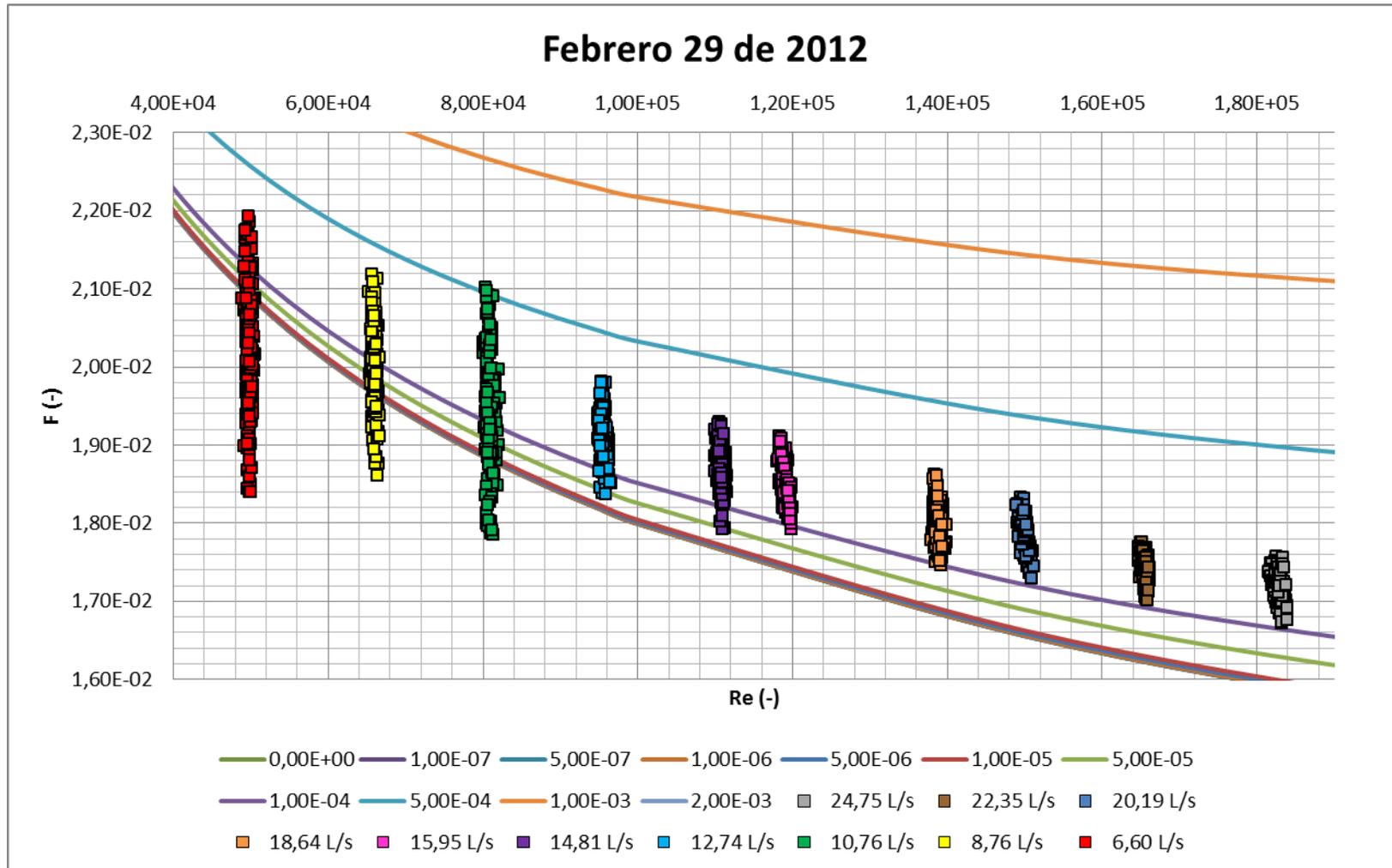


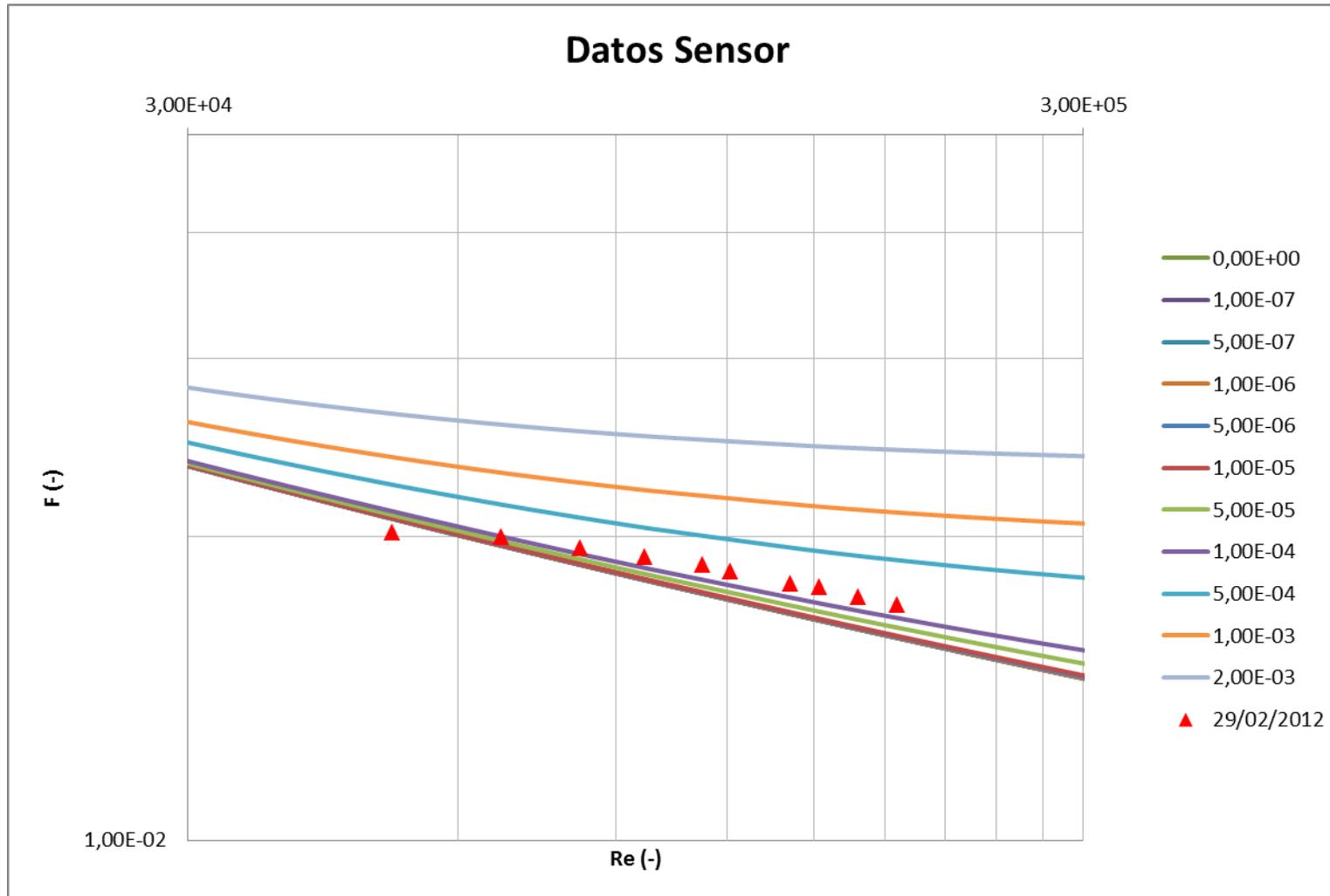


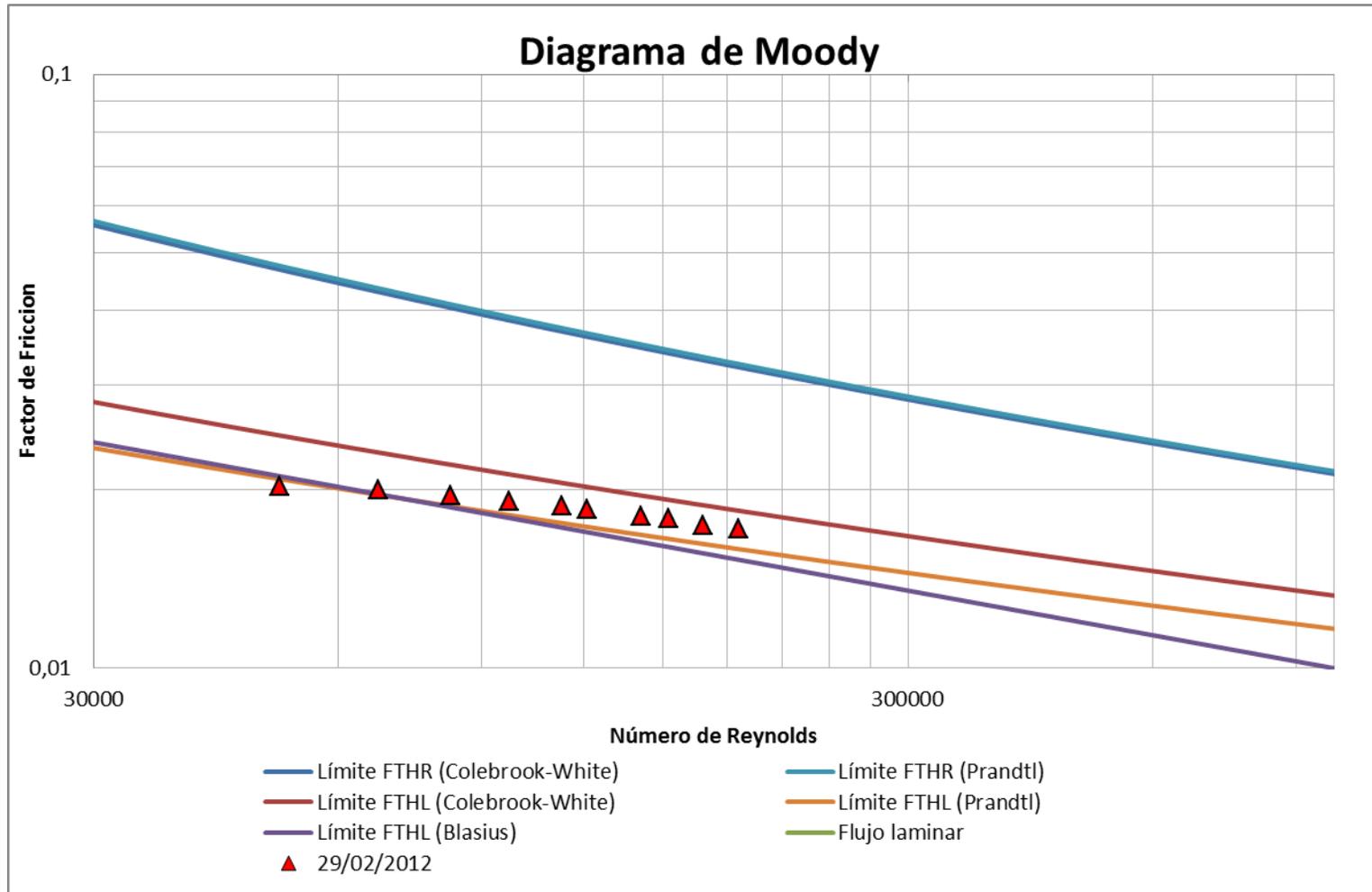


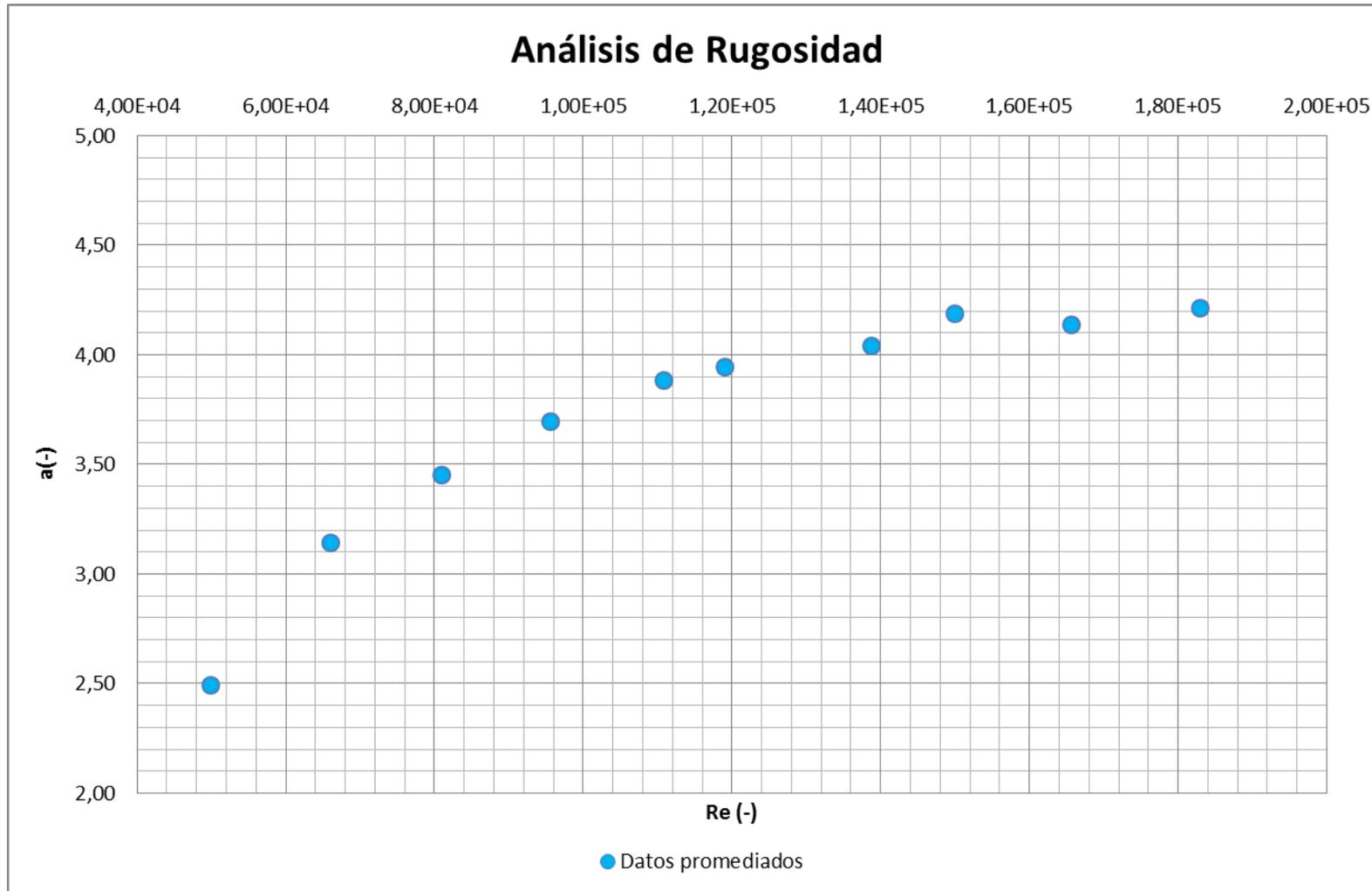
**Semana 5: Febrero 29 de 2012**

Febrero 29 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
24,75 L/s	0,0167	181576,44	0,0176	183995,49	0,0171	182965,83	0,0276	4,21131	-1,6132E-19
22,35 L/s	0,0170	166227,87	0,0178	166227,87	0,0174	165625,57	0,0286	4,13630	-2,4443E-19
20,19 L/s	0,0173	148957,29	0,0183	151180,02	0,0178	149973,85	0,0327	4,18927	-2,4199E-19
18,64 L/s	0,0175	137964,33	0,0186	139870,96	0,0180	138837,27	0,0312	4,04174	8,1068E-20
15,95 L/s	0,0179	118067,54	0,0191	119962,34	0,0185	119073,72	0,0330	3,94212	2,4199E-19
14,81 L/s	0,0179	109950,72	0,0193	111519,64	0,0187	110837,45	0,0334	3,88505	2,5076E-19
12,74 L/s	0,0184	94882,52	0,0198	96556,33	0,0191	95592,00	0,0312	3,69762	-5,7034E-19
10,76 L/s	0,0179	80006,32	0,0210	82143,53	0,0195	80924,86	0,0251	3,45123	-5,4686E-19
8,76 L/s	0,0186	65259,38	0,0212	66697,52	0,0200	66022,18	0,0140	3,14298	0,0000E+00
6,60 L/s	0,0184	48923,65	0,0219	50512,77	0,0202	49850,10	-0,0291	2,49404	



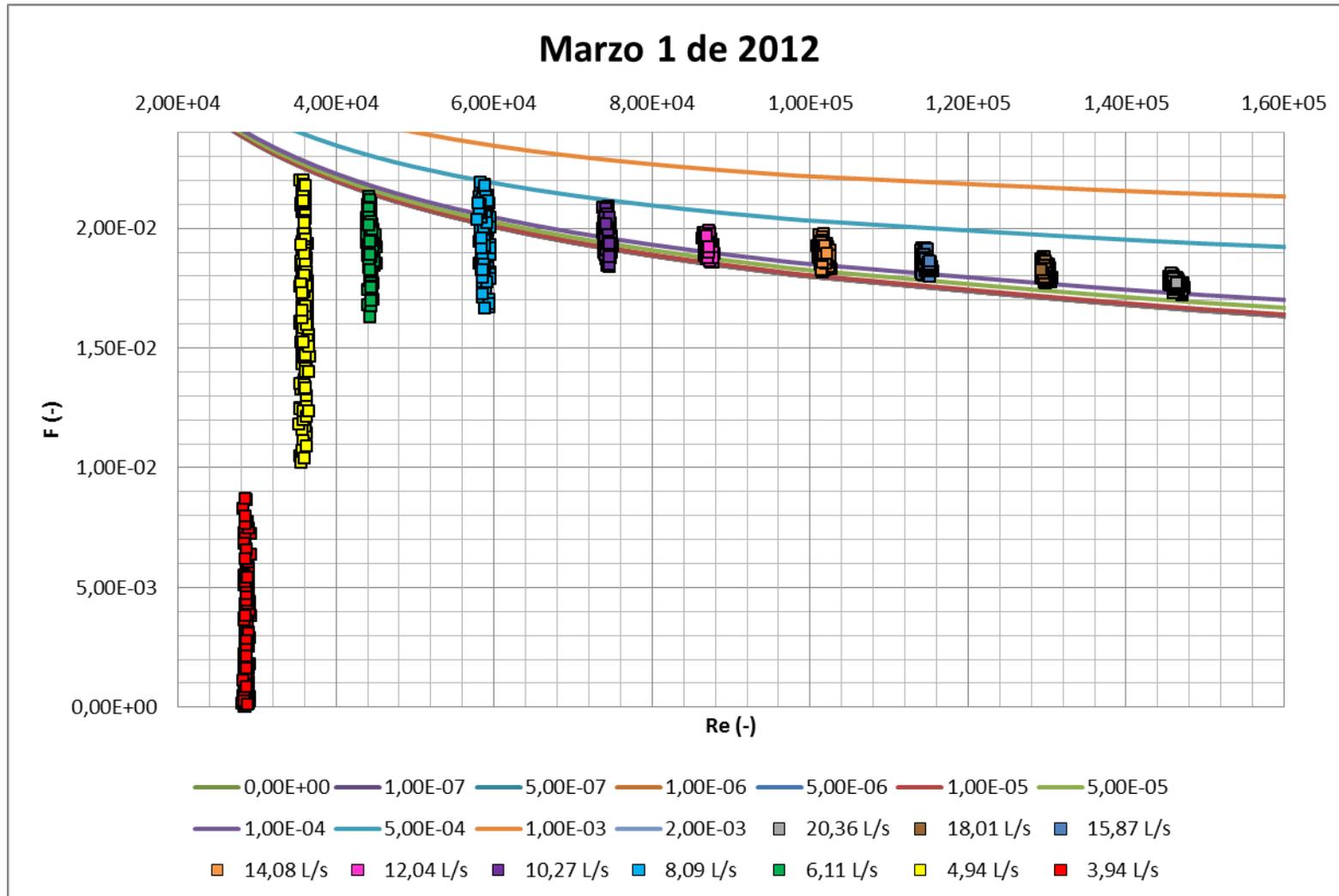


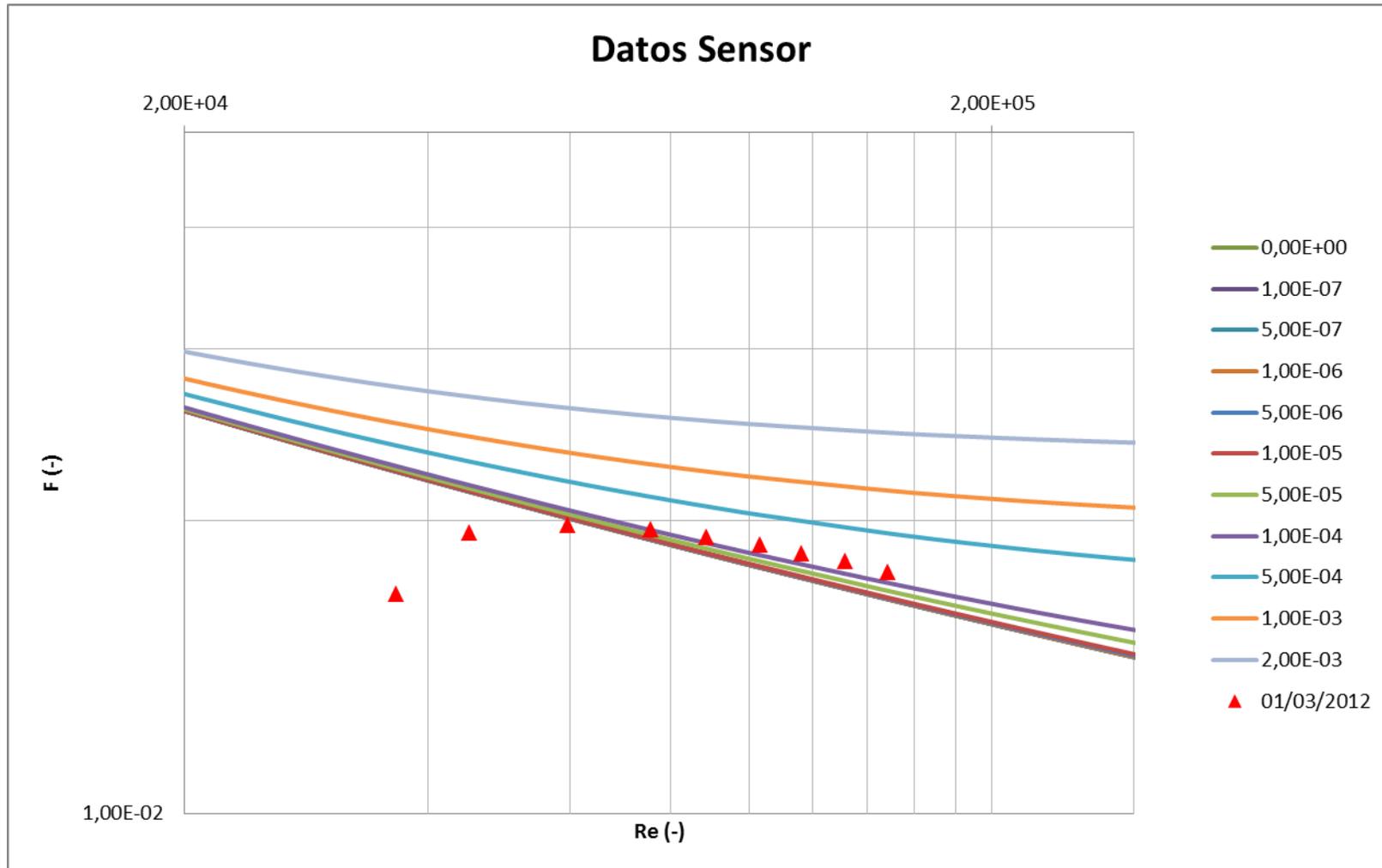


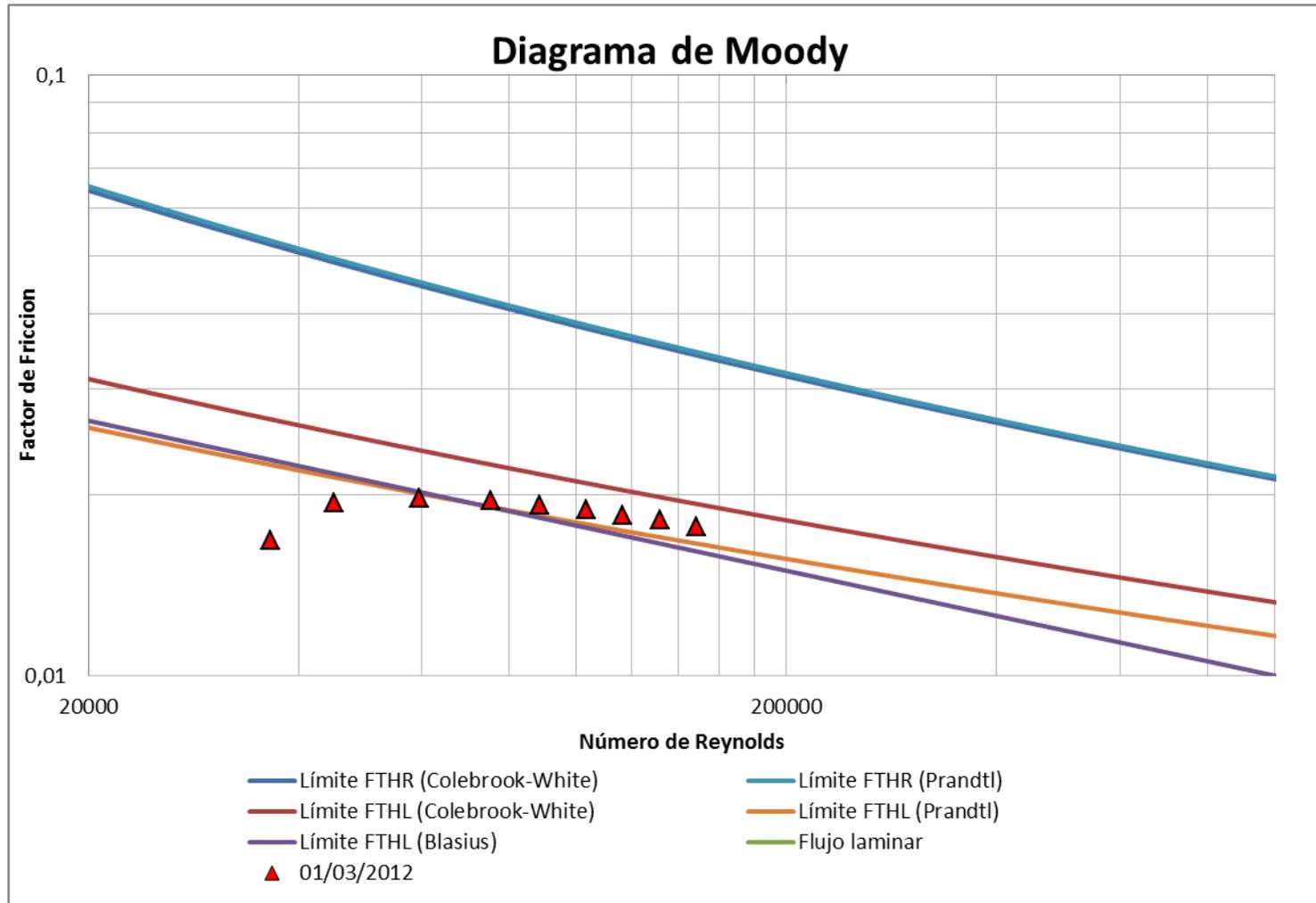


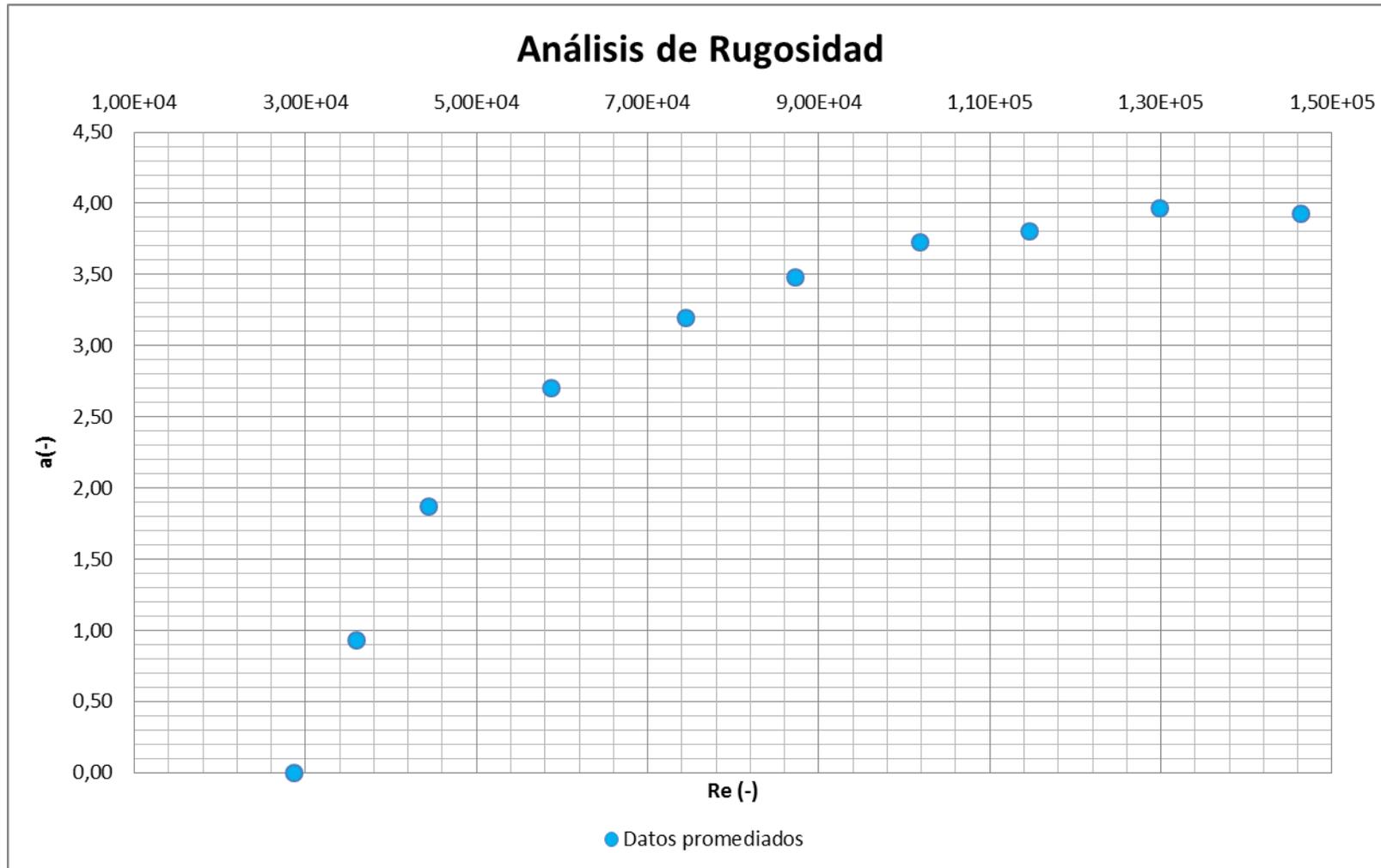
**Semana 5: Marzo 1 de 2012**

Marzo 1 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
20,36 L/s	0,0172	145430,35	0,0181	147423,18	0,0177	146382,59	0,0267	3,92704	-8,2308E-20
18,01 L/s	0,0177	130646,21	0,0188	130646,21	0,0182	129867,65	0,0310	3,96313	2,4199E-19
15,87 L/s	0,0180	114003,95	0,0192	115594,82	0,0185	114685,79	0,0297	3,80466	2,4443E-19
14,08 L/s	0,0181	100966,99	0,0198	102653,78	0,0189	101787,41	0,0303	3,72348	-8,2308E-20
12,04 L/s	0,0186	86420,14	0,0199	87893,95	0,0192	87228,79	0,0247	3,47606	0,0000E+00
10,27 L/s	0,0184	73754,57	0,0209	75074,91	0,0195	74417,14	0,0148	3,19246	1,6132E-19
8,09 L/s	0,0166	57949,95	0,0219	59584,74	0,0198	58782,82	-0,0130	2,69935	
6,11 L/s	0,0163	43874,50	0,0213	45157,28	0,0194	44365,85	-0,0861	1,87088	
4,94 L/s	0,0102	35382,76	0,0220	36664,48	0,0168	36004,14	-0,2260	0,93111	
3,94 L/s	0,0000	28203,96	0,0087	29278,23	0,0024	28690,66	-2,0139	0,00048	



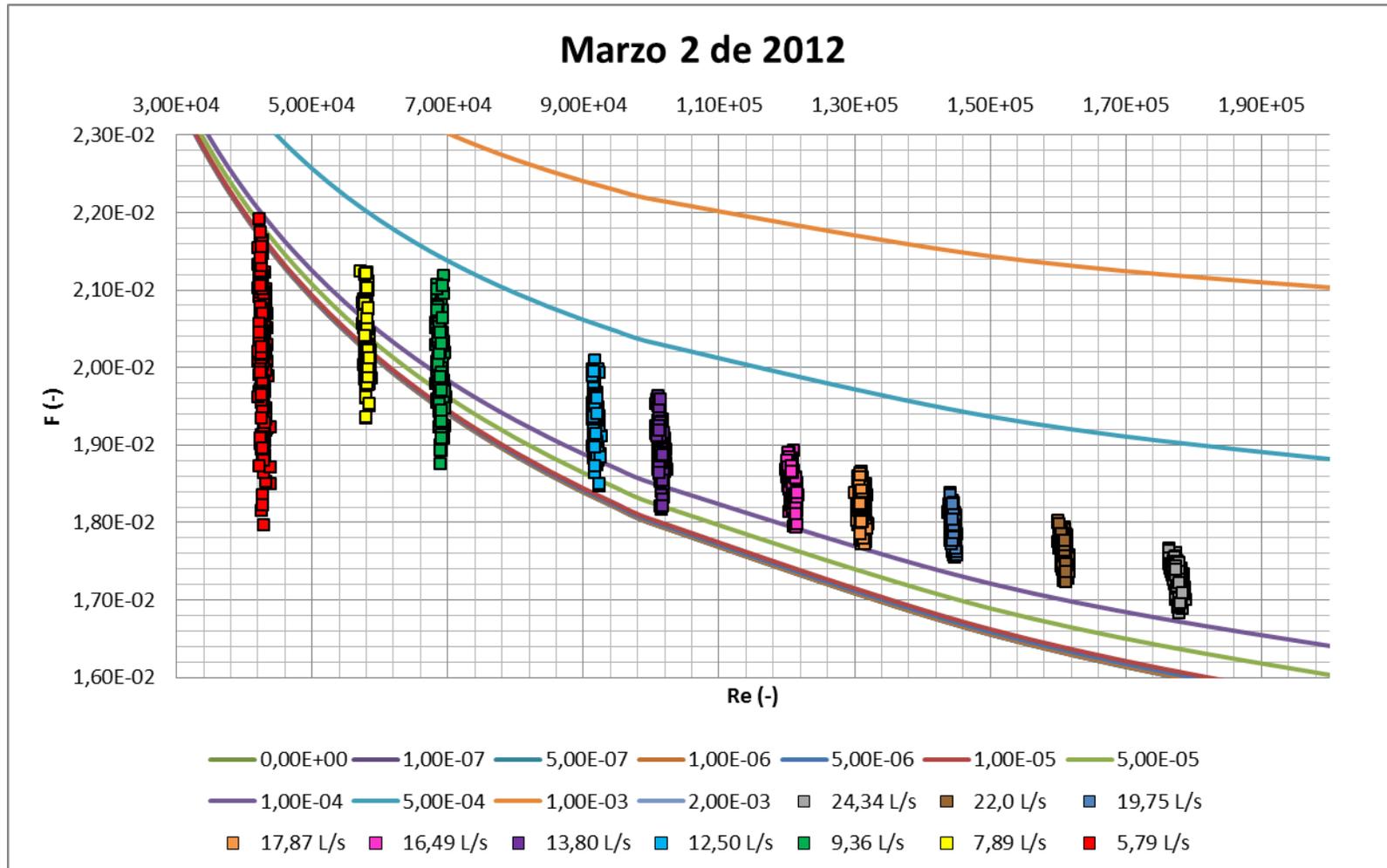


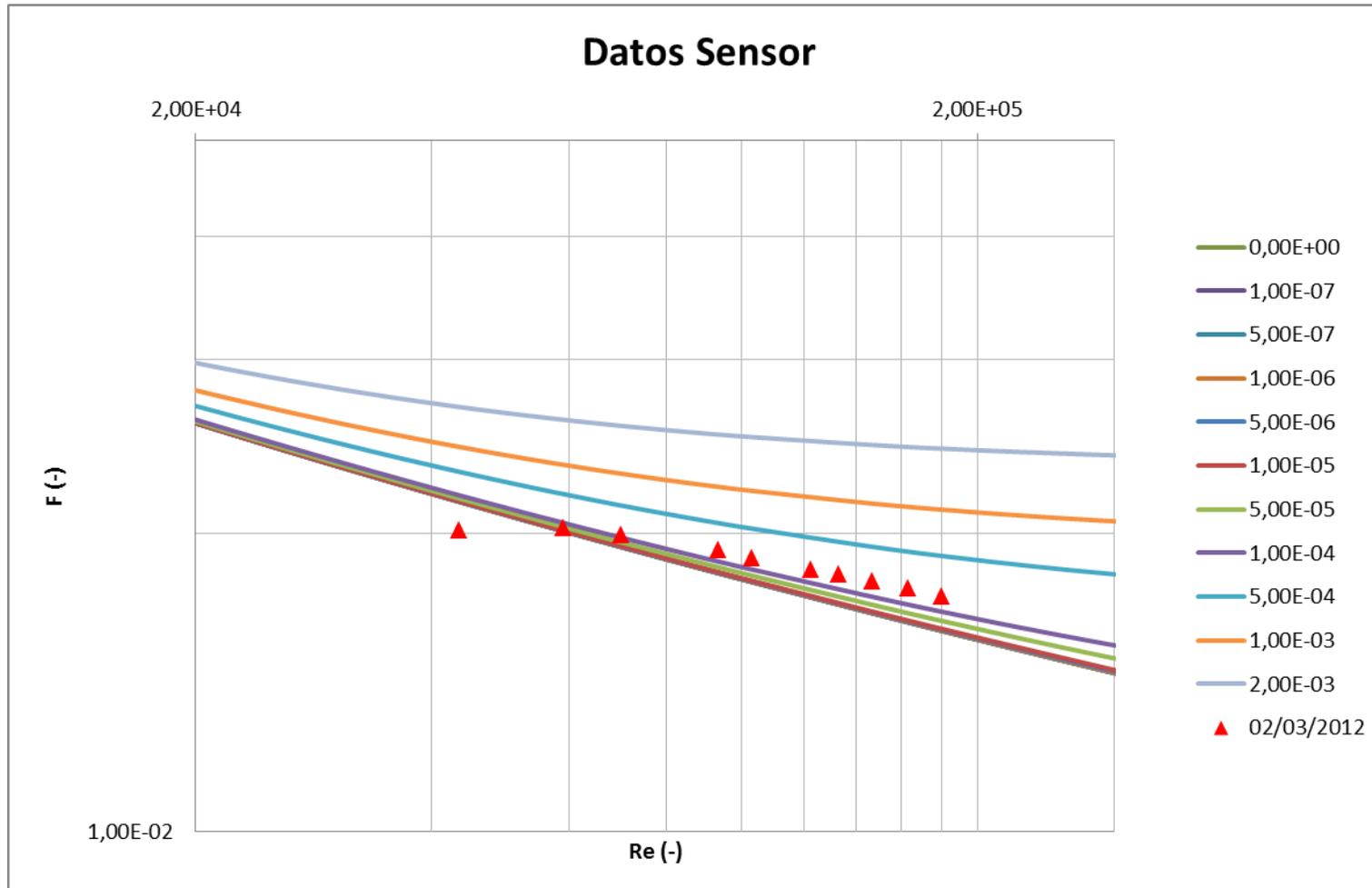


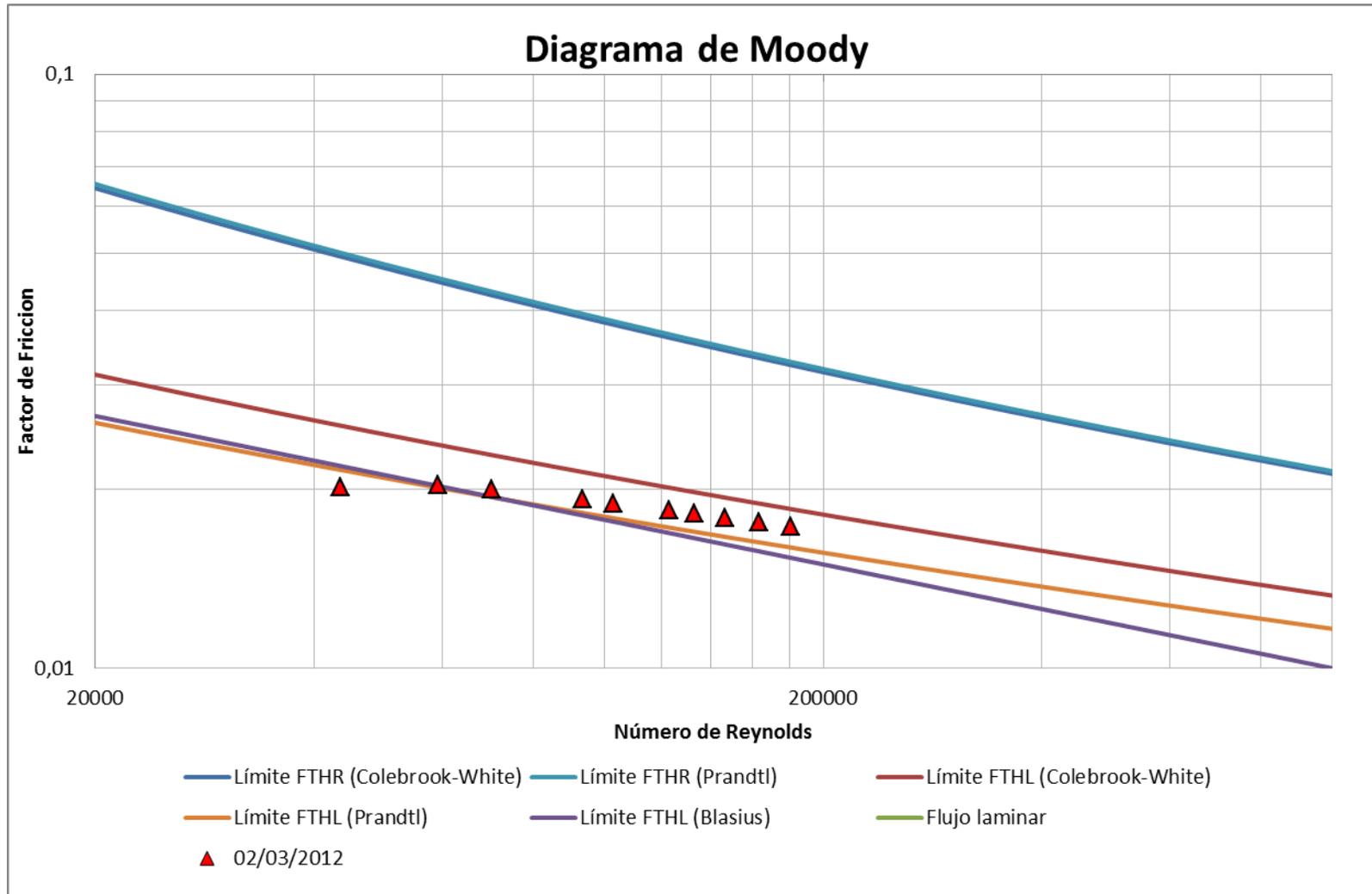


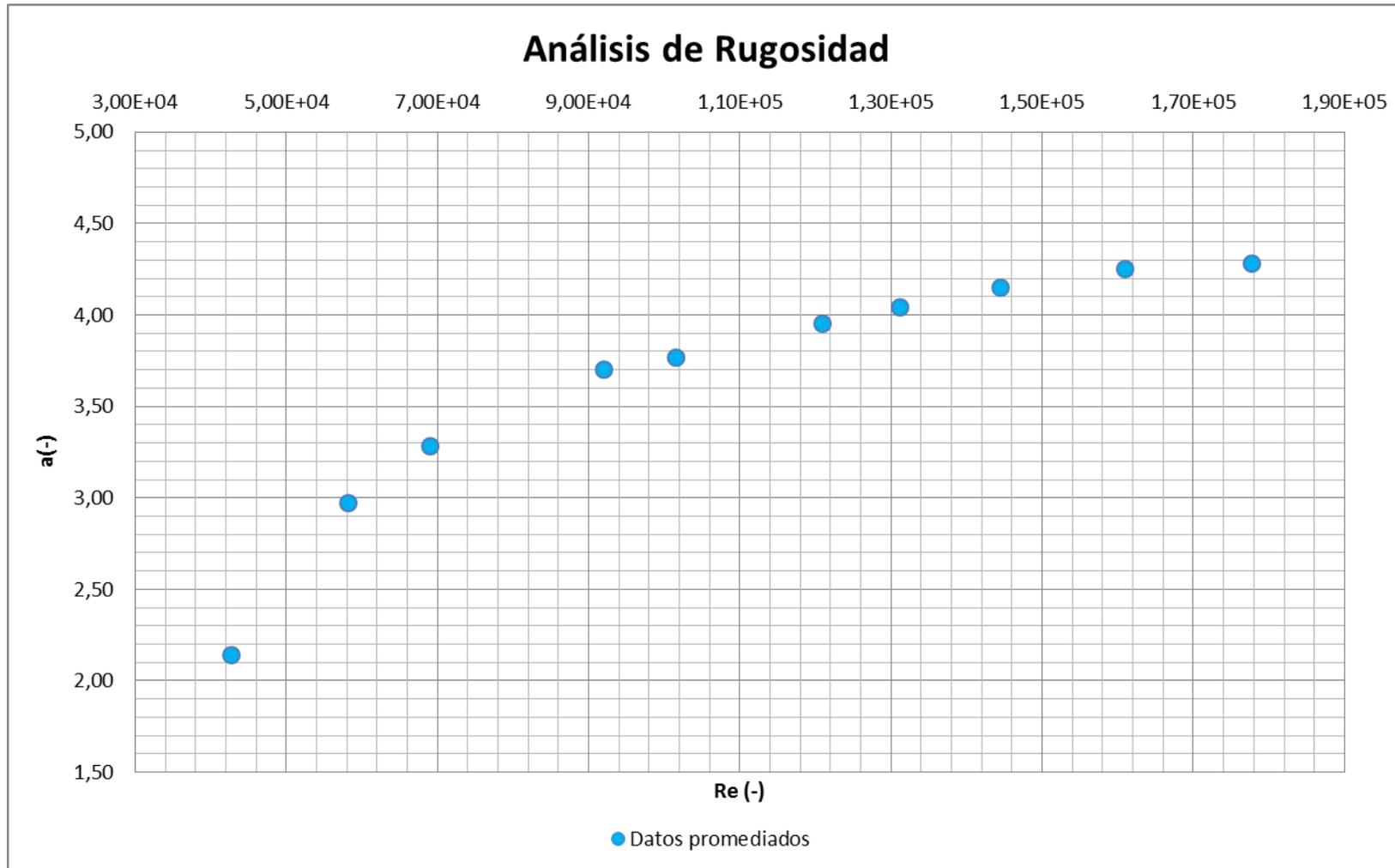
**Semana 5: Marzo 2 de 2012**

Marzo 2 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
24,34 L/s	0,0168	176384,44	0,0177	178911,42	0,0173	177711,99	0,0298	4,28034	8,0662E-20
22,0 L/s	0,0172	161765,81	0,0180	161765,81	0,0176	160996,52	0,0321	4,25354	1,8016E-18
19,75 L/s	0,0175	143864,27	0,0184	145134,97	0,0179	144543,51	0,0328	4,14697	-5,7034E-19
17,87 L/s	0,0174	130031,67	0,0187	131974,80	0,0182	131131,60	0,0329	4,04056	-4,1154E-19
16,49 L/s	0,0179	119967,59	0,0189	121723,89	0,0184	120960,59	0,0328	3,95089	1,6132E-19
13,80 L/s	0,0182	100697,72	0,0198	102331,72	0,0189	101512,40	0,0319	3,76598	3,2427E-19
12,50 L/s	0,0185	91368,17	0,0201	92810,15	0,0193	91948,50	0,0326	3,70389	8,1477E-20
9,36 L/s	0,0188	68242,79	0,0212	69862,23	0,0200	69018,23	0,0207	3,28179	1,6546E-19
7,89 L/s	0,0193	57232,19	0,0212	58791,76	0,0203	58164,73	0,0052	2,96873	0,0000E+00
5,79 L/s	0,0180	42039,67	0,0219	43931,11	0,0202	42772,32	-0,0638	2,14309	



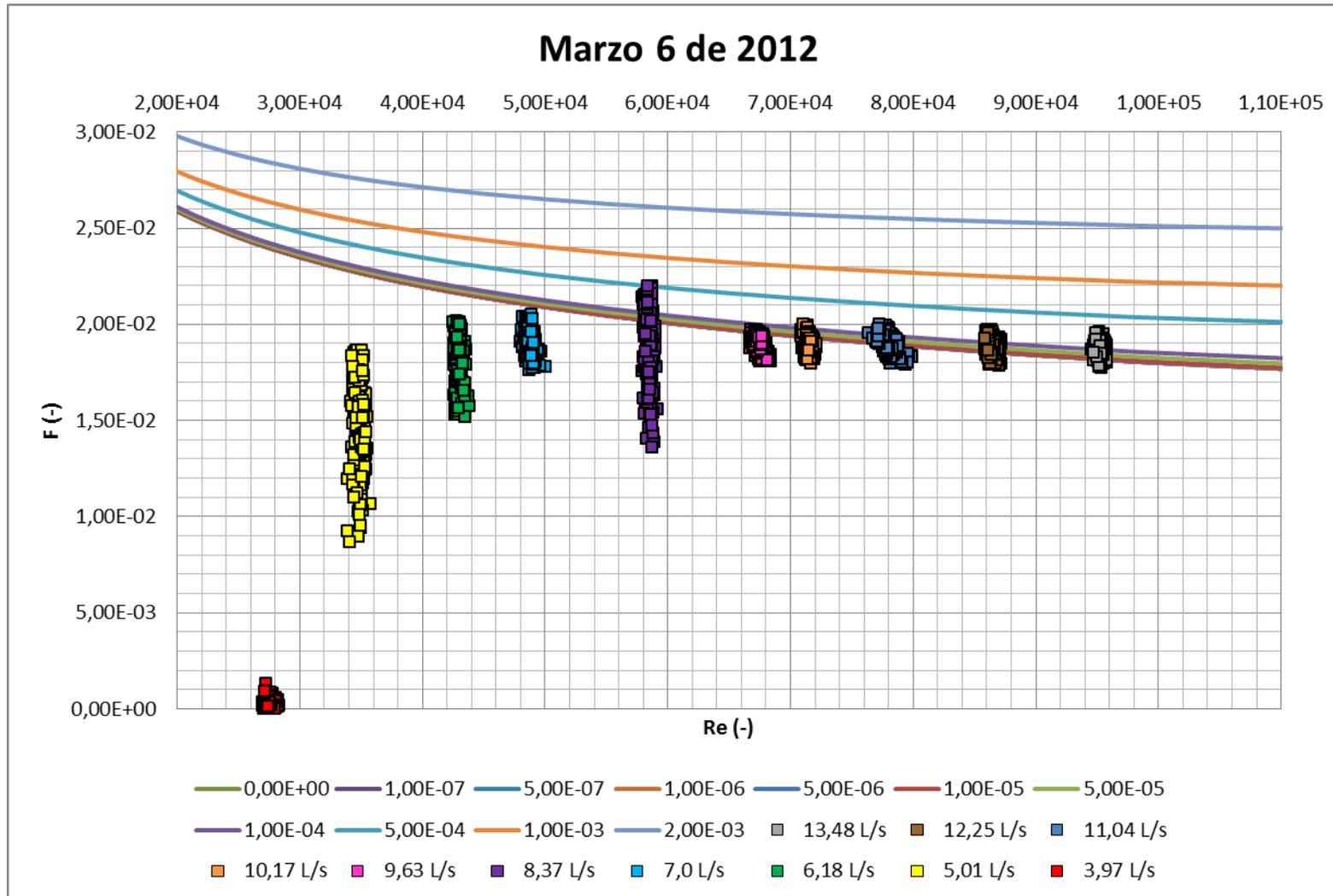


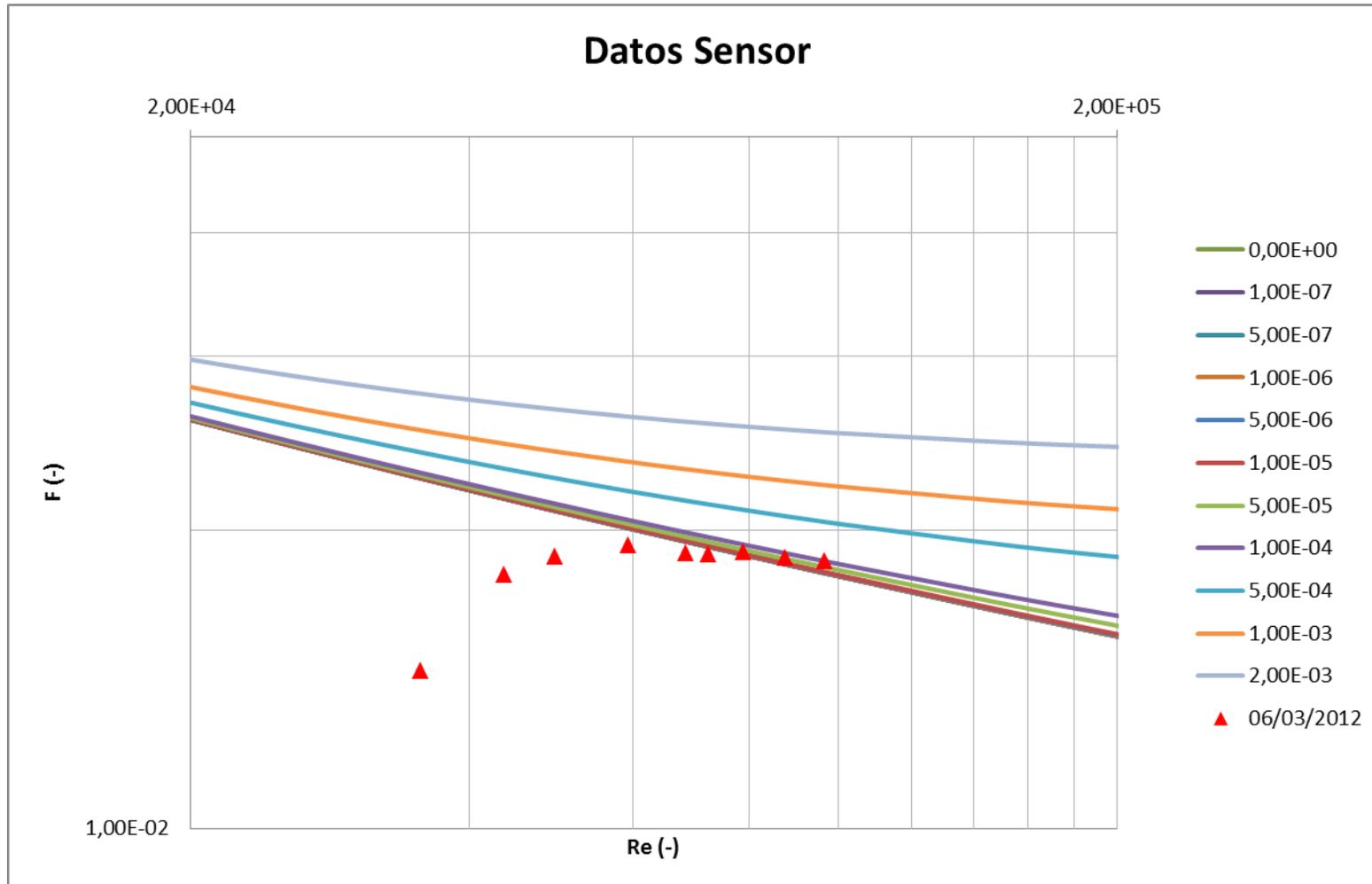


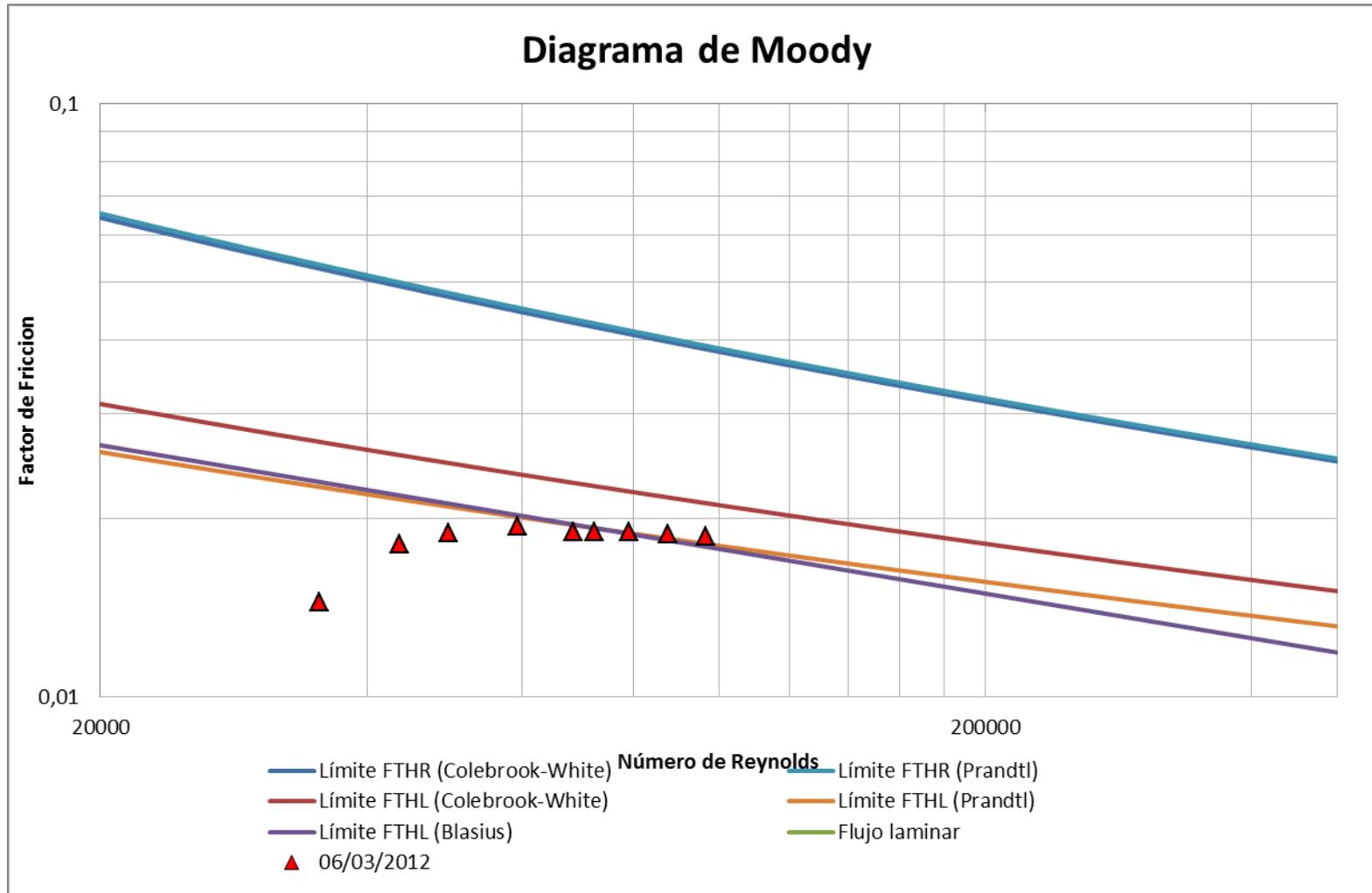


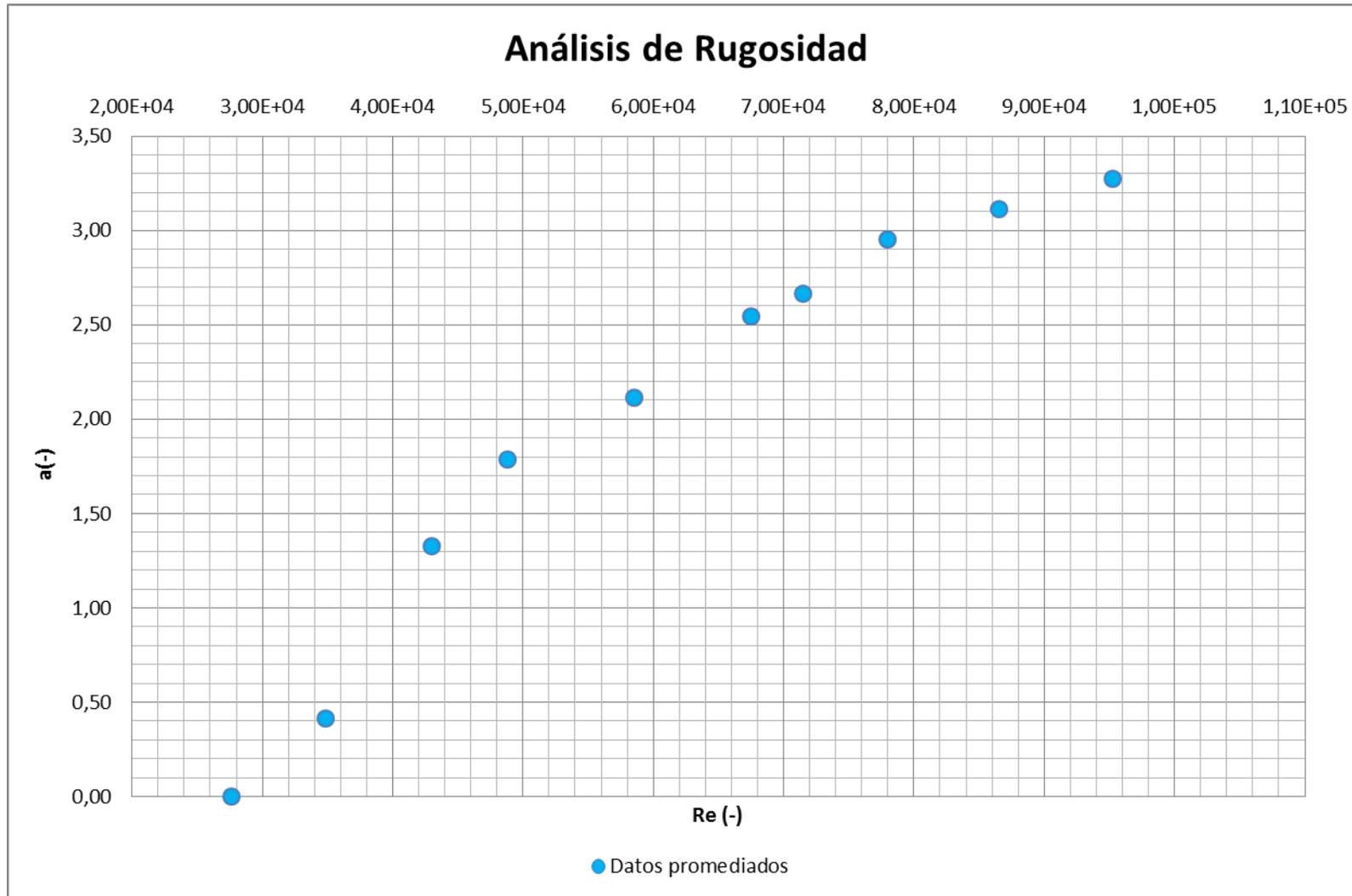
**Semana 6: Marzo 6 de 2012**

Marzo 6 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
13,48 L/s	0,0177	94569,04	0,0196	95813,70	0,0186	95270,88	0,0145	3,27104	3,1444E-35
12,25 L/s	0,0178	87200,95	0,0197	87200,95	0,0188	86524,80	0,0092	3,11319	4,1365E-19
11,04 L/s	0,0179	76374,44	0,0200	79943,84	0,0190	77985,61	0,0026	2,95352	-8,3588E-20
10,17 L/s	0,0179	70897,23	0,0200	72168,68	0,0190	71457,83	-0,0122	2,66761	
9,63 L/s	0,0180	66711,79	0,0197	68408,81	0,0190	67493,36	-0,0195	2,54665	
8,37 L/s	0,0136	57920,41	0,0220	59147,06	0,0186	58515,45	-0,0535	2,11512	
7,0 L/s	0,0176	48039,75	0,0205	50006,27	0,0189	48829,08	-0,0856	1,78892	
6,18 L/s	0,0151	42497,82	0,0202	43876,22	0,0181	42978,88	-0,1418	1,32848	
5,01 L/s	0,0087	33939,62	0,0187	35763,60	0,0144	34886,67	-0,3112	0,41506	
3,97 L/s	0,0000	26992,41	0,0013	28337,73	0,0002	27620,87	-5,3877	0,00000	



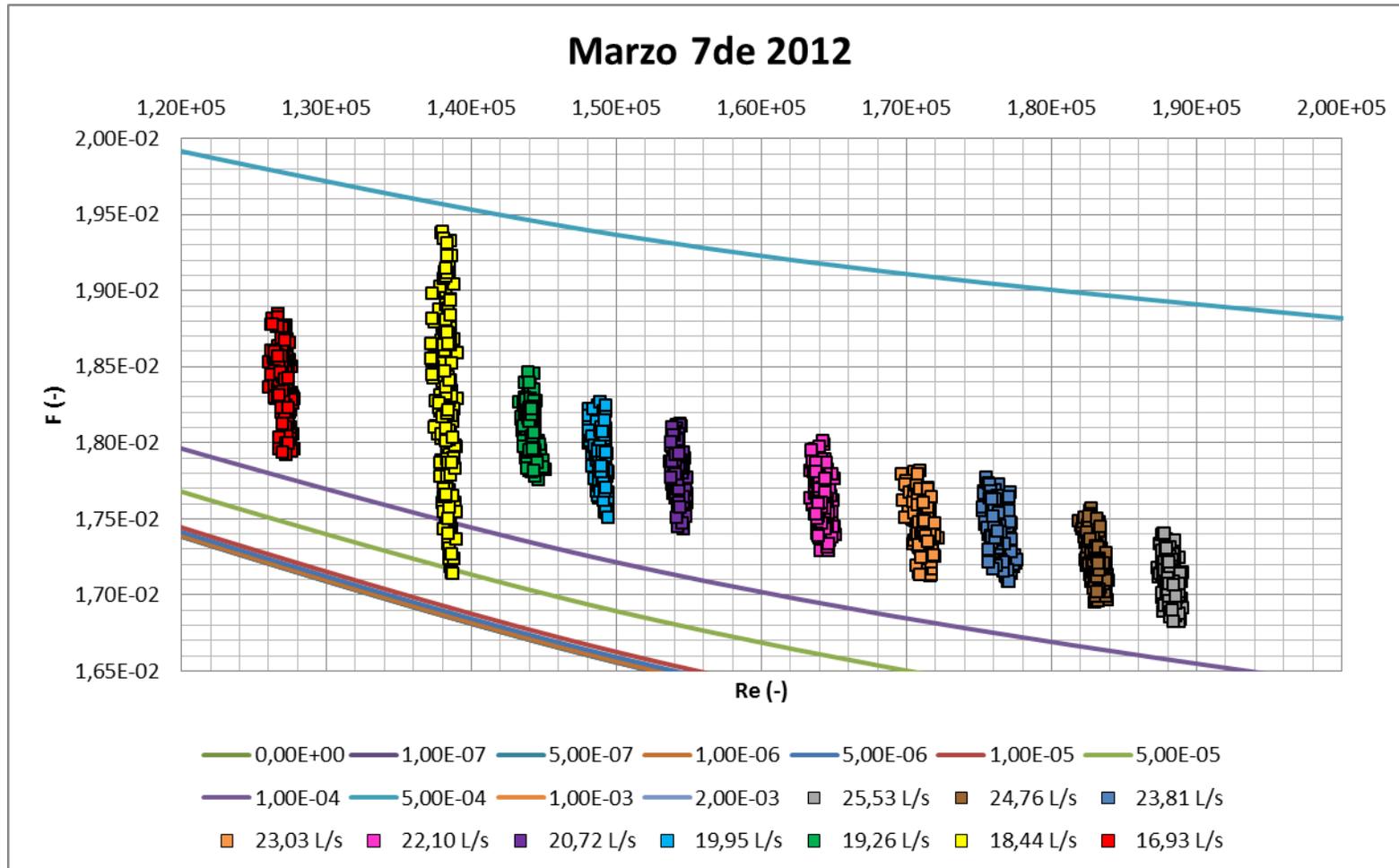


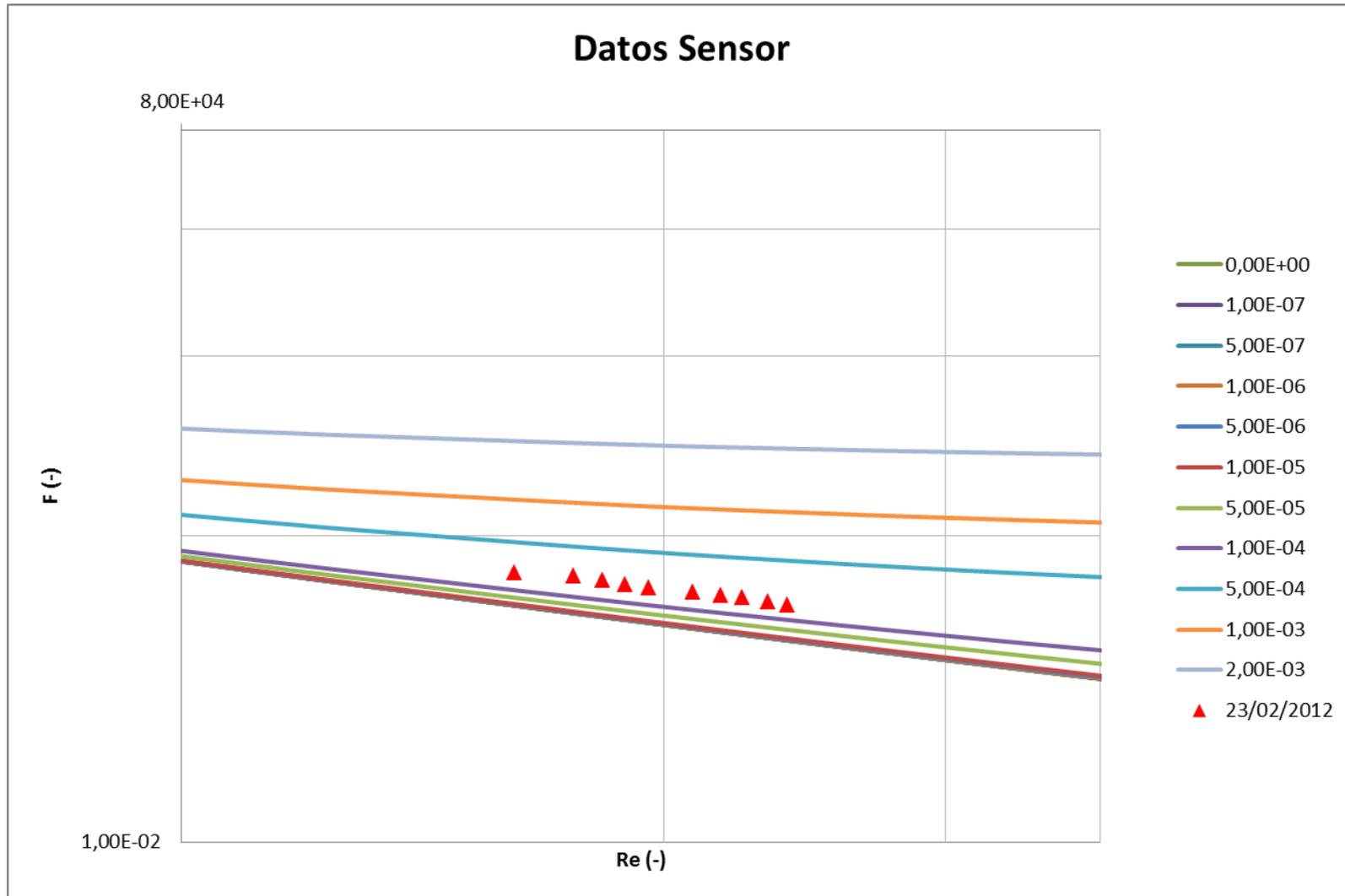


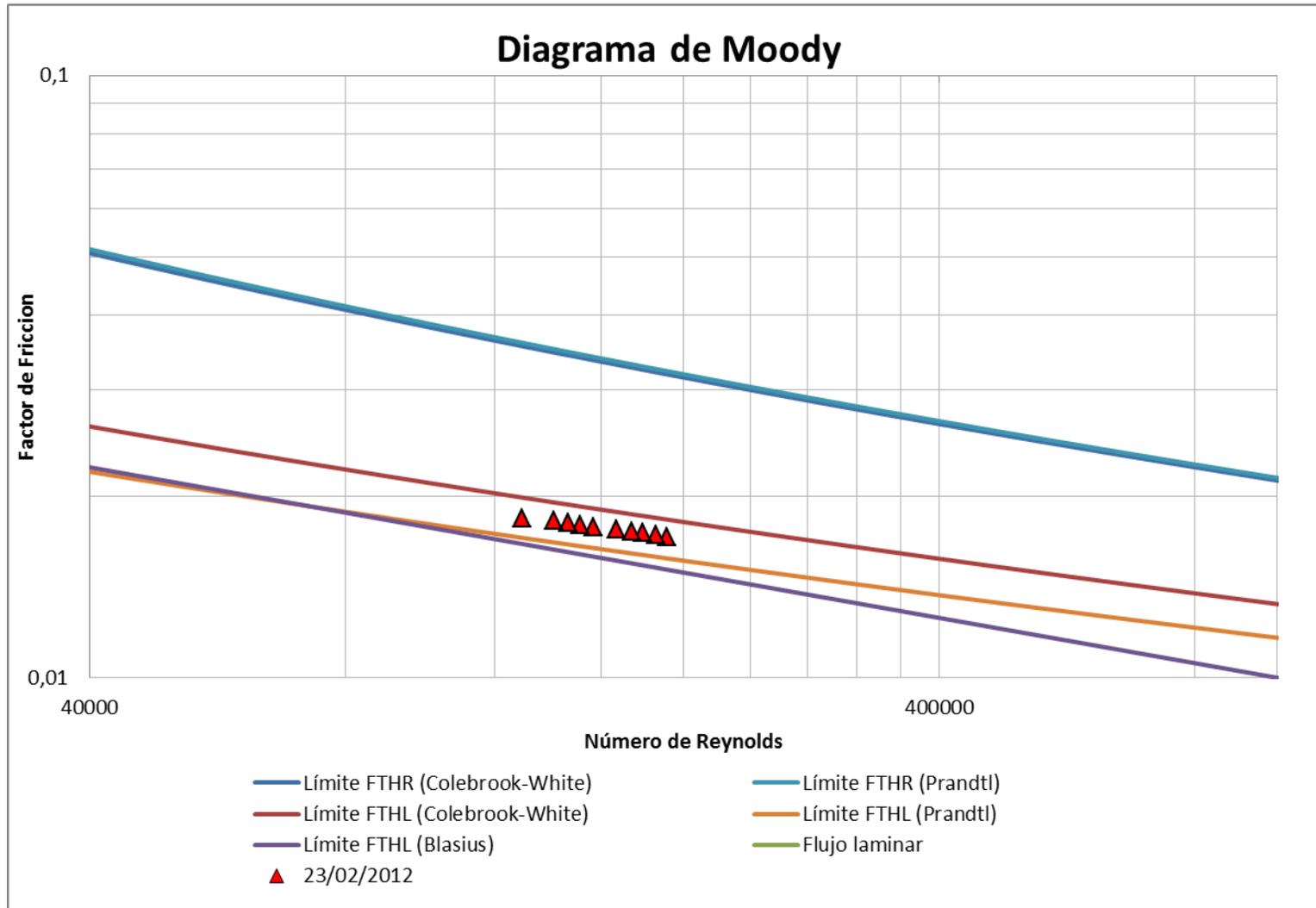


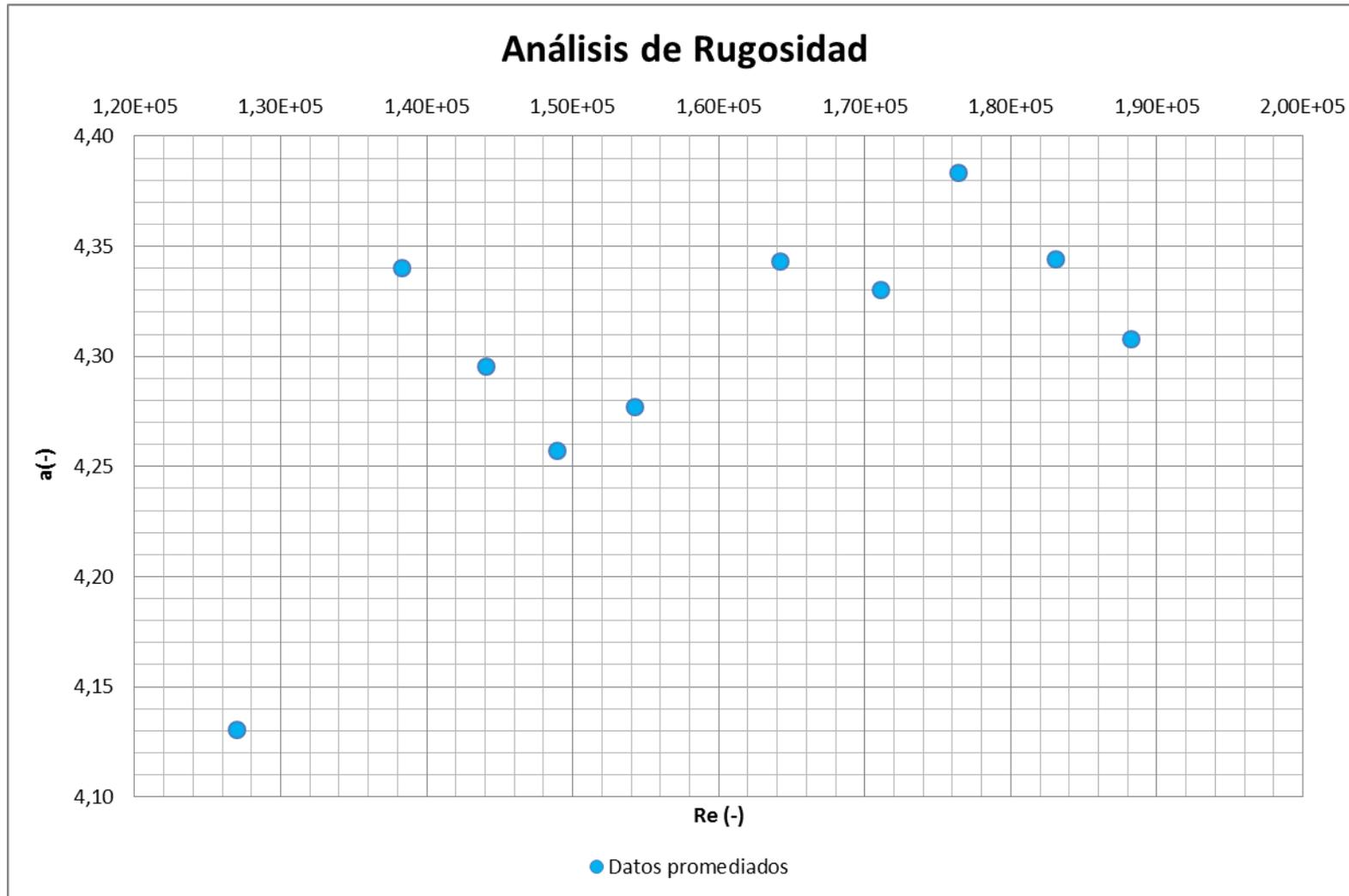
**Semana 6: Marzo 7 de 2012**

Marzo 7 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
25,53 L/s	0,0168	187306,00	0,0174	189086,41	0,0171	188233,67	0,0288	4,30804	-8,3157E-20
24,76 L/s	0,0170	183905,49	0,0176	183905,49	0,0172	183044,61	0,0304	4,34389	-8,7202E-20
23,81 L/s	0,0171	175272,36	0,0178	177640,75	0,0174	176397,55	0,0323	4,38327	7,6821E-19
23,03 L/s	0,0171	169705,29	0,0178	172216,27	0,0175	171066,25	0,0320	4,33027	1,6546E-19
22,10 L/s	0,0173	163354,79	0,0180	165100,23	0,0176	164197,99	0,0336	4,34293	1,6631E-19
20,72 L/s	0,0174	153708,60	0,0181	154887,21	0,0178	154263,46	0,0340	4,27716	-1,6718E-19
19,95 L/s	0,0175	148066,49	0,0183	149447,93	0,0179	148904,81	0,0347	4,25721	-1,2014E-18
19,26 L/s	0,0178	143304,41	0,0185	145147,29	0,0181	144102,16	0,0368	4,29519	3,1126E-35
18,44 L/s	0,0171	137226,28	0,0194	139062,44	0,0183	138299,50	0,0393	4,34019	-4,9385E-19
16,93 L/s	0,0179	126019,41	0,0188	127787,27	0,0184	127014,54	0,0366	4,13022	6,7926E-19



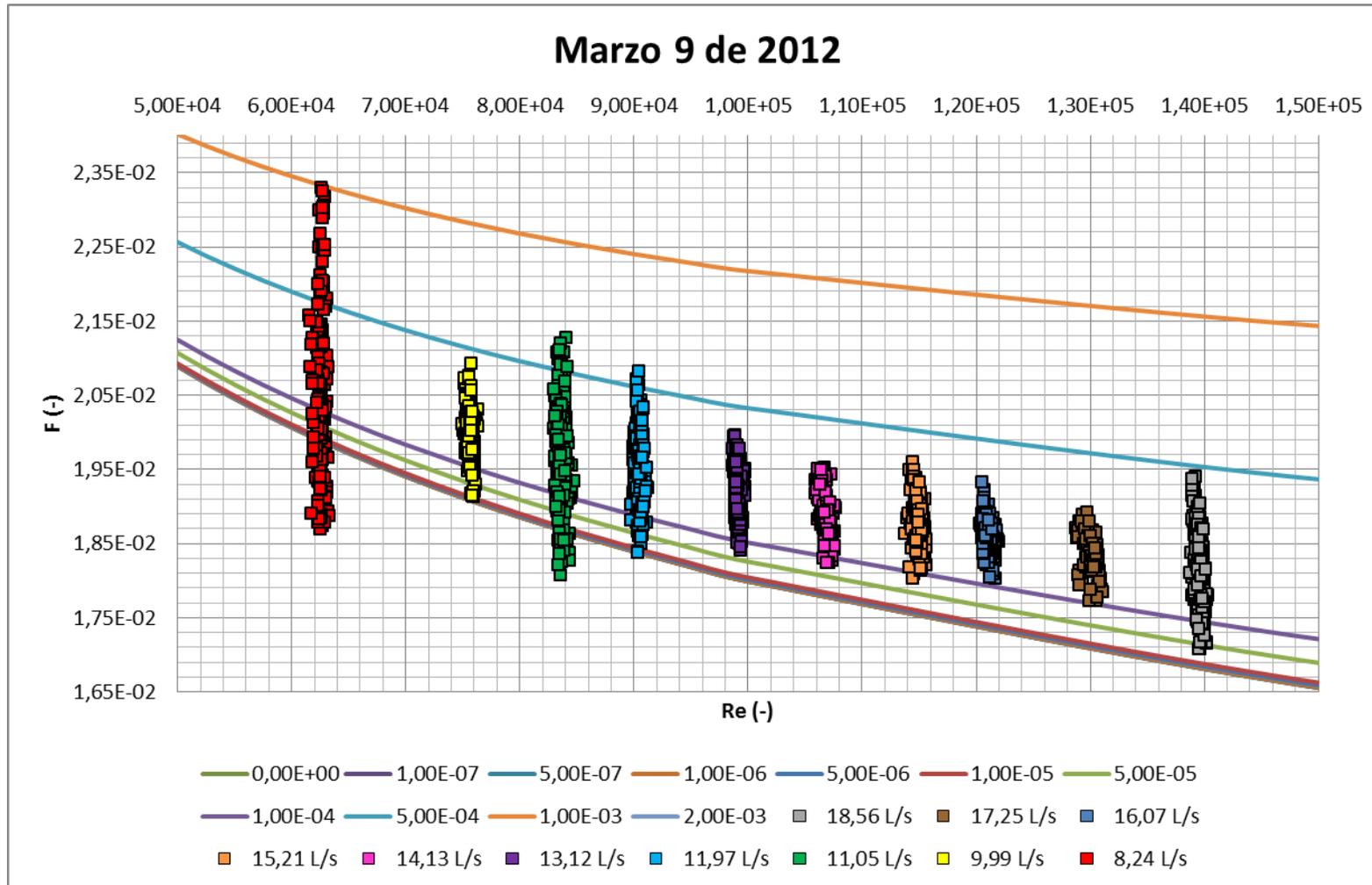


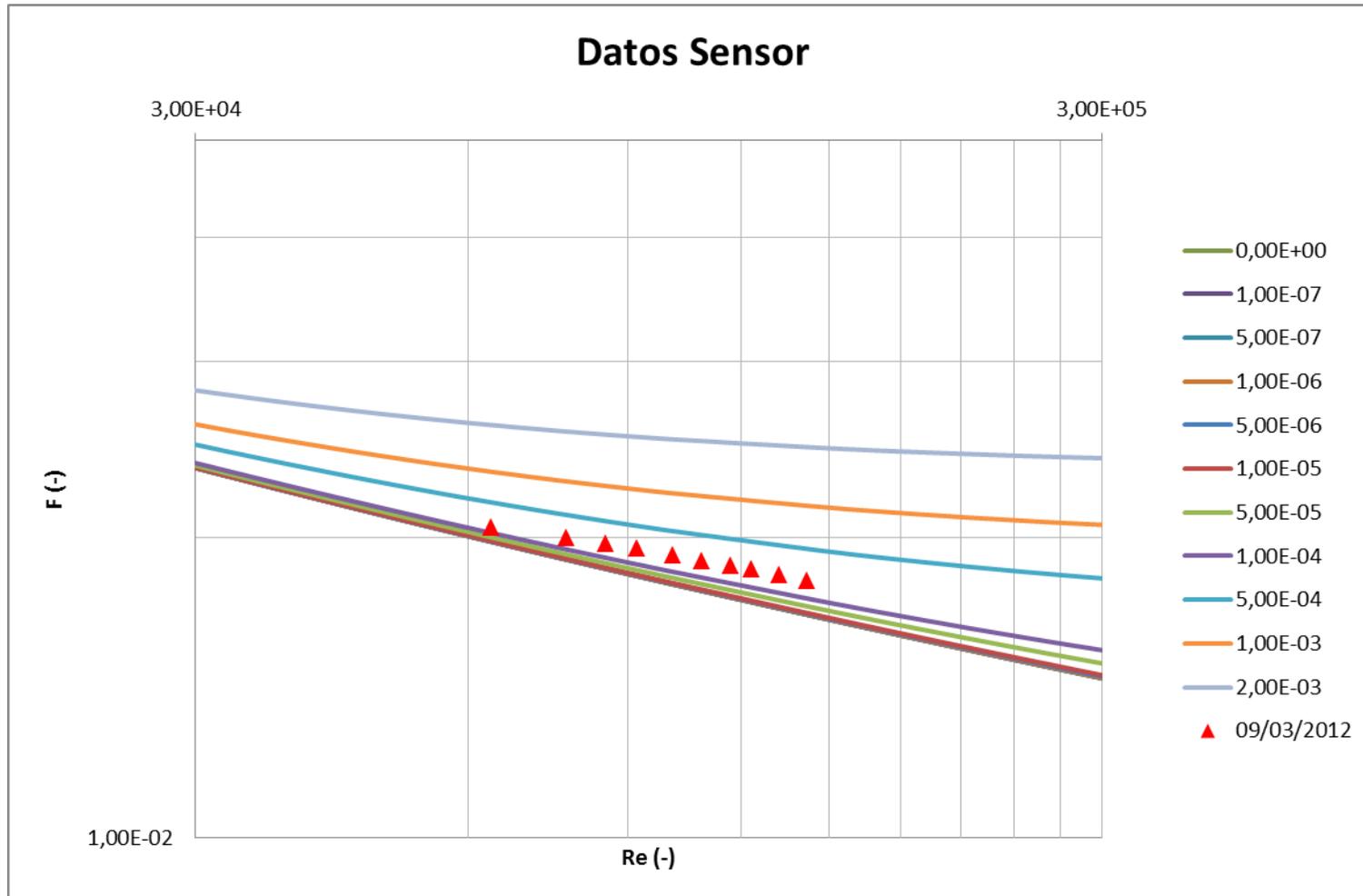


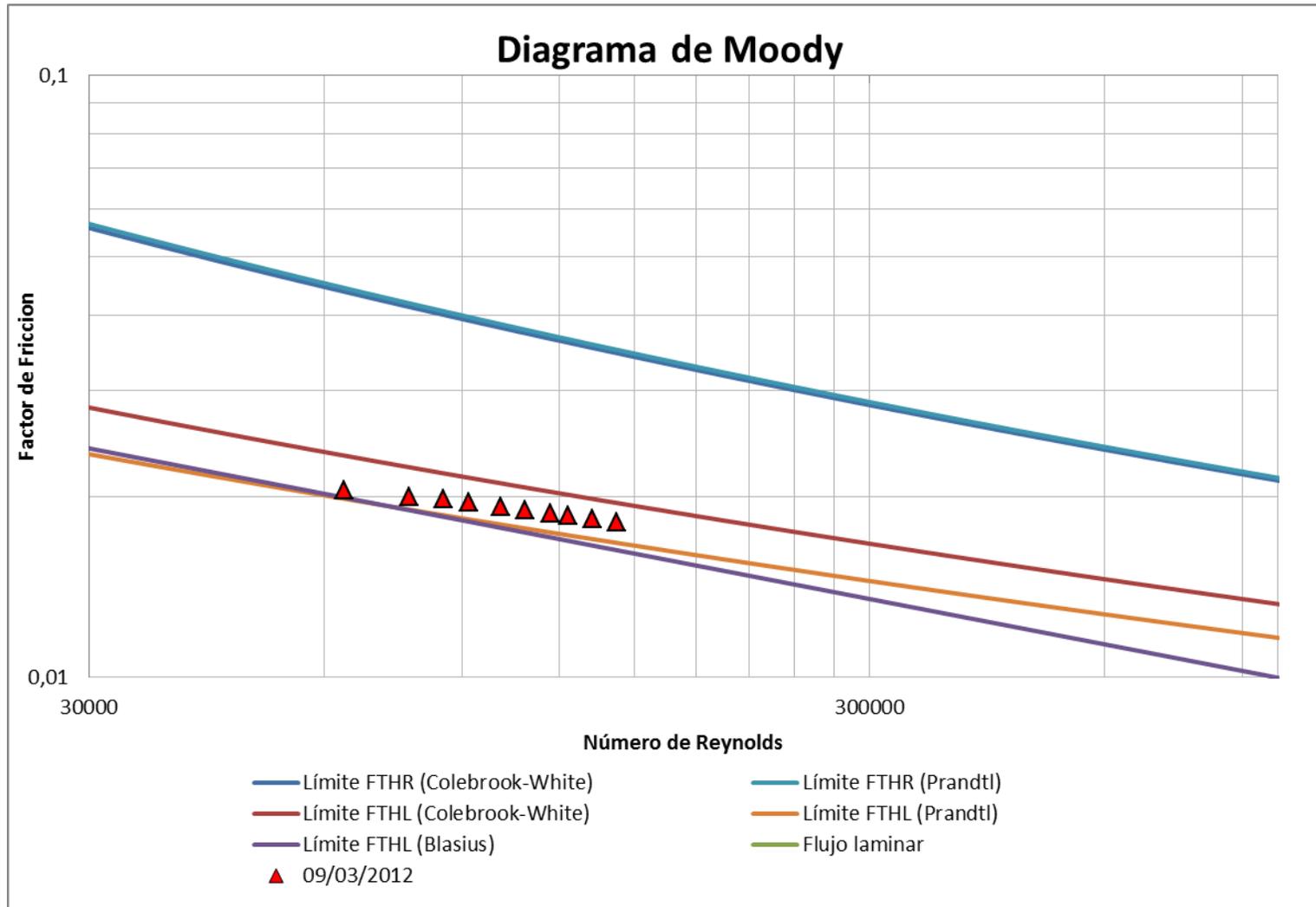


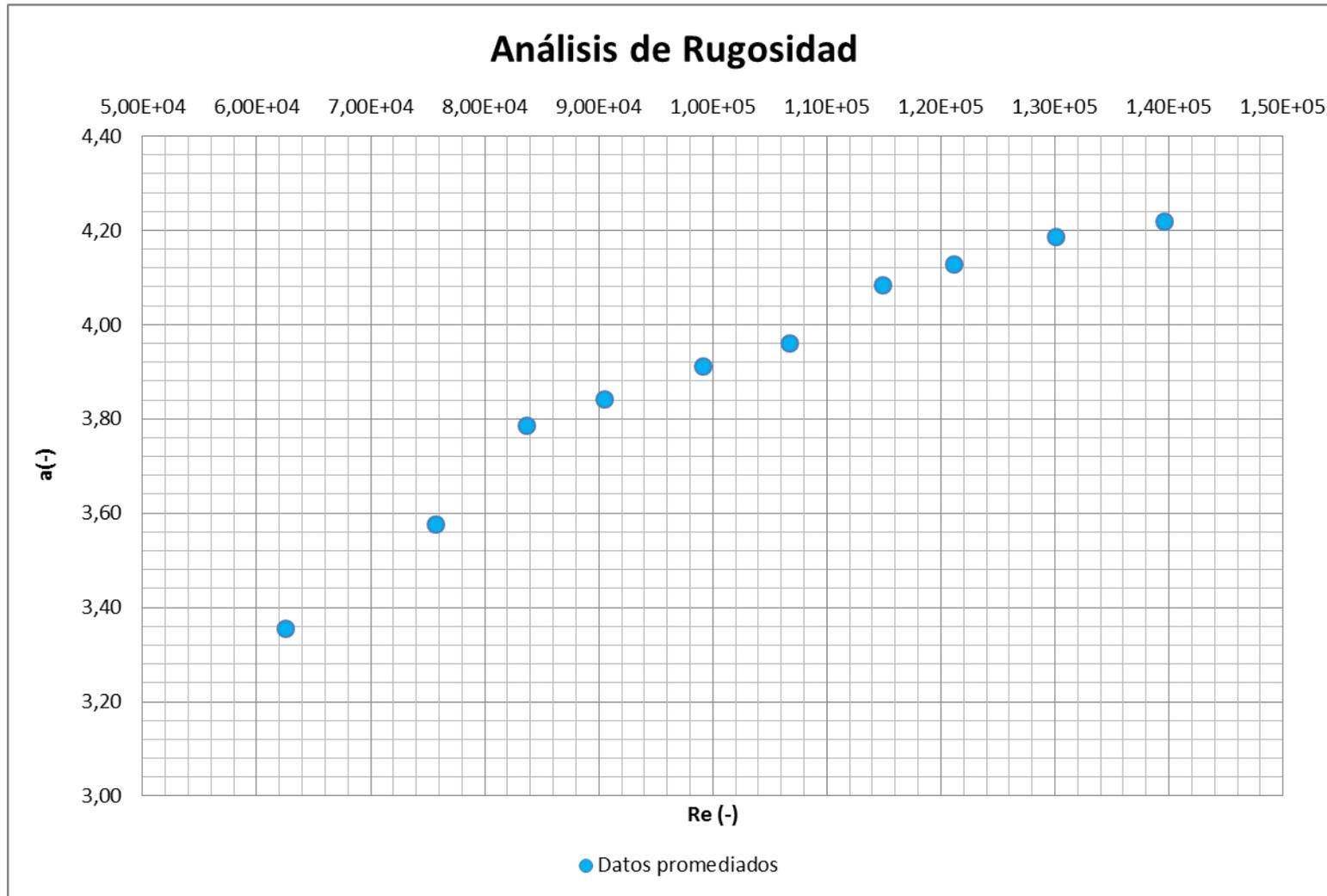
**Semana 6: Marzo 9 de 2012**

Marzo 9 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
18,56 L/s	0,0171	138737,14	0,0194	140335,73	0,0181	139589,44	0,0357	4,21818	2,4199E-19
17,25 L/s	0,0177	131121,45	0,0189	131121,45	0,0184	130068,85	0,0374	4,18694	-6,6870E-19
16,07 L/s	0,0180	120368,20	0,0193	121978,81	0,0186	121152,11	0,0382	4,12846	-2,4199E-19
15,21 L/s	0,0180	113784,06	0,0196	115617,94	0,0188	114943,90	0,0387	4,08433	-1,6805E-19
14,13 L/s	0,0182	105973,46	0,0195	107715,59	0,0189	106782,42	0,0372	3,96024	8,0662E-19
13,12 L/s	0,0184	98672,90	0,0200	99787,39	0,0192	99180,15	0,0381	3,91133	-1,6214E-18
11,97 L/s	0,0184	89770,47	0,0208	91235,90	0,0195	90470,47	0,0386	3,84032	3,2591E-19
11,05 L/s	0,0181	83016,46	0,0213	84791,54	0,0198	83709,89	0,0390	3,78602	-3,3785E-19
9,99 L/s	0,0191	74979,55	0,0209	76312,68	0,0200	75687,32	0,0333	3,57706	1,6546E-19
8,24 L/s	0,0187	61551,90	0,0233	63272,09	0,0205	62562,96	0,0263	3,35583	-3,5456E-19



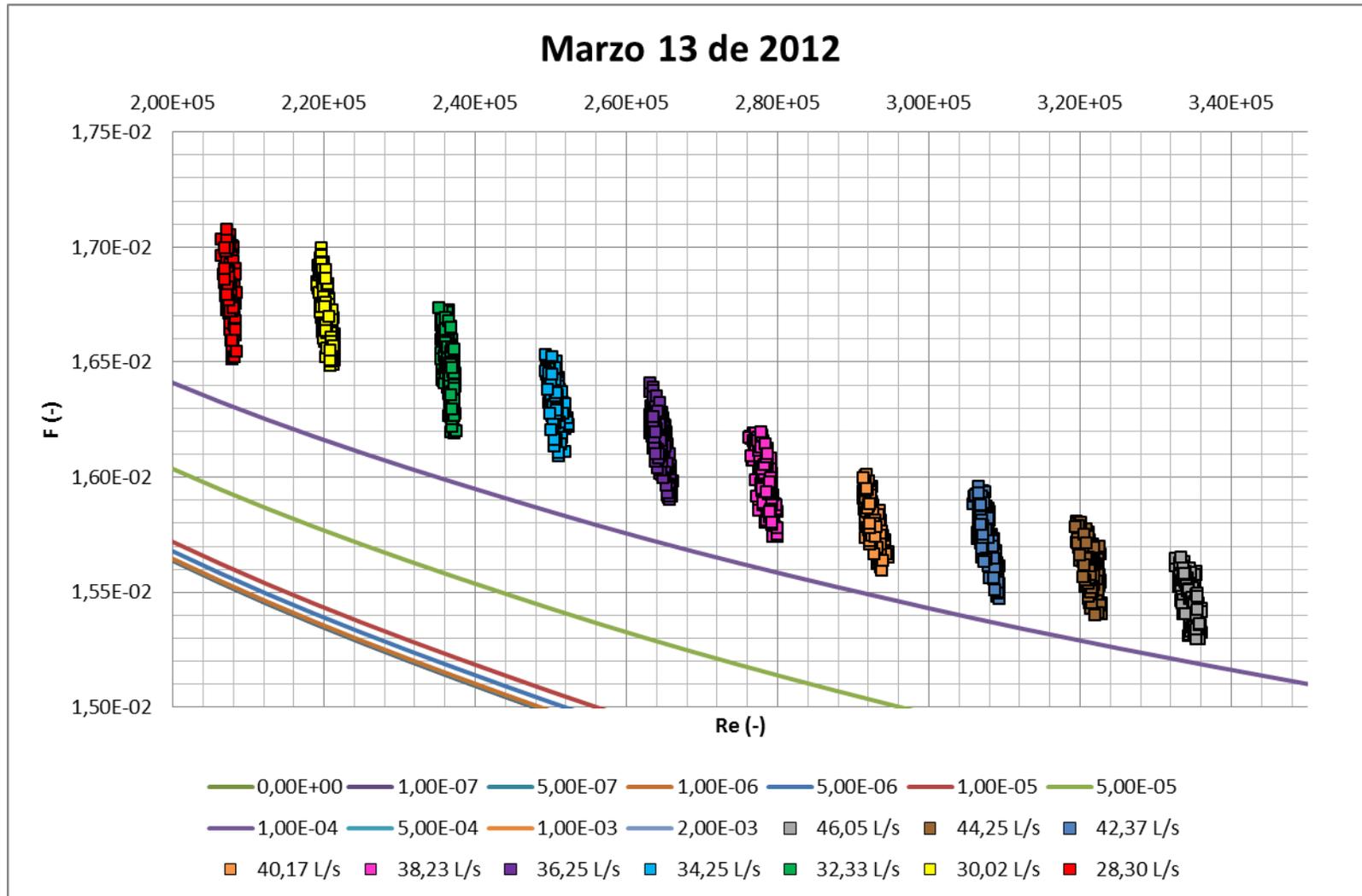


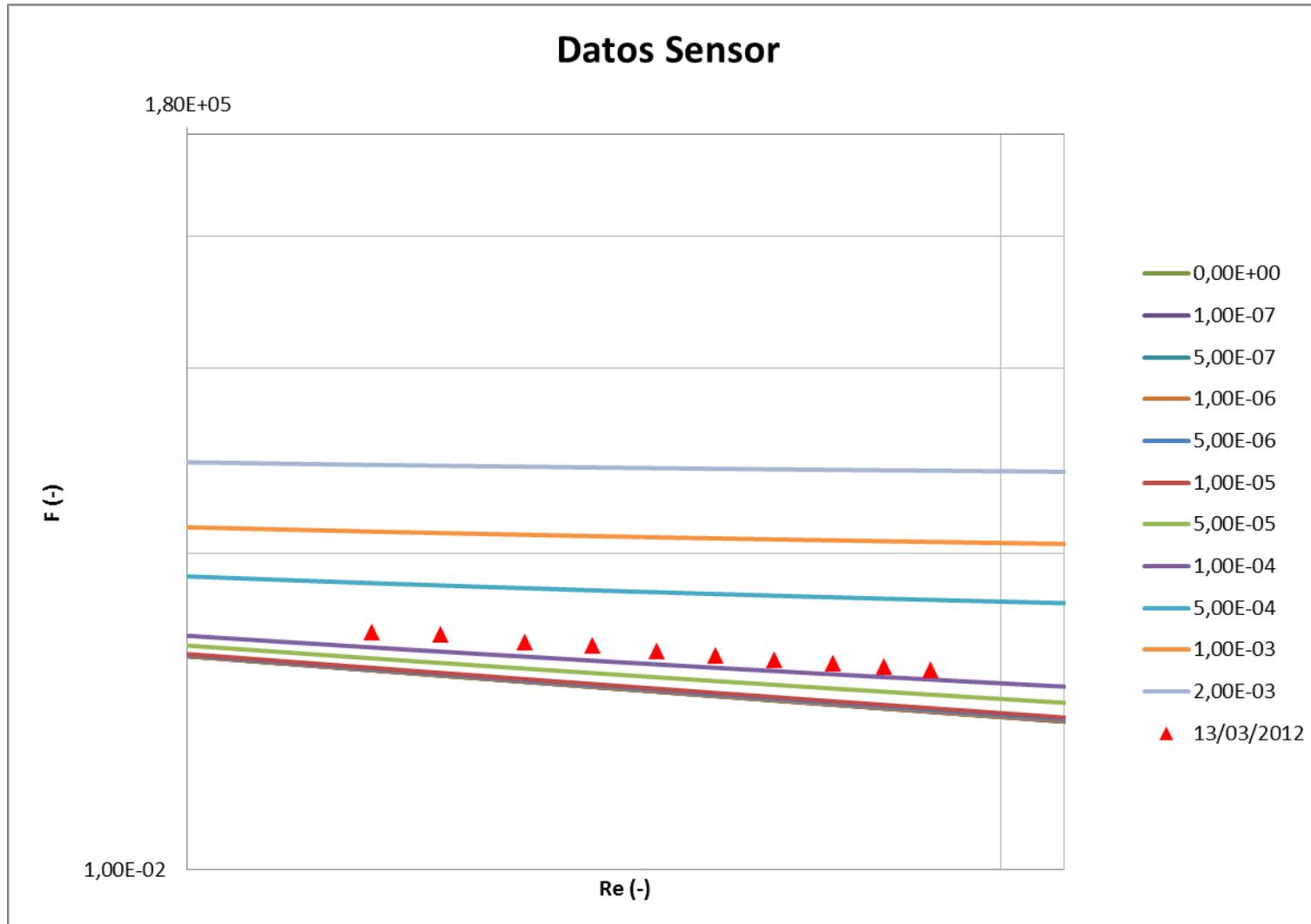


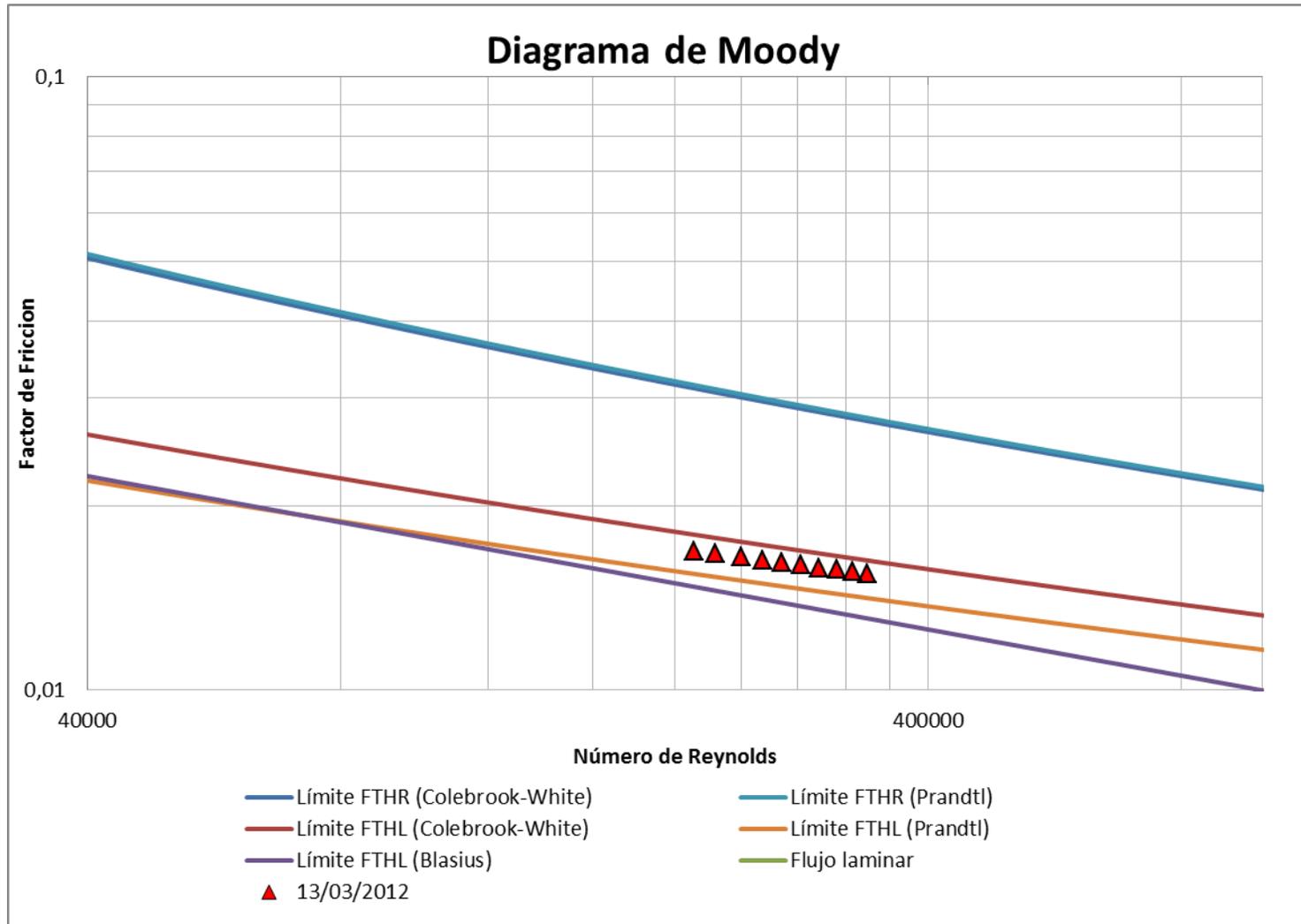


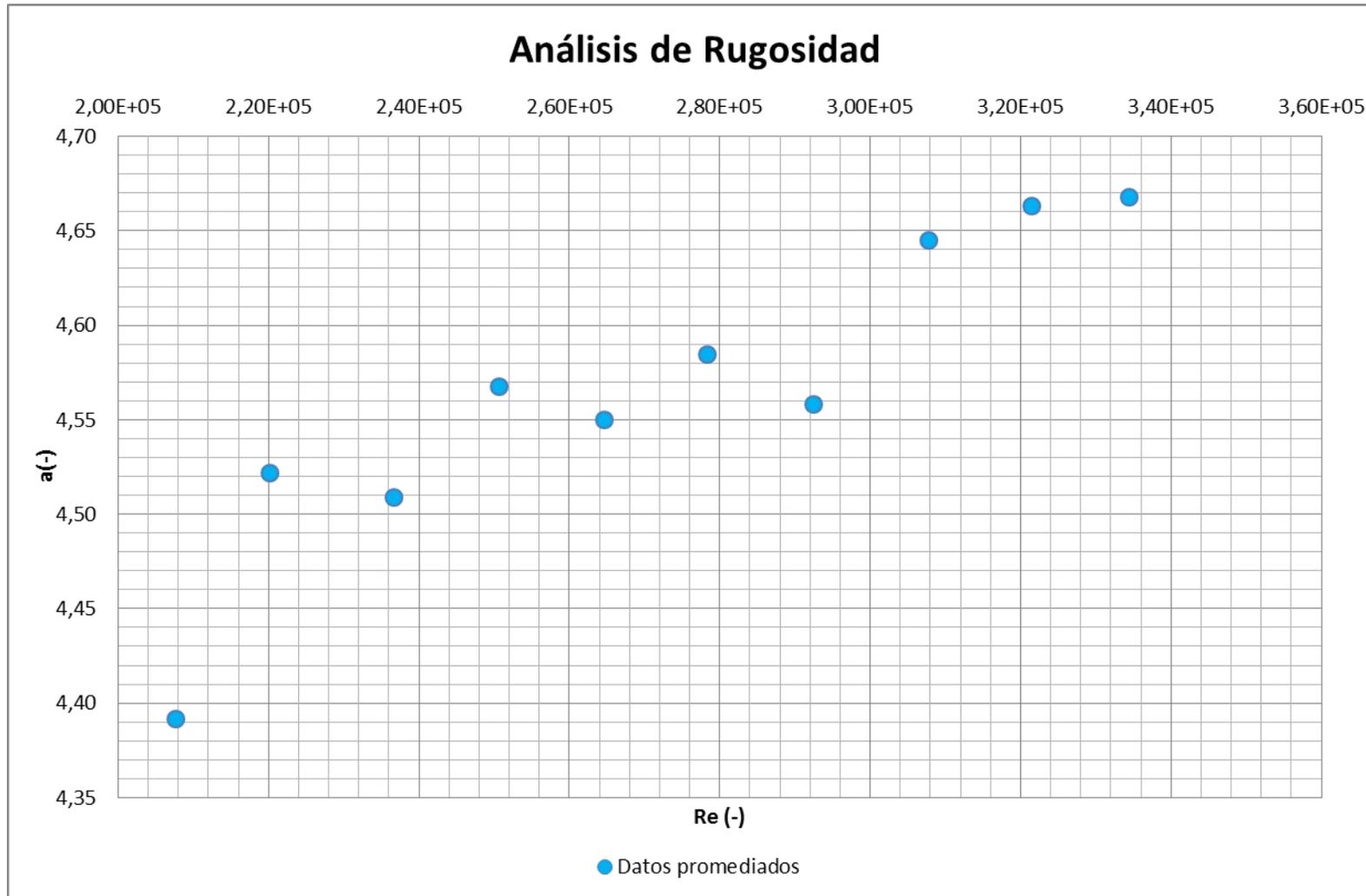
**Semana 7: Marzo 13 de 2012**

Marzo 13 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
46,05 L/s	0,0153	332645,87	0,0156	336097,21	0,0155	334510,72	0,0210	4,66773	1,5722E-35
44,25 L/s	0,0154	322926,27	0,0158	322926,27	0,0156	321447,15	0,0218	4,66309	6,9607E-19
42,37 L/s	0,0155	305939,35	0,0160	309402,08	0,0157	307770,75	0,0225	4,64517	-8,0662E-20
40,17 L/s	0,0156	291289,73	0,0160	294719,03	0,0158	292542,73	0,0224	4,55794	4,2012E-20
38,23 L/s	0,0157	276253,64	0,0162	280040,73	0,0160	278365,75	0,0238	4,58453	4,2454E-20
36,25 L/s	0,0159	263117,99	0,0164	266115,83	0,0161	264615,47	0,0245	4,55005	0,0000E+00
34,25 L/s	0,0161	249342,51	0,0165	252354,01	0,0163	250655,03	0,0260	4,56728	2,4320E-19
32,33 L/s	0,0162	235298,05	0,0167	237533,13	0,0165	236619,95	0,0265	4,50871	3,3092E-19
30,02 L/s	0,0165	219159,58	0,0170	221495,85	0,0167	220233,99	0,0286	4,52157	-3,3263E-19
28,30 L/s	0,0165	206412,42	0,0171	208453,23	0,0168	207642,57	0,0278	4,39162	1,6805E-19



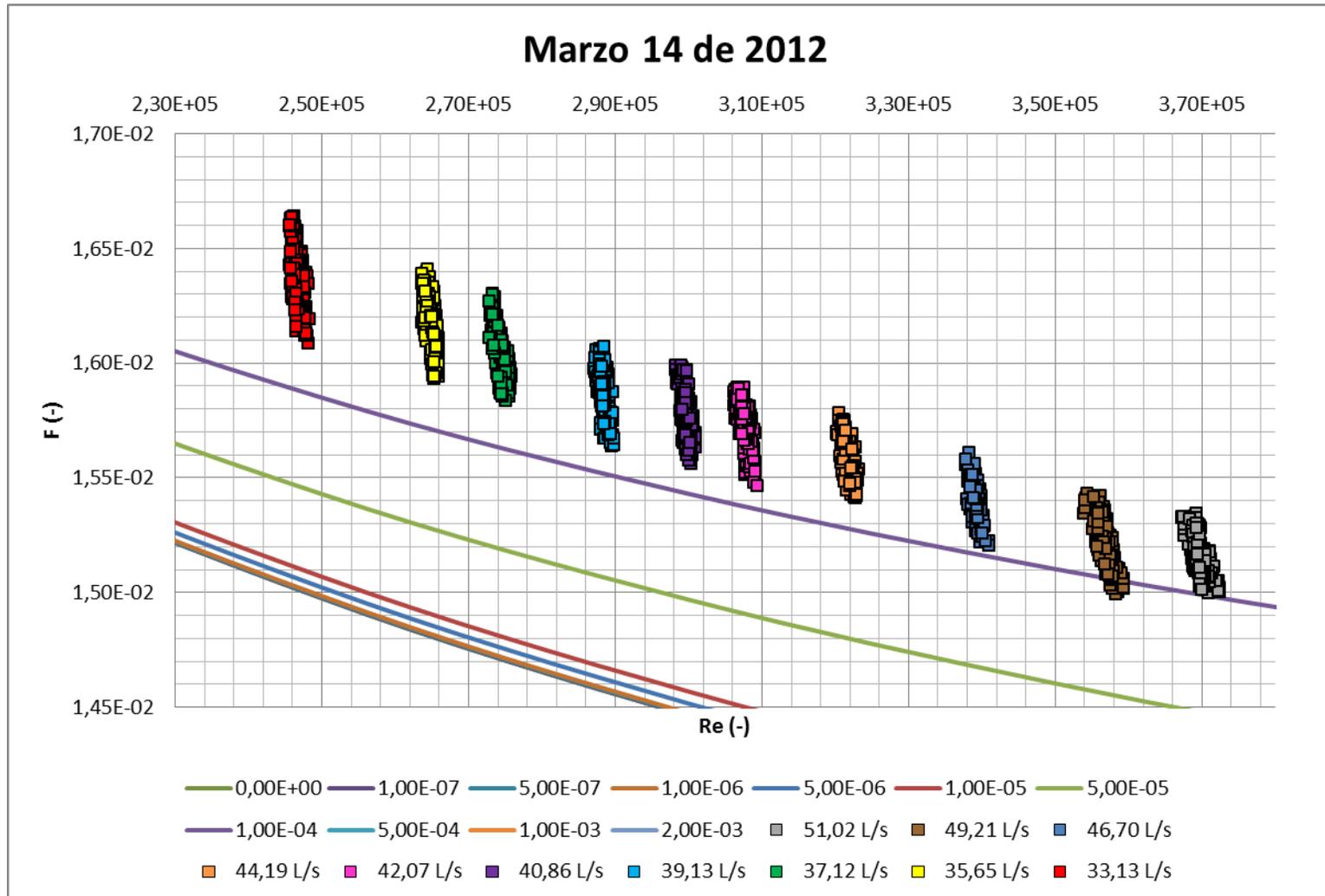


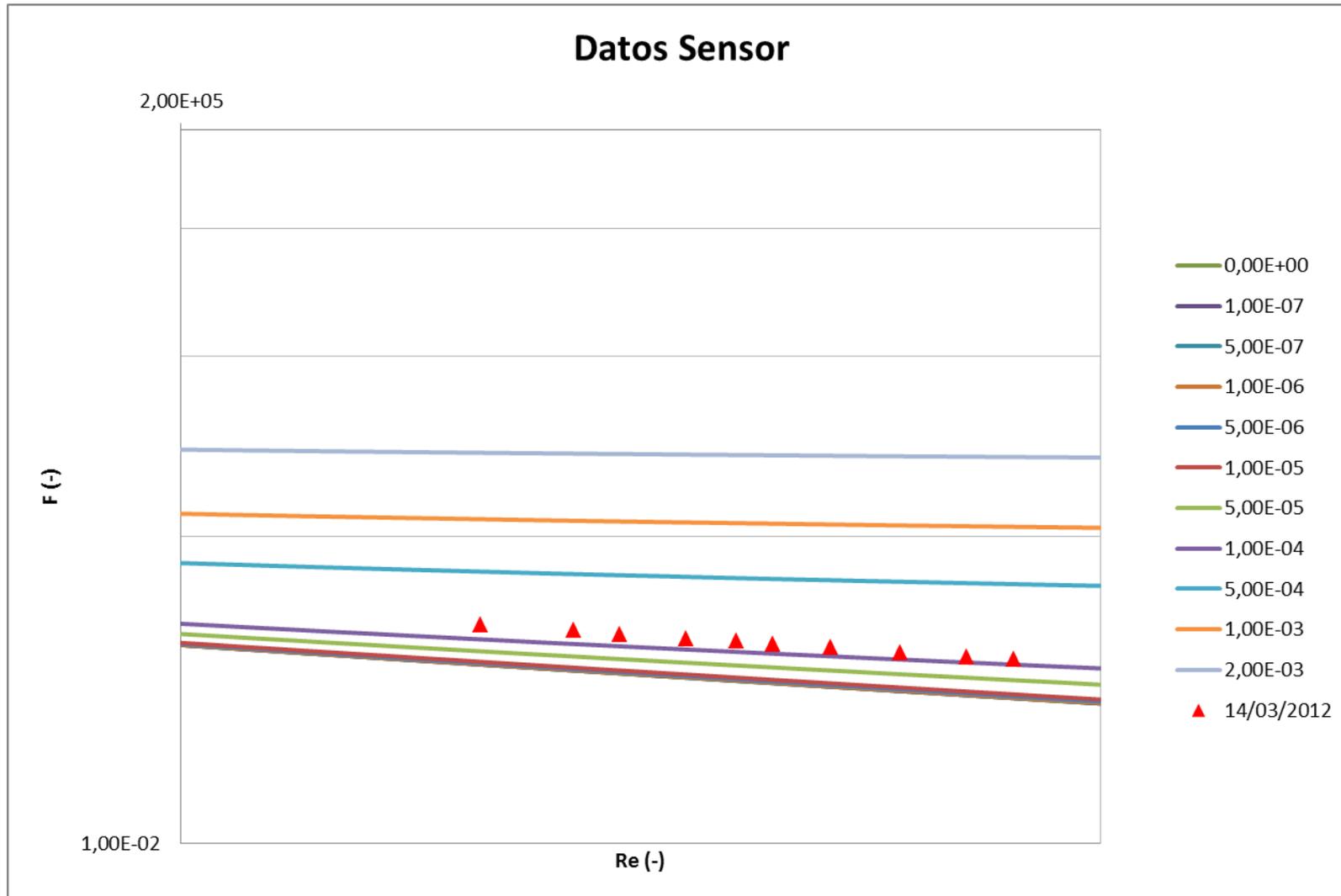


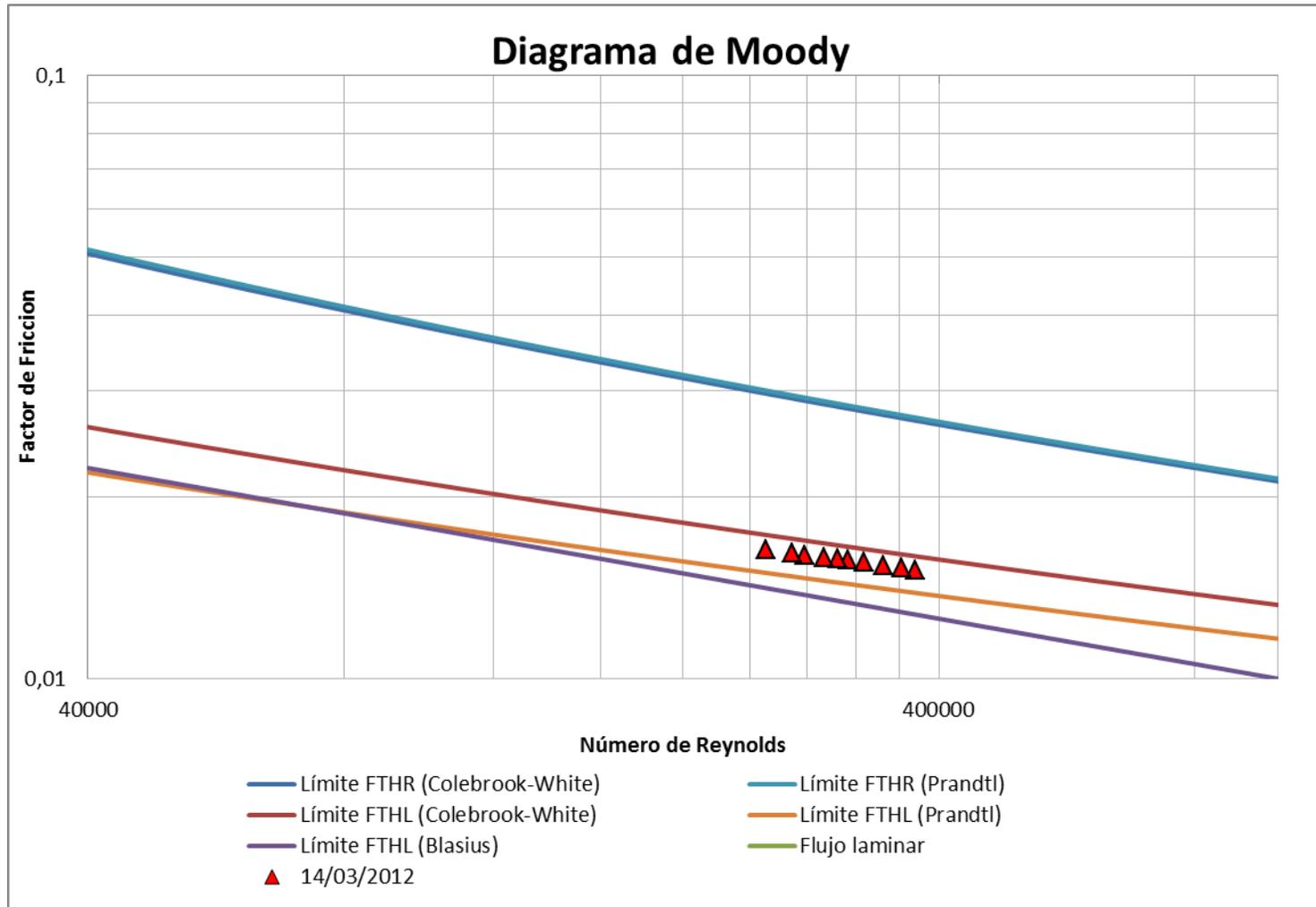


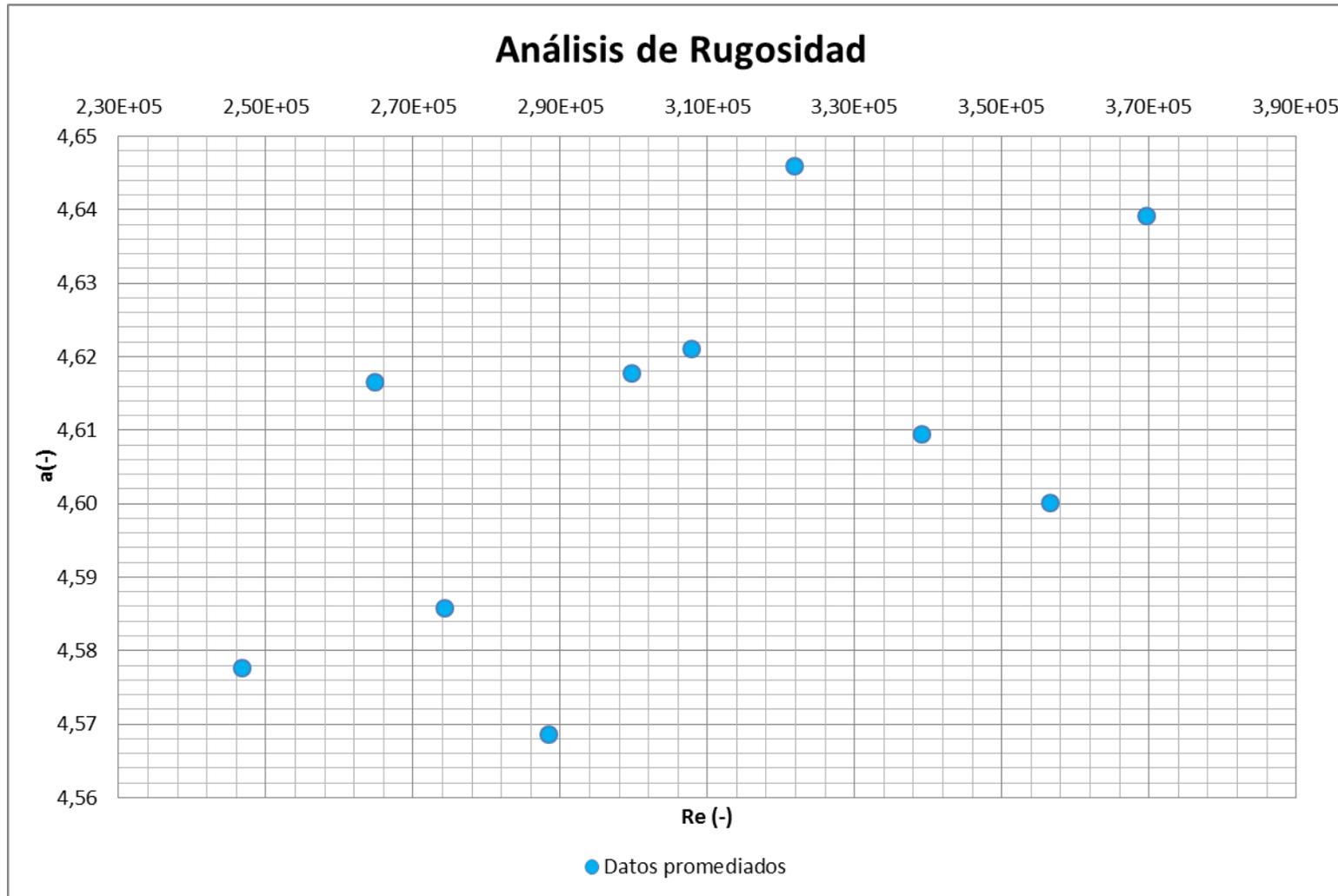
**Semana 7: Marzo 14 de 2012**

Marzo 14 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
51,02 L/s	0,0150	367282,45	0,0153	372476,14	0,0152	369696,96	0,0188	4,63914	6,0497E-19
49,21 L/s	0,0150	359390,35	0,0154	359390,35	0,0152	356570,60	0,0190	4,60009	3,6851E-19
46,70 L/s	0,0152	337800,87	0,0156	341046,11	0,0154	339205,23	0,0201	4,60945	2,0166E-19
44,19 L/s	0,0154	320207,49	0,0158	323208,11	0,0156	321803,16	0,0215	4,64588	-3,4143E-19
42,07 L/s	0,0155	306246,98	0,0159	309342,97	0,0157	307914,86	0,0221	4,62103	8,1891E-20
40,86 L/s	0,0156	298237,73	0,0160	301007,16	0,0158	299777,01	0,0227	4,61779	-2,0473E-19
39,13 L/s	0,0156	287108,82	0,0161	289792,10	0,0159	288502,29	0,0228	4,56853	2,0166E-19
37,12 L/s	0,0158	272842,51	0,0163	275881,54	0,0160	274359,60	0,0242	4,58578	0,0000E+00
35,65 L/s	0,0159	263677,59	0,0164	266006,20	0,0162	264822,66	0,0255	4,61649	0,0000E+00
33,13 L/s	0,0161	245562,58	0,0166	248379,53	0,0164	246723,42	0,0266	4,57765	1,7254E-19



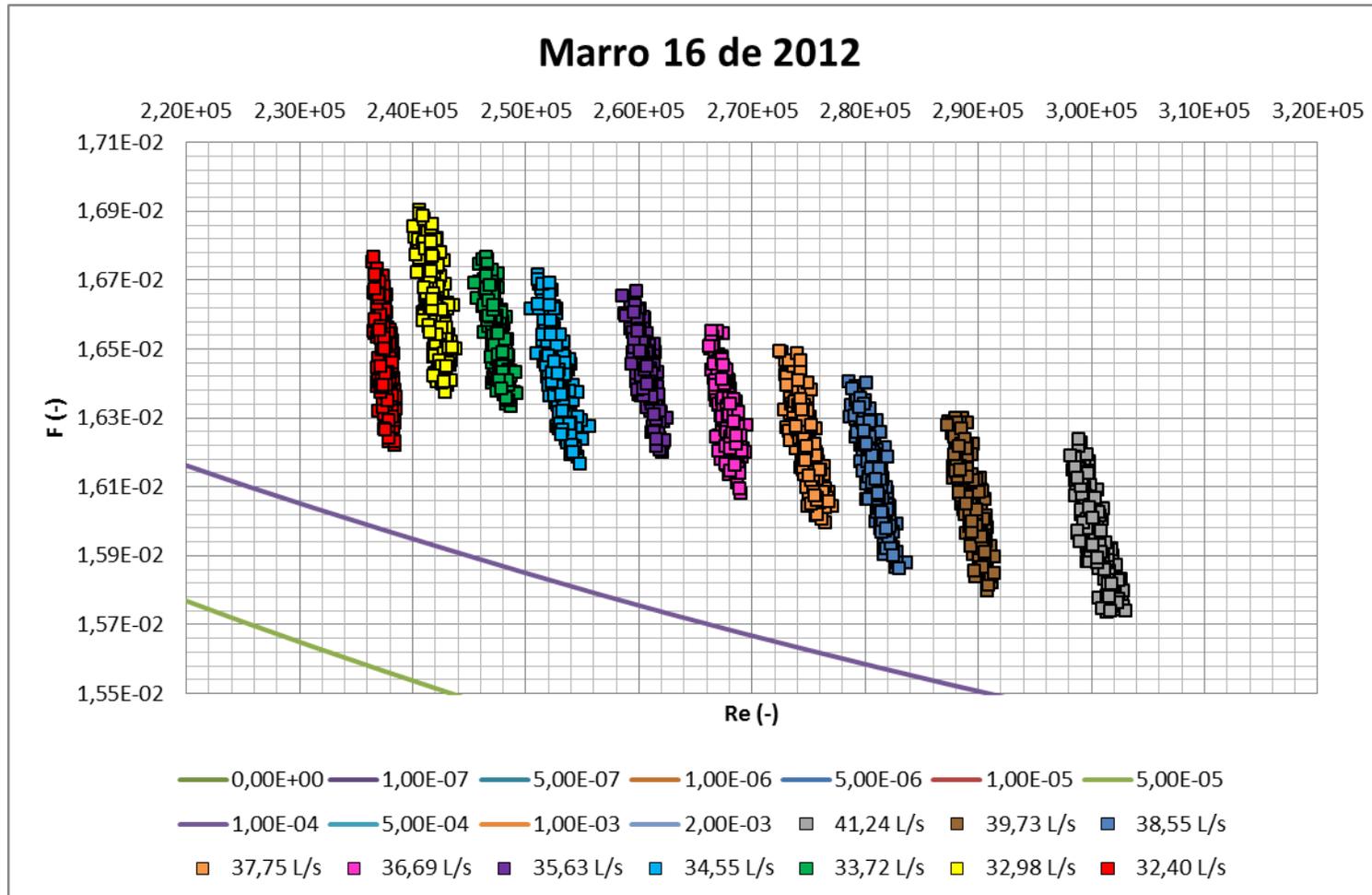


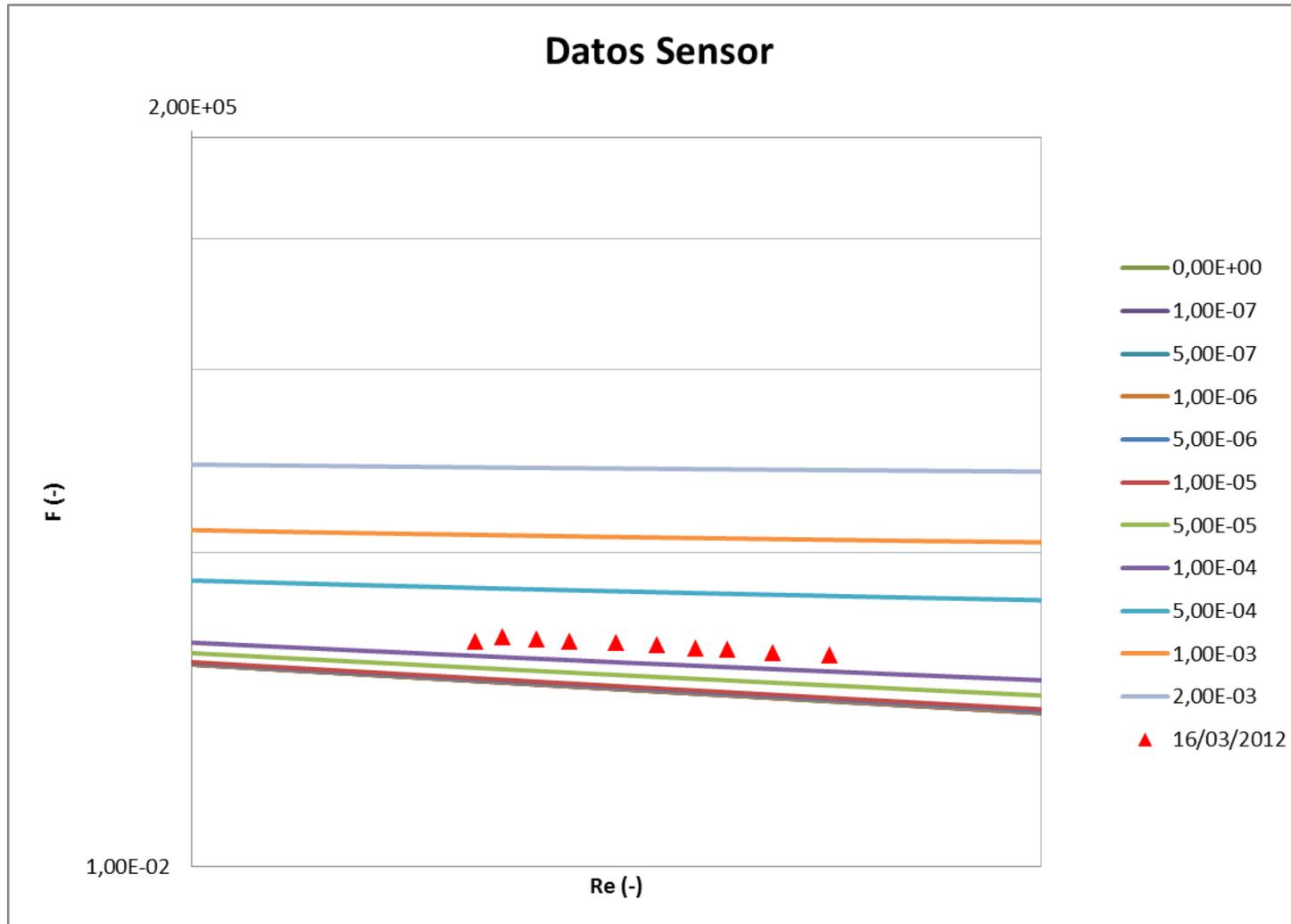


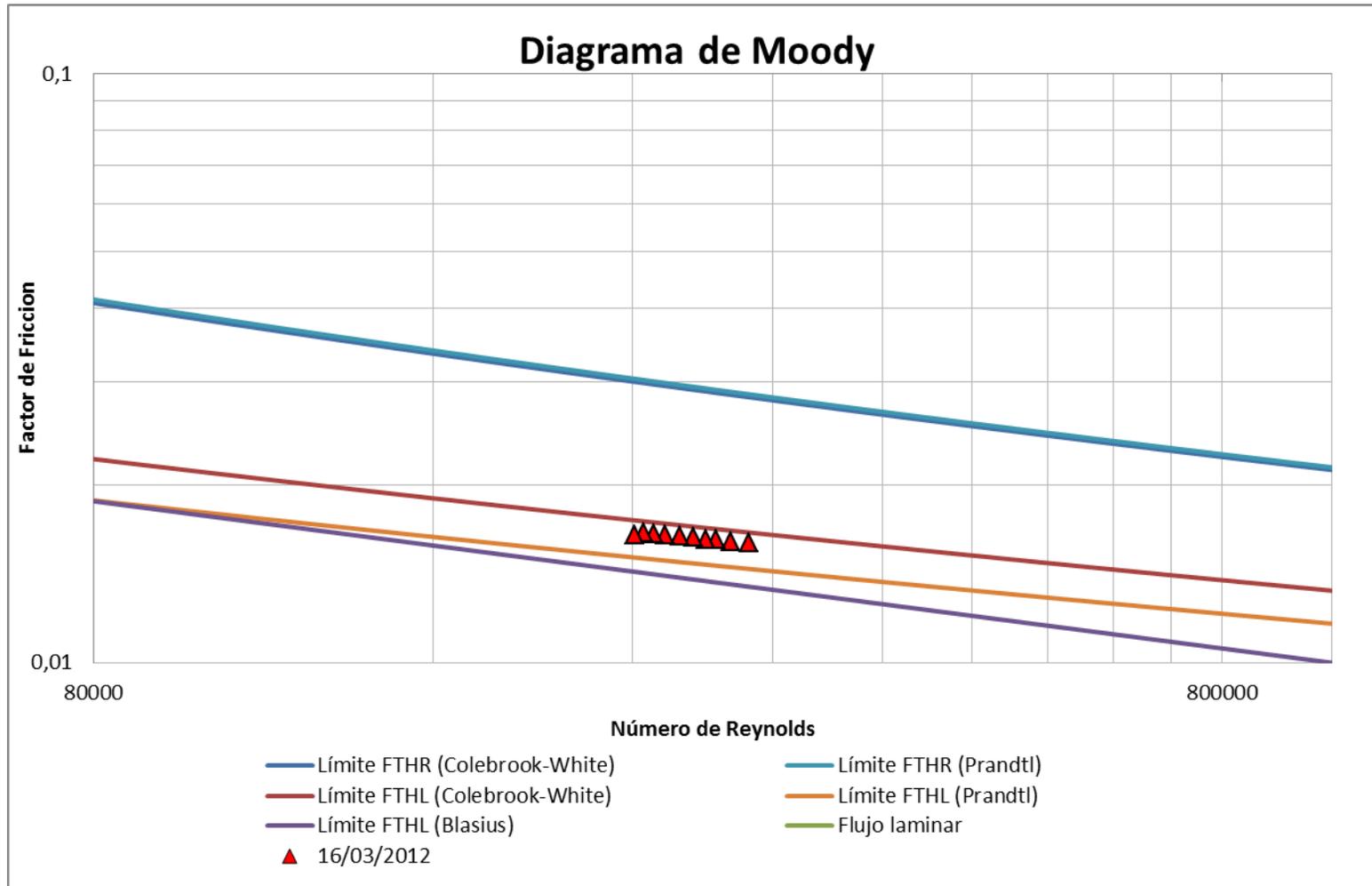


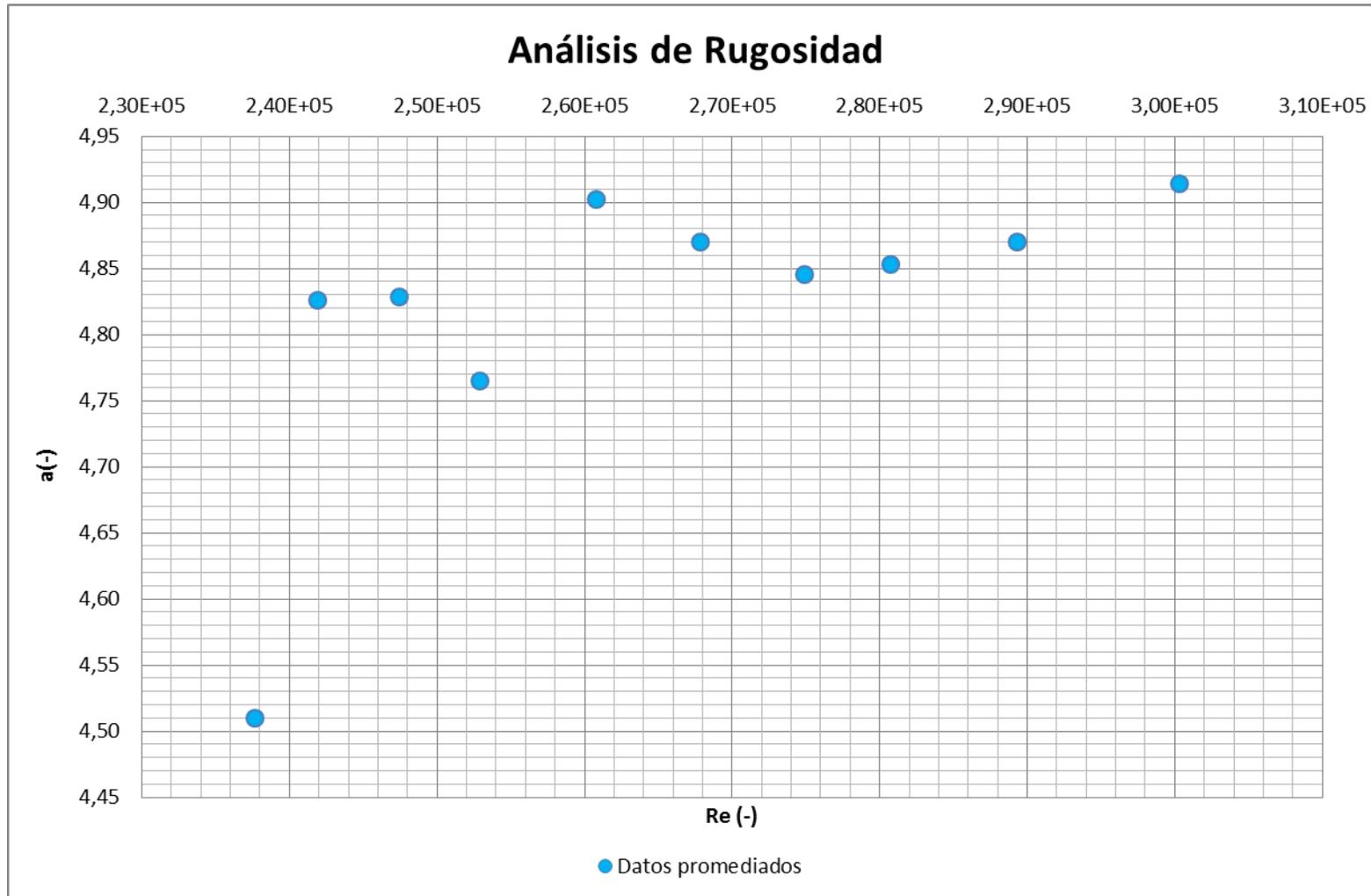
**Semana 7: Marzo 16 de 2012**

Marzo 16 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
41,24 L/s	0,0157	298154,68	0,0162	303006,60	0,0160	300327,85	0,0265	4,91416	-8,2308E-20
39,73 L/s	0,0158	291457,64	0,0163	291457,64	0,0161	289323,71	0,0269	4,86966	0,0000E+00
38,55 L/s	0,0159	278575,31	0,0164	283630,13	0,0162	280750,27	0,0274	4,85287	0,0000E+00
37,75 L/s	0,0160	272467,28	0,0165	277124,02	0,0162	274886,06	0,0278	4,84533	0,0000E+00
36,69 L/s	0,0161	266209,20	0,0166	269512,58	0,0163	267854,69	0,0289	4,87012	0,0000E+00
35,63 L/s	0,0162	258568,62	0,0167	262545,84	0,0164	260761,03	0,0301	4,90225	0,0000E+00
34,55 L/s	0,0162	250444,86	0,0167	255642,55	0,0164	252871,99	0,0289	4,76500	-2,5339E-19
33,72 L/s	0,0163	245543,57	0,0168	249190,56	0,0166	247409,14	0,0305	4,82856	8,3588E-20
32,98 L/s	0,0164	240071,61	0,0169	243843,06	0,0166	241936,07	0,0311	4,82563	3,5456E-19
32,40 L/s	0,0162	236506,44	0,0168	238573,79	0,0165	237684,06	0,0264	4,50951	8,1477E-20



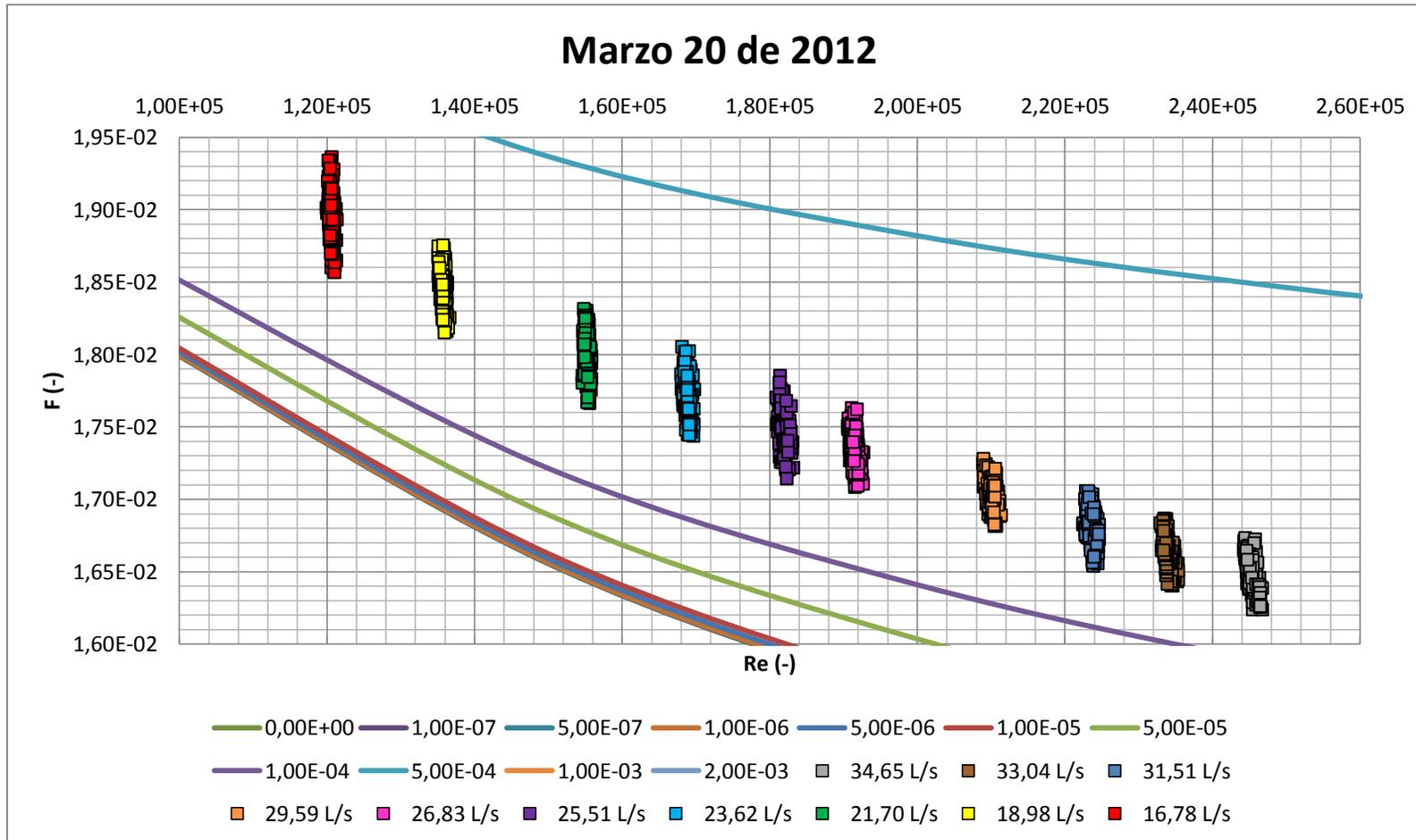


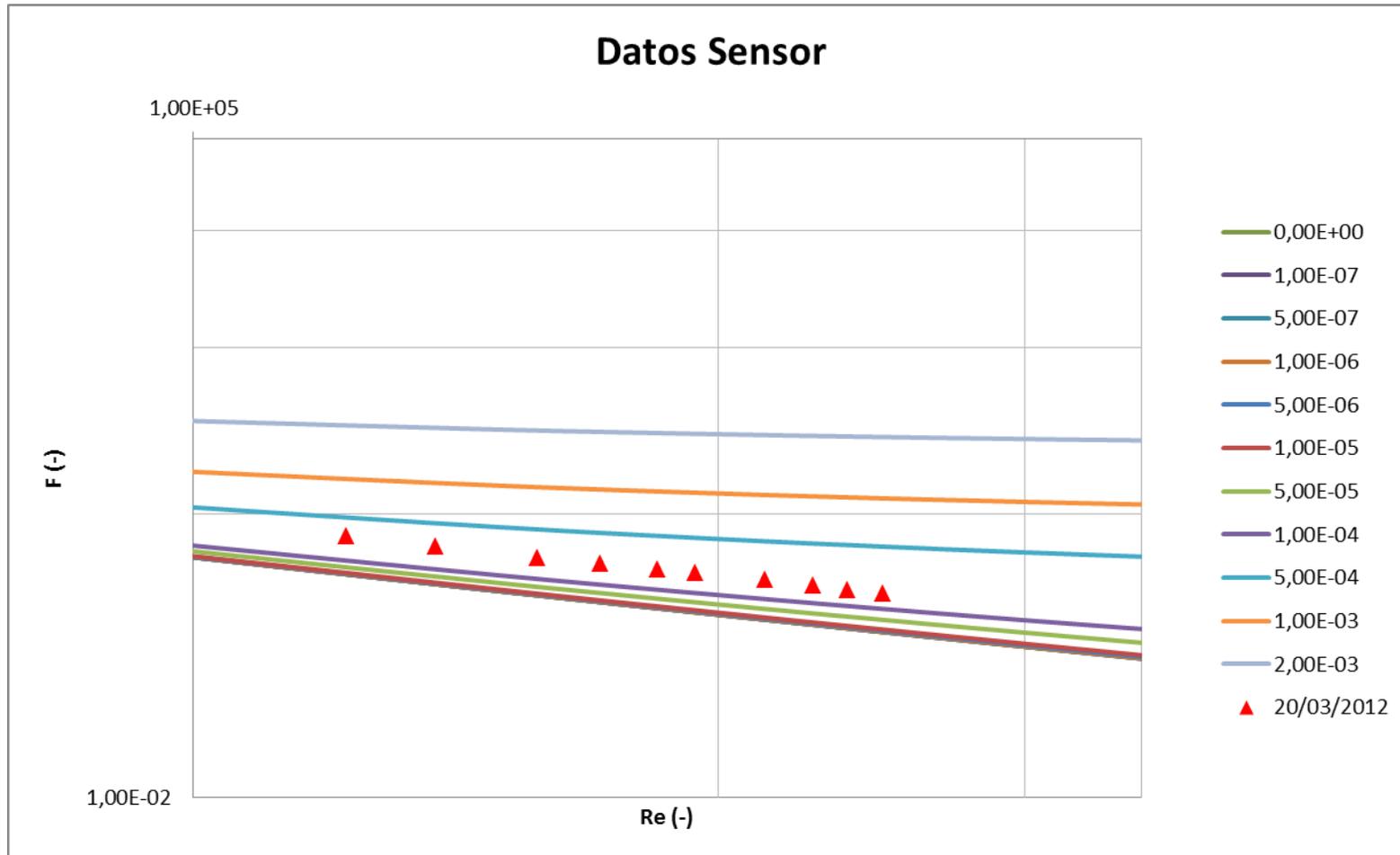


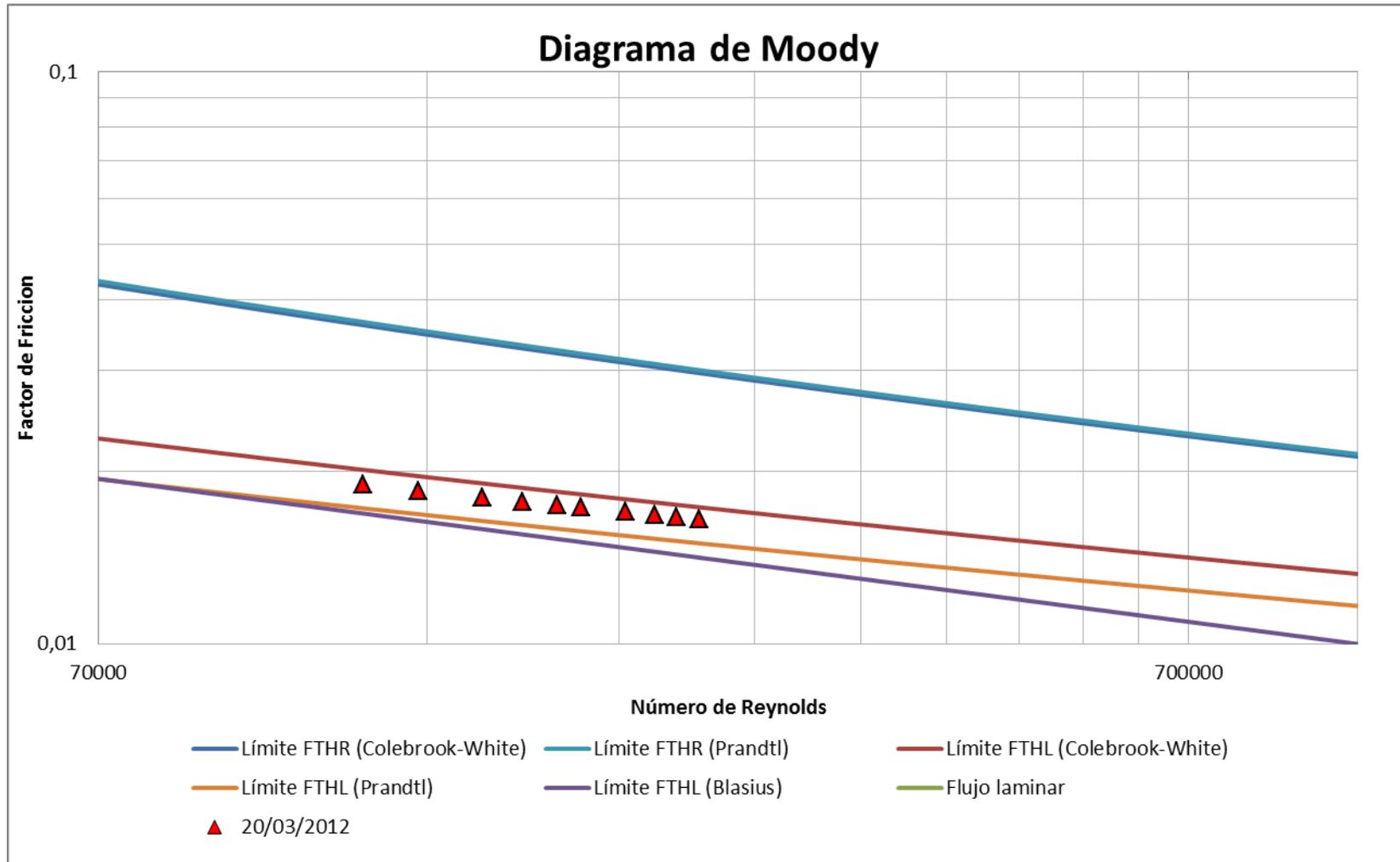


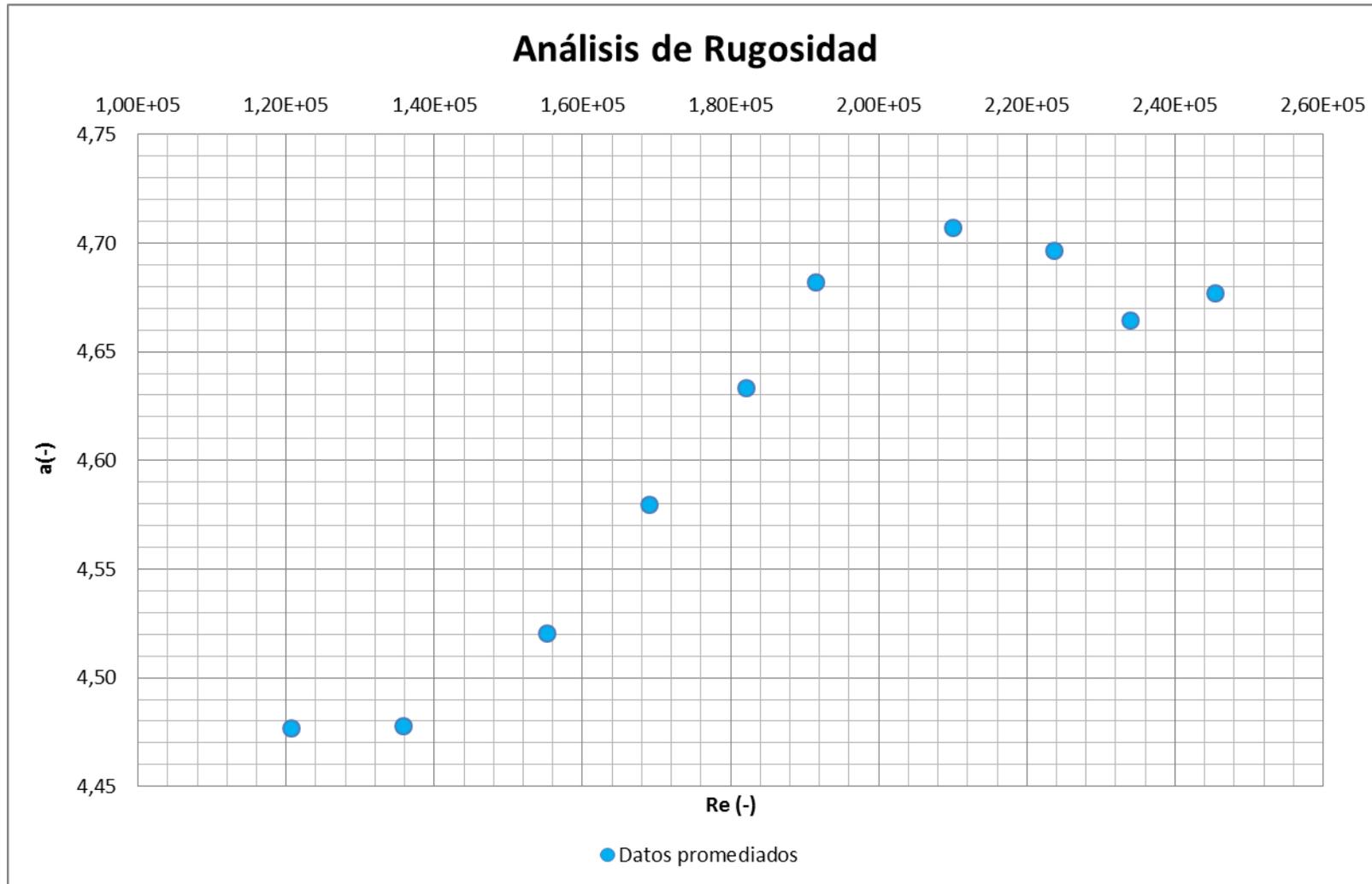
**Semana 8: Marzo 20 de 2012**

Marzo 20 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
34,65 L/s	0,0162	244272,40	0,0167	246777,38	0,0165	245436,28	0,0283	4,67680	1,6462E-19
33,04 L/s	0,0164	235395,46	0,0169	235395,46	0,0166	234014,58	0,0294	4,66429	5,0153E-19
31,51 L/s	0,0165	222501,81	0,0171	224664,68	0,0168	223746,44	0,0312	4,69659	-3,0815E-35
29,59 L/s	0,0168	208948,83	0,0173	211339,25	0,0170	210093,67	0,0333	4,70723	0,0000E+00
26,83 L/s	0,0171	190593,57	0,0176	192755,50	0,0173	191516,04	0,0358	4,68188	3,2265E-19
25,51 L/s	0,0171	180934,66	0,0179	183256,50	0,0175	182083,58	0,0365	4,63314	-1,6132E-19
23,62 L/s	0,0174	168032,33	0,0181	169811,64	0,0177	168981,45	0,0380	4,57961	-2,6303E-19
21,70 L/s	0,0177	154654,14	0,0183	155876,89	0,0180	155289,34	0,0397	4,52044	7,4841E-19
18,98 L/s	0,0182	135103,48	0,0188	136630,73	0,0185	135795,57	0,0439	4,47785	1,0189E-18
16,78 L/s	0,0186	119970,94	0,0194	121385,32	0,0190	120638,08	0,0490	4,47685	0,0000E+00



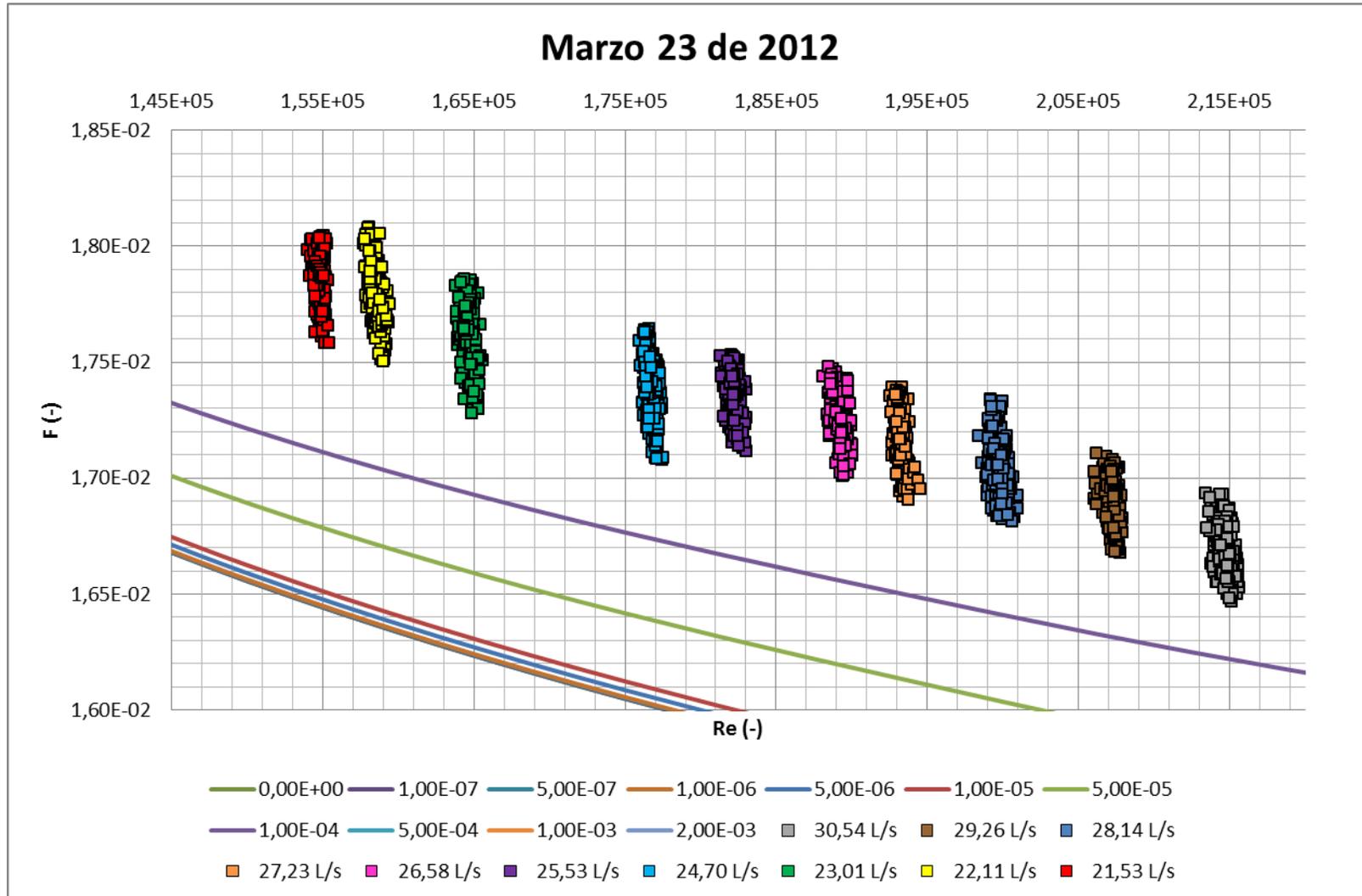


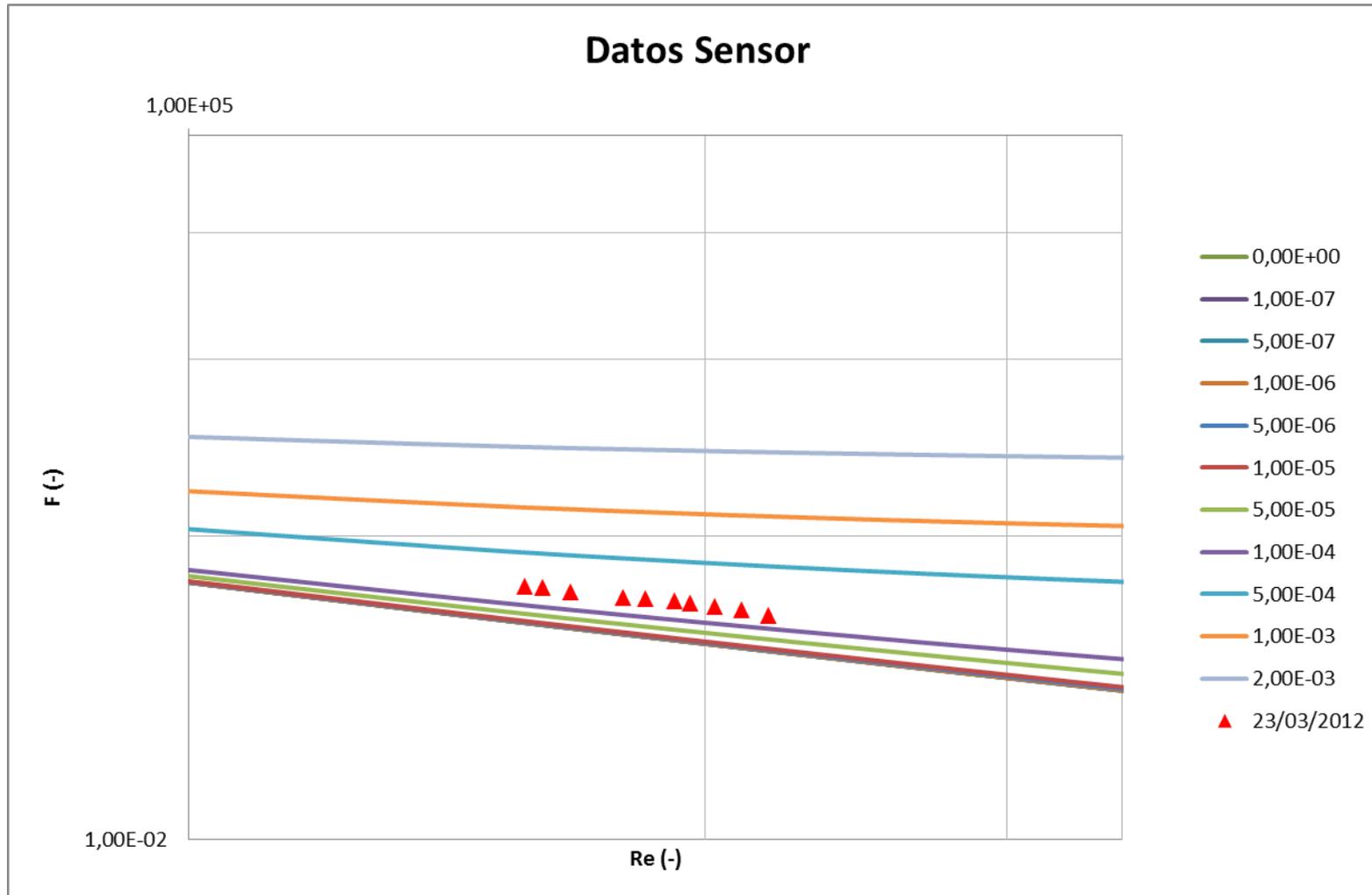


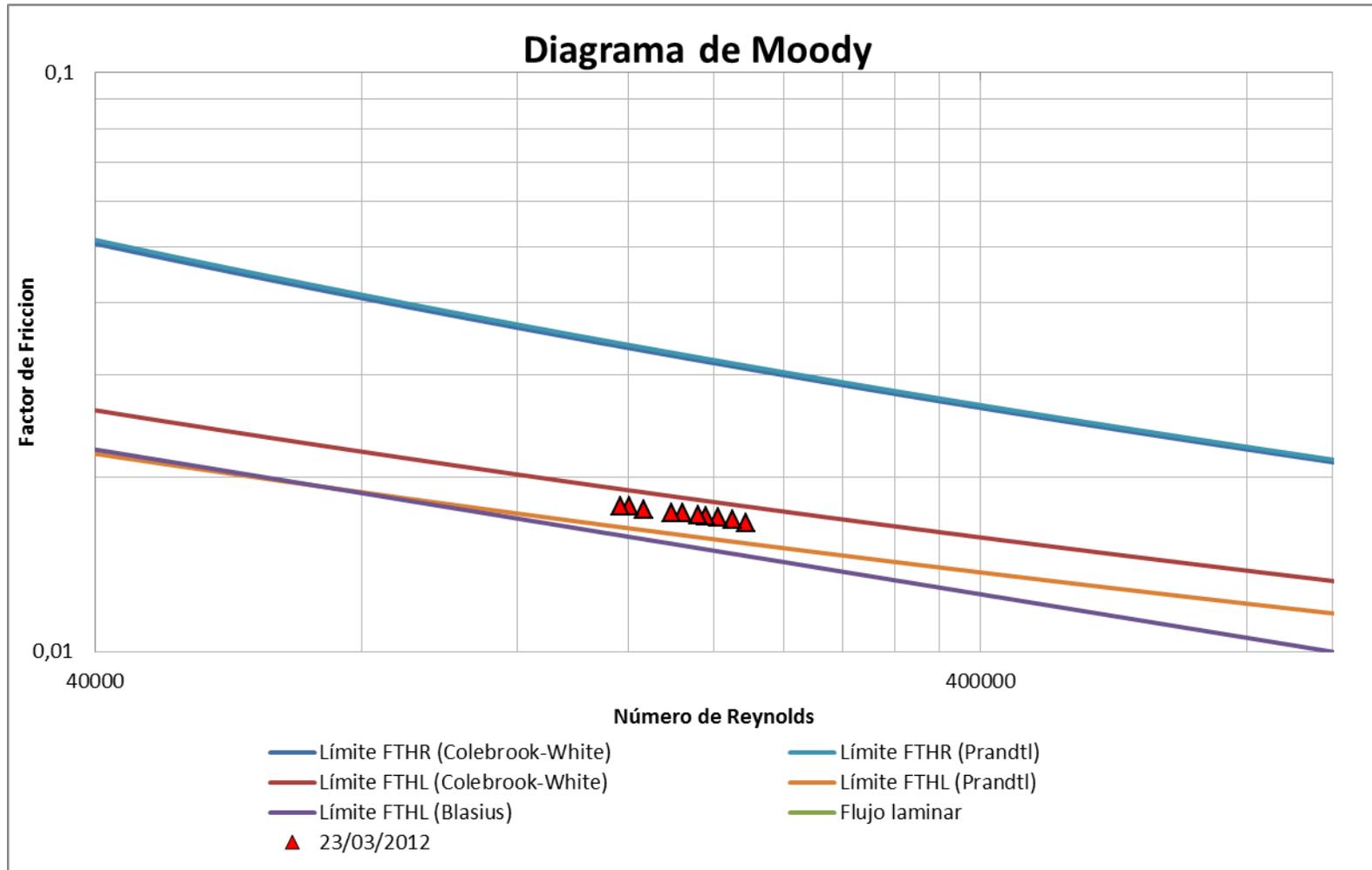


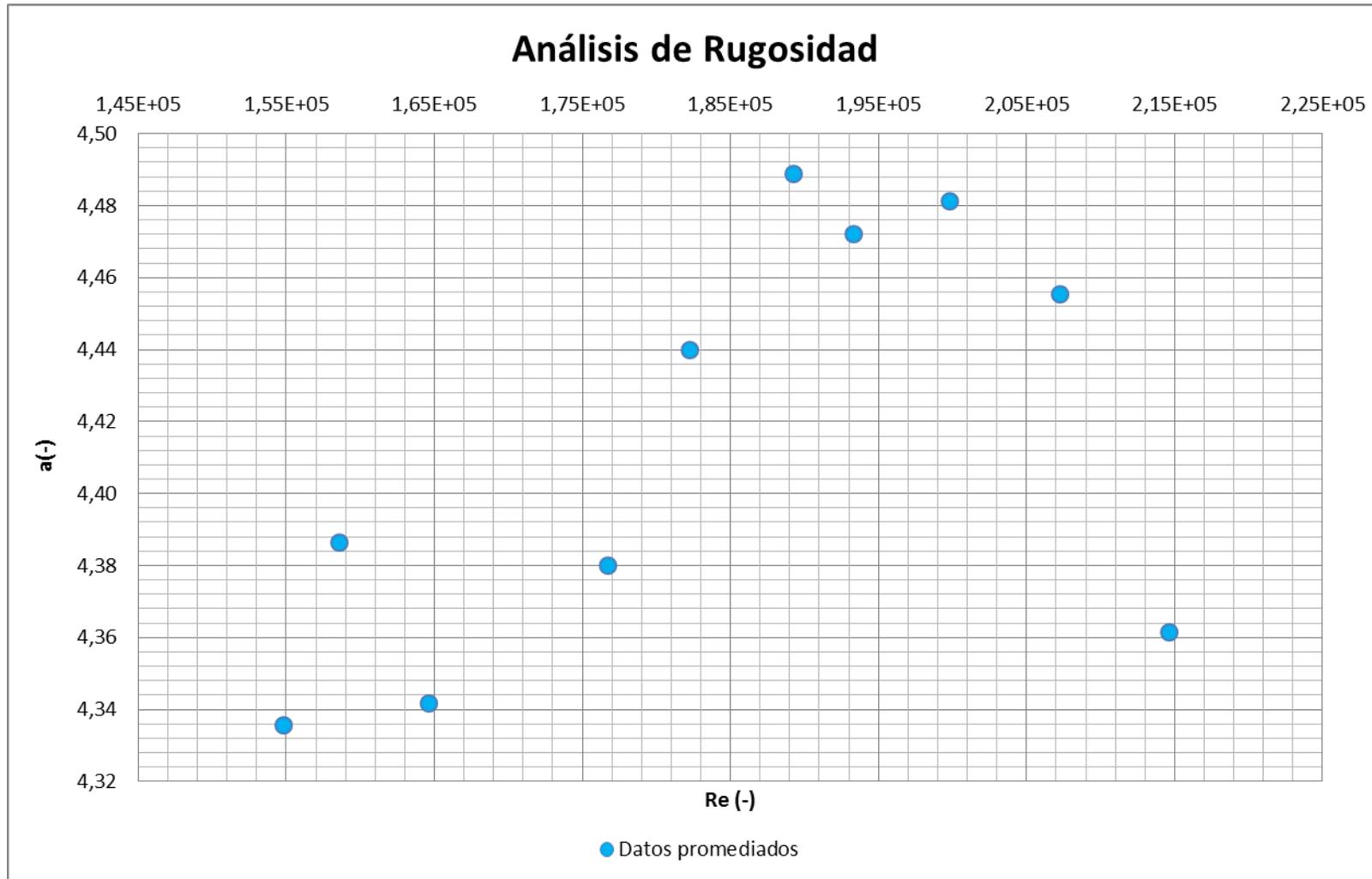
**Semana 8: Marzo 23 de 2012**

Marzo 23 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
30,54 L/s	0,0165	213436,31	0,0169	215636,47	0,0167	214675,40	0,0264	4,36153	-2,4693E-19
29,26 L/s	0,0167	207913,04	0,0171	207913,04	0,0169	207251,01	0,0291	4,45523	3,3435E-19
28,14 L/s	0,0168	198412,22	0,0173	200989,28	0,0170	199794,04	0,0306	4,48123	7,7643E-19
27,23 L/s	0,0169	192556,29	0,0174	194586,45	0,0171	193348,59	0,0314	4,47218	8,2308E-20
26,58 L/s	0,0170	188146,02	0,0175	190054,00	0,0172	189245,72	0,0323	4,48887	5,7911E-19
25,53 L/s	0,0171	181302,88	0,0175	183063,38	0,0173	182240,75	0,0325	4,43991	1,7440E-19
24,70 L/s	0,0171	175983,88	0,0176	177548,43	0,0174	176754,13	0,0321	4,37990	7,4078E-19
23,01 L/s	0,0173	163808,34	0,0179	165578,43	0,0176	164667,69	0,0335	4,34170	-8,2308E-19
22,11 L/s	0,0175	157698,07	0,0181	159425,57	0,0178	158582,07	0,0358	4,38652	1,7440E-19
21,53 L/s	0,0176	153988,12	0,0180	155433,00	0,0178	154805,74	0,0353	4,33555	7,3329E-19



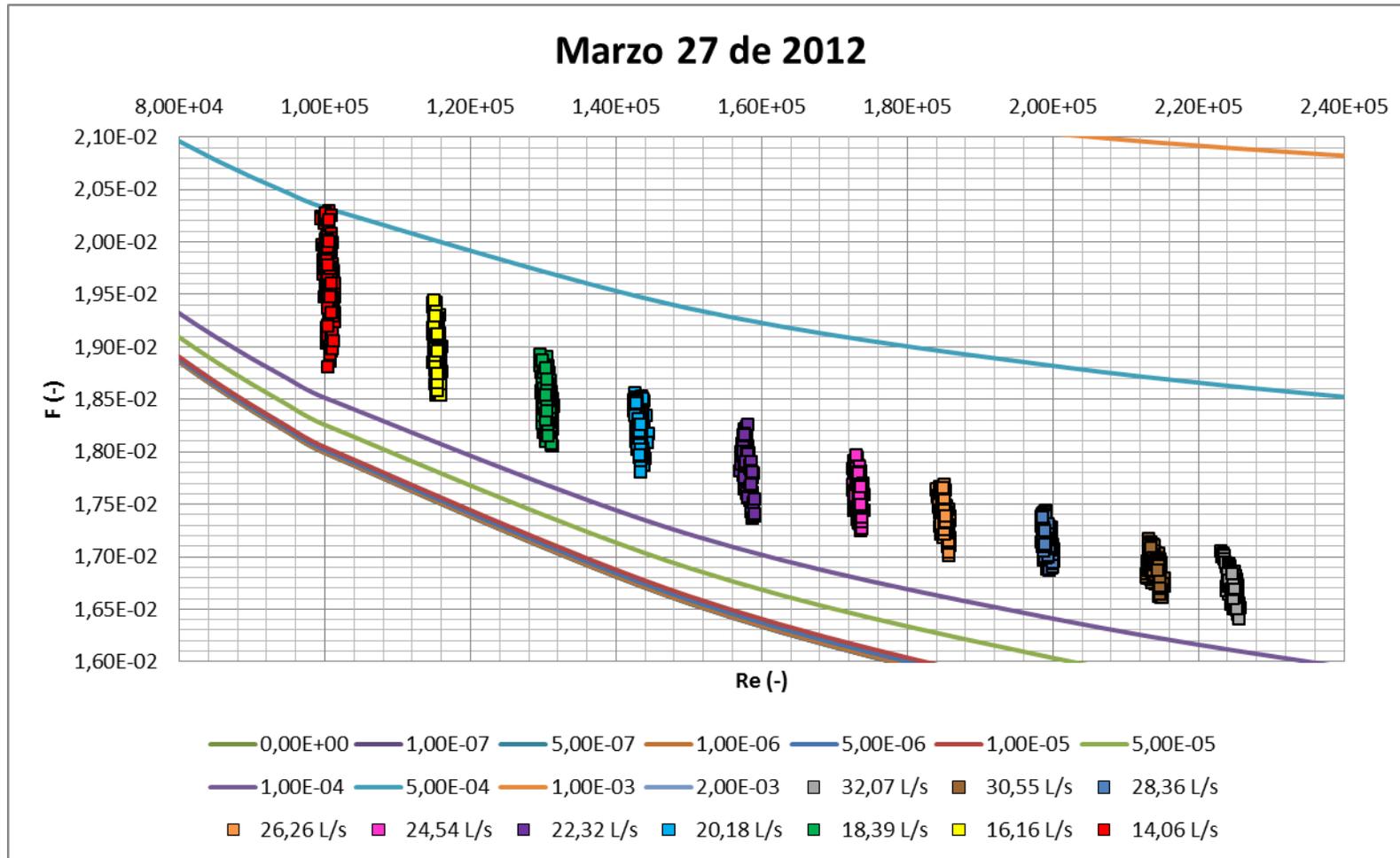


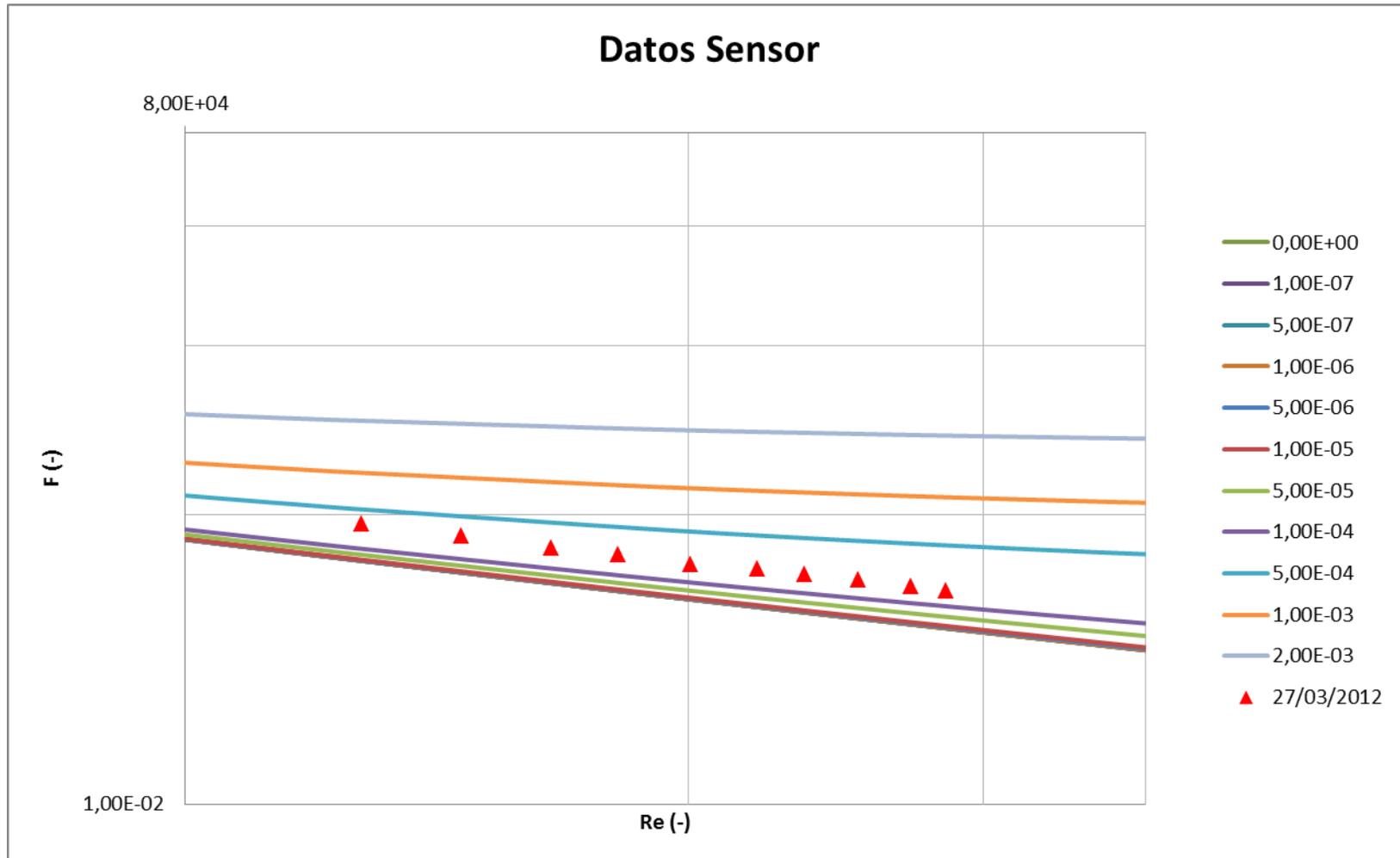


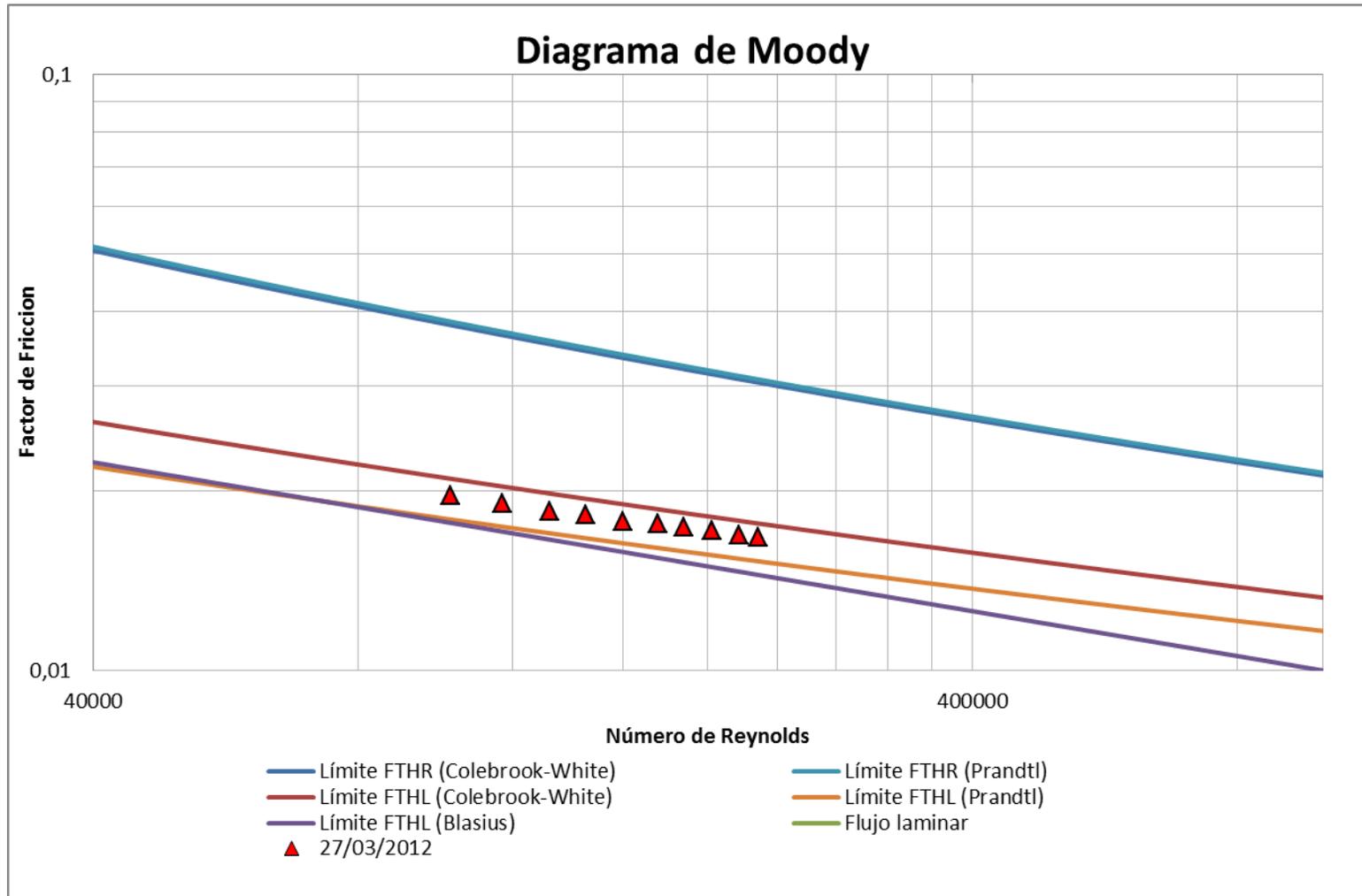


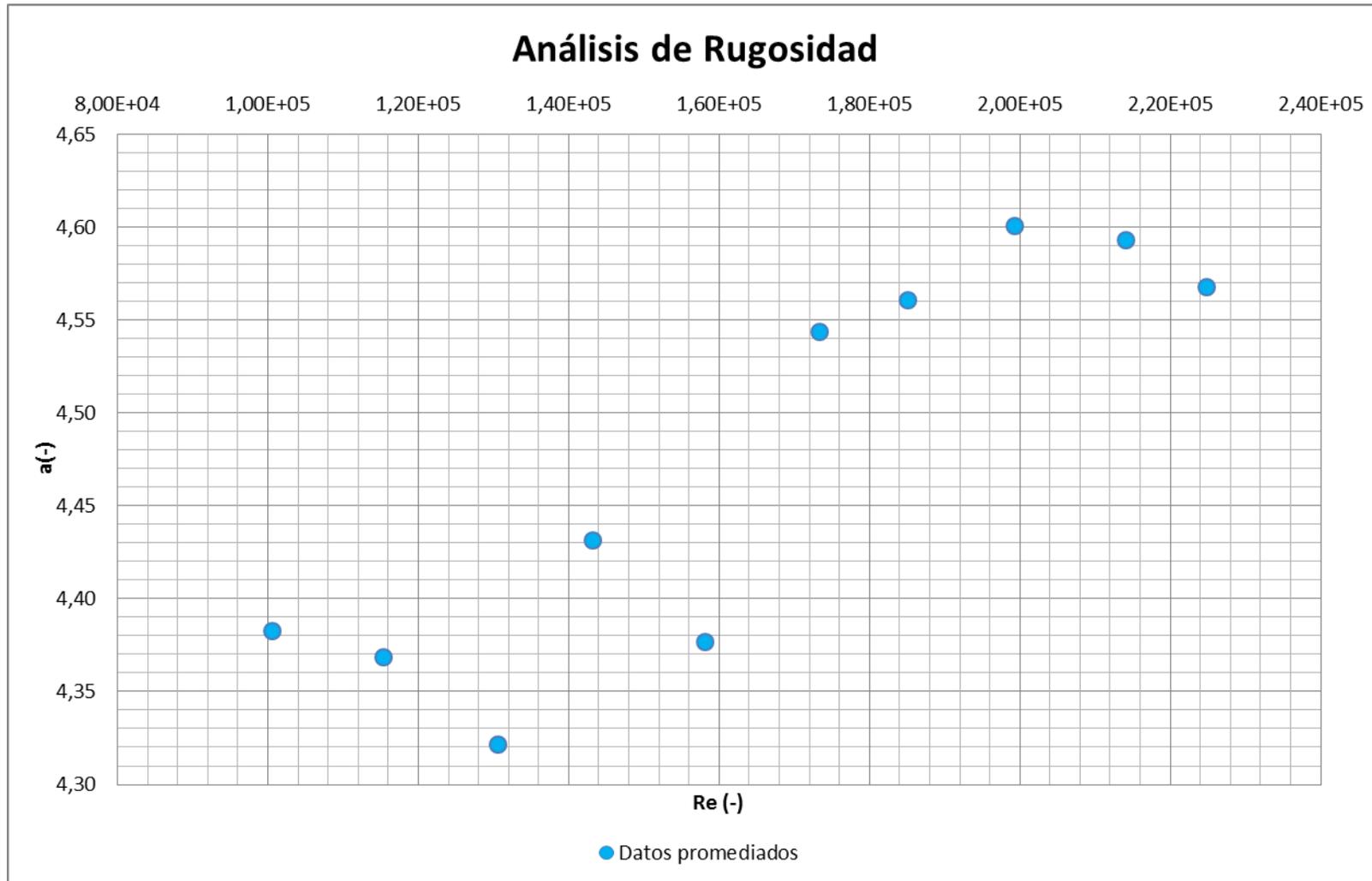
**Semana 9: Marzo 27 de 2012**

Marzo 27 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
32,07 L/s	0,0164	223208,48	0,0171	225816,42	0,0167	224860,06	0,0289	4,56740	-3,2265E-19
30,55 L/s	0,0166	215460,92	0,0172	215460,92	0,0169	214178,09	0,0307	4,59276	-2,5339E-19
28,36 L/s	0,0169	198495,68	0,0174	200206,67	0,0171	199332,27	0,0330	4,60078	-5,6747E-19
26,26 L/s	0,0170	184002,83	0,0177	185944,25	0,0174	185085,81	0,0345	4,56061	0,0000E+00
24,54 L/s	0,0172	172545,55	0,0180	174194,52	0,0176	173353,45	0,0363	4,54385	6,4530E-19
22,32 L/s	0,0174	157126,62	0,0183	159075,33	0,0178	158108,32	0,0356	4,37641	4,0331E-19
20,18 L/s	0,0178	142561,25	0,0186	144445,57	0,0182	143268,82	0,0405	4,43141	-1,6718E-19
18,39 L/s	0,0181	129603,44	0,0189	131530,71	0,0185	130582,05	0,0411	4,32171	-8,1891E-19
16,16 L/s	0,0185	114811,04	0,0194	116145,65	0,0190	115367,99	0,0476	4,36821	5,0414E-19
14,06 L/s	0,0188	99518,42	0,0203	101387,44	0,0196	100603,26	0,0546	4,38283	2,1292E-18



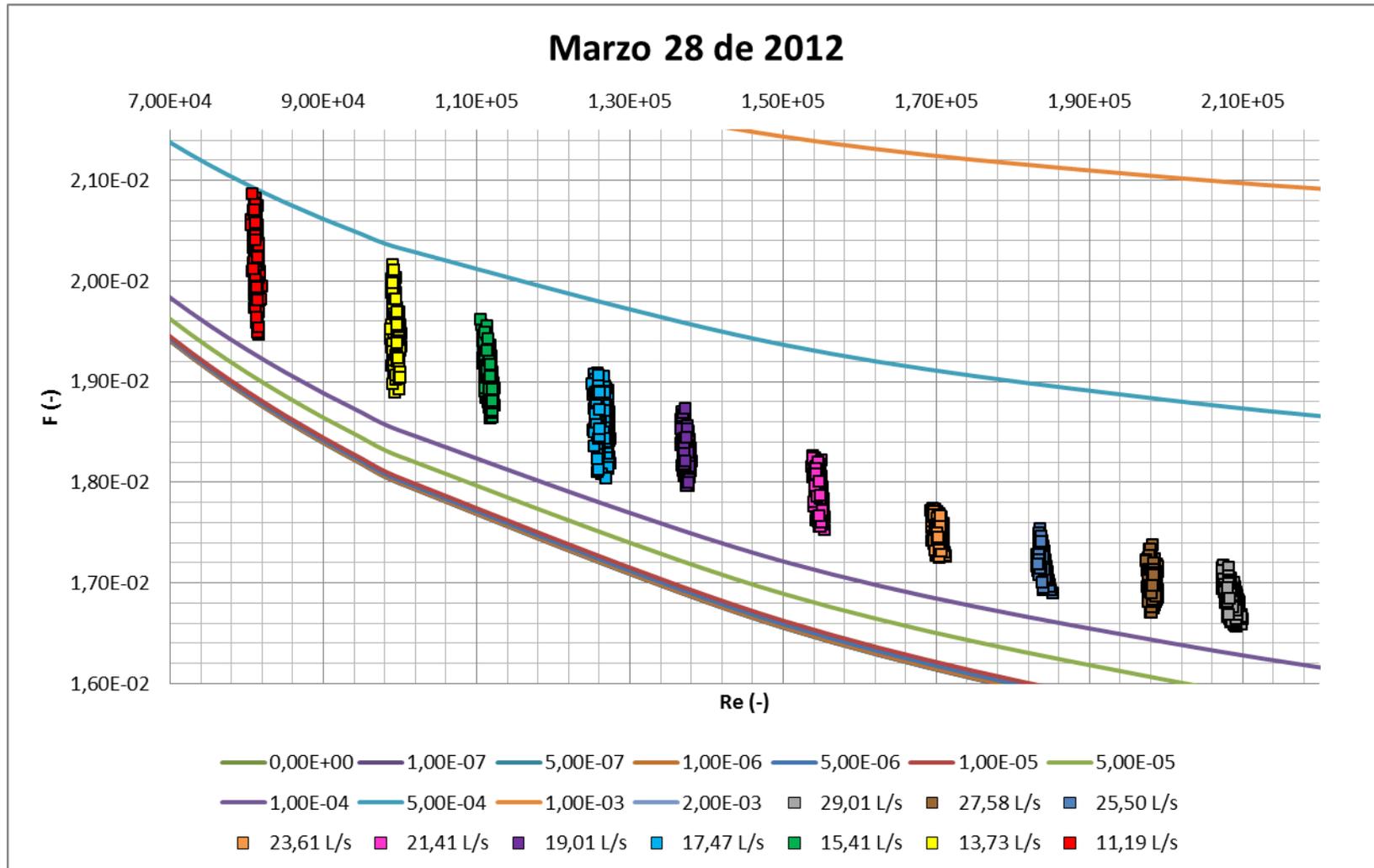


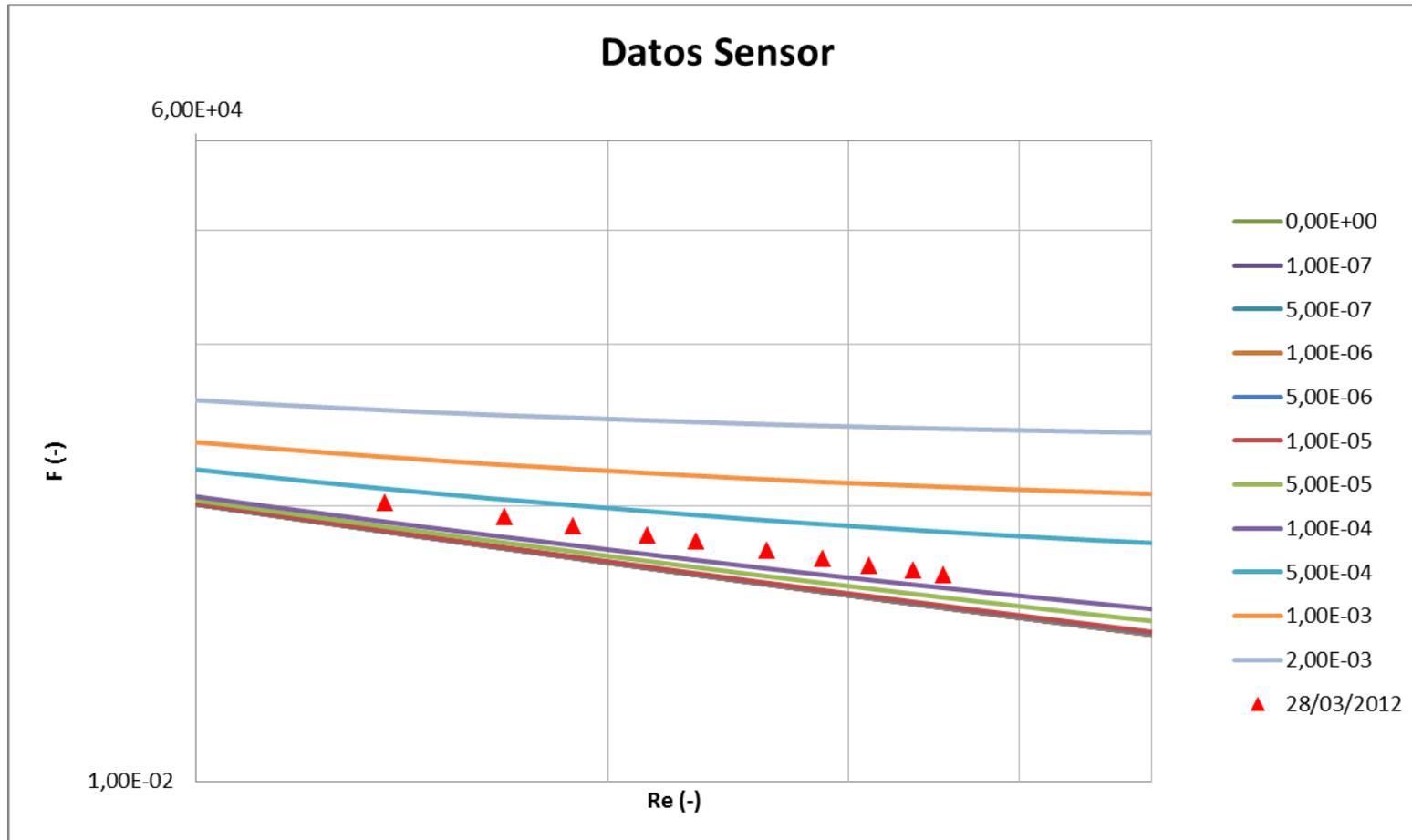


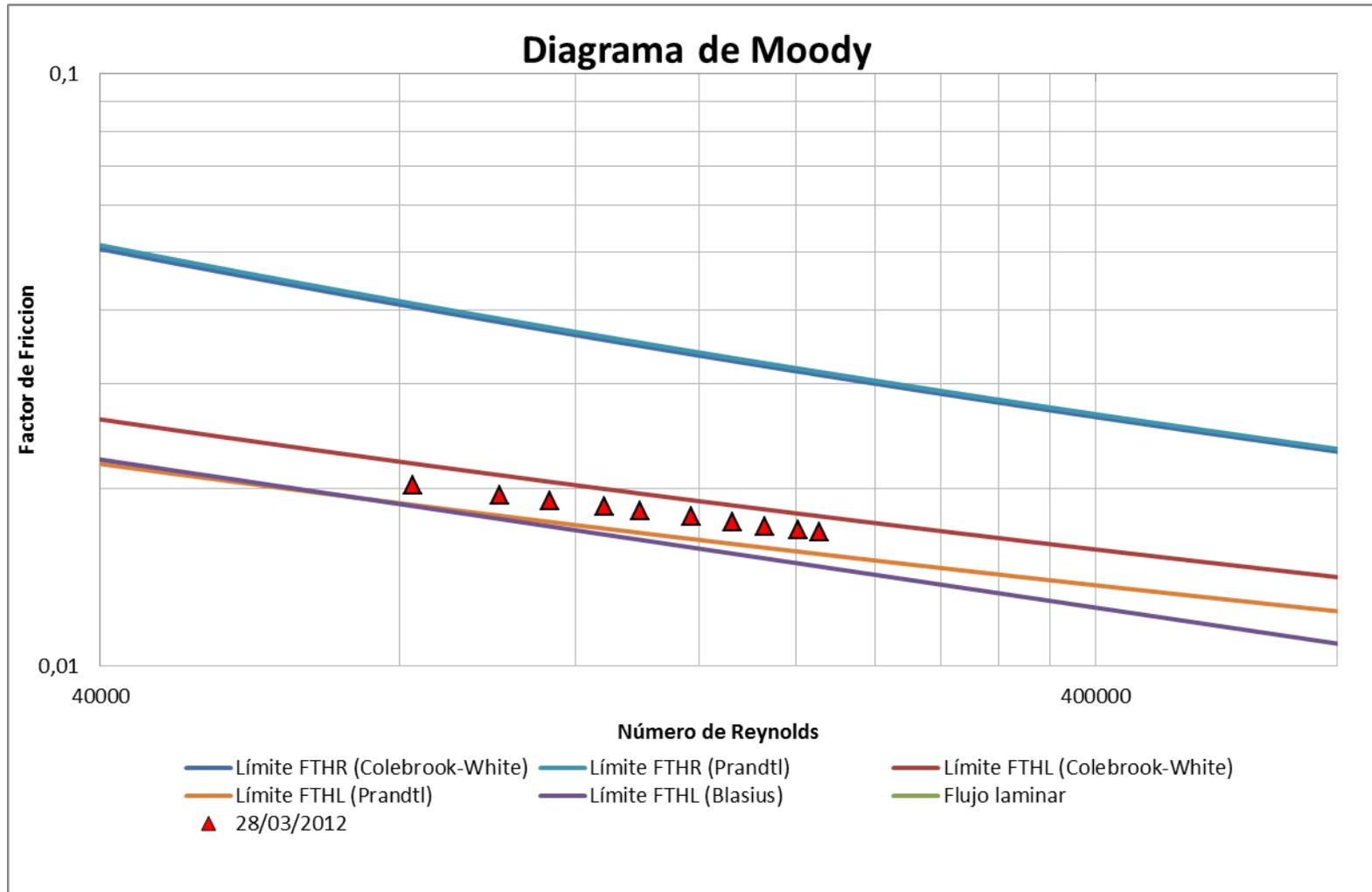


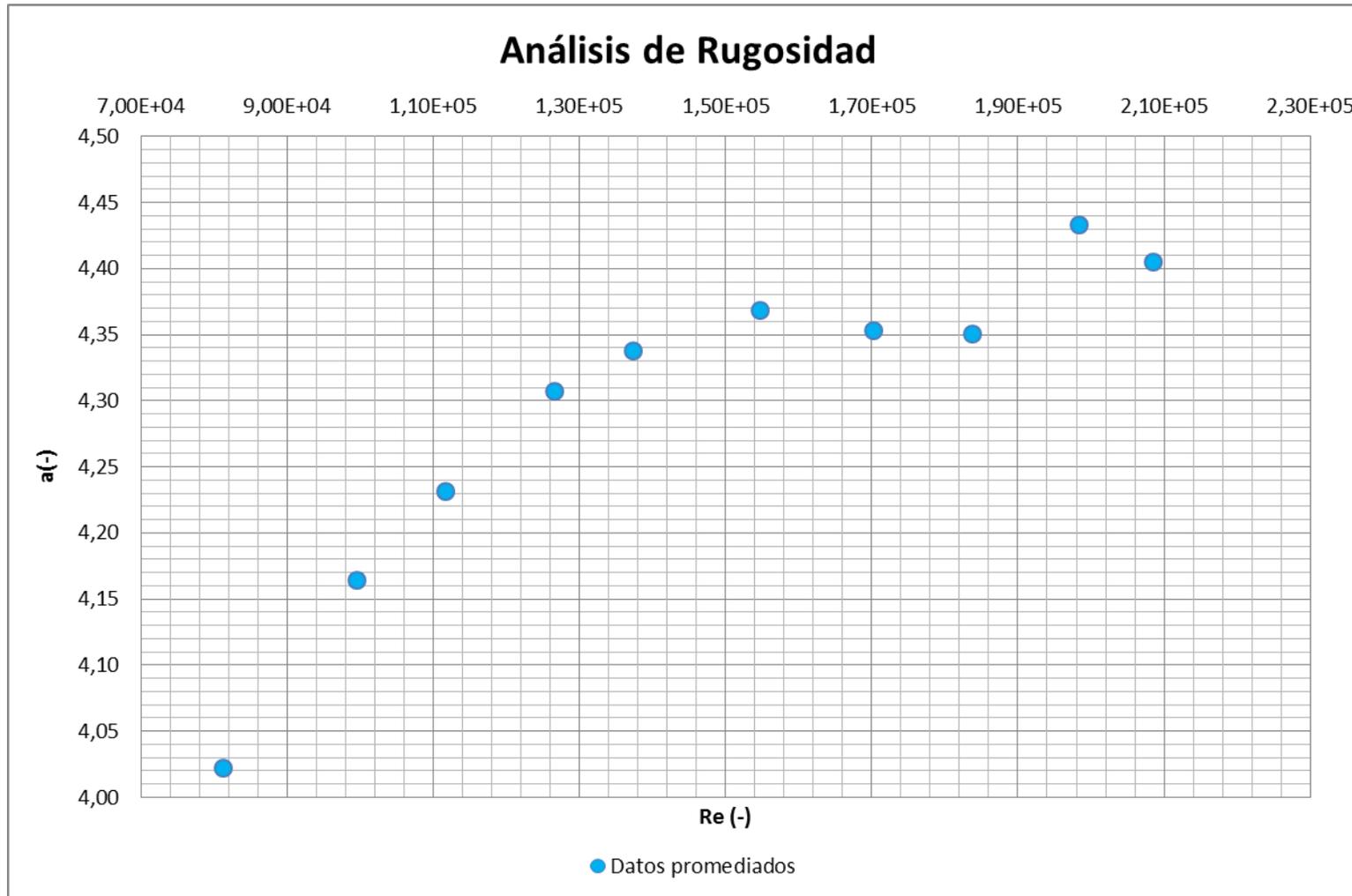
**Semana 9: Marzo 28 de 2012**

Marzo 28 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks
29,01 L/s	0,0166	207320,76	0,0172	210054,32	0,0168	208591,67	0,0280	4,40468	4,1578E-19
27,58 L/s	0,0167	199033,76	0,0174	199033,76	0,0170	198335,93	0,0299	4,43310	-4,8397E-19
25,50 L/s	0,0169	183127,19	0,0175	185286,07	0,0172	183836,37	0,0304	4,35008	-1,0810E-18
23,61 L/s	0,0172	169275,85	0,0177	171283,19	0,0175	170199,06	0,0327	4,35342	-7,4841E-19
21,41 L/s	0,0175	153840,76	0,0183	155488,00	0,0179	154746,49	0,0362	4,36847	9,0539E-19
19,01 L/s	0,0180	136666,03	0,0187	138057,45	0,0183	137402,09	0,0396	4,33805	9,8269E-19
17,47 L/s	0,0180	125164,71	0,0191	127527,78	0,0186	126591,46	0,0419	4,30732	-1,8650E-19
15,41 L/s	0,0186	110592,84	0,0196	112349,51	0,0190	111635,40	0,0446	4,23124	-8,0662E-19
13,73 L/s	0,0189	98818,94	0,0202	100191,50	0,0195	99472,29	0,0473	4,16450	3,3092E-19
11,19 L/s	0,0195	80649,35	0,0209	81975,56	0,0202	81286,99	0,0509	4,02158	6,5182E-19





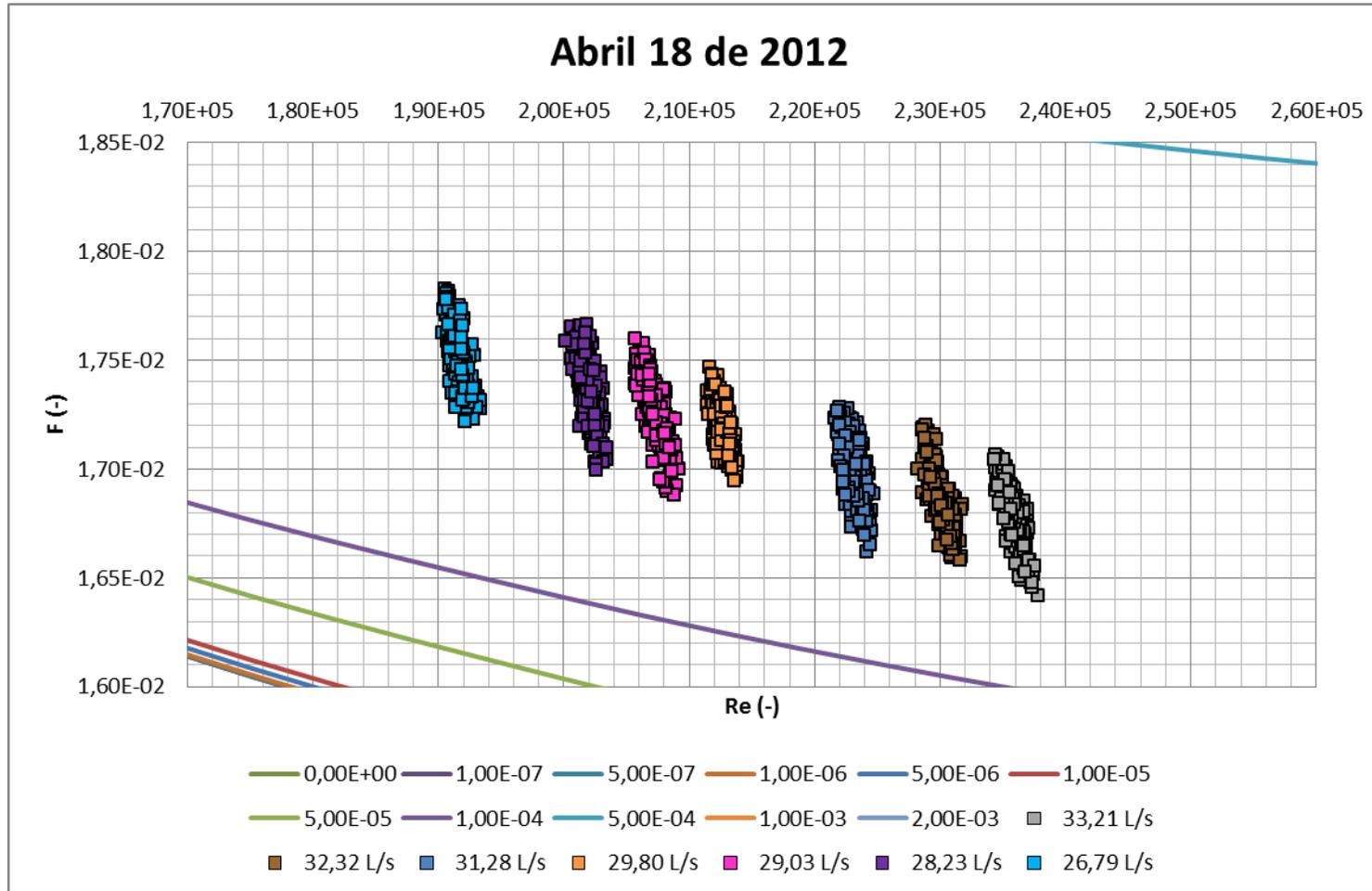


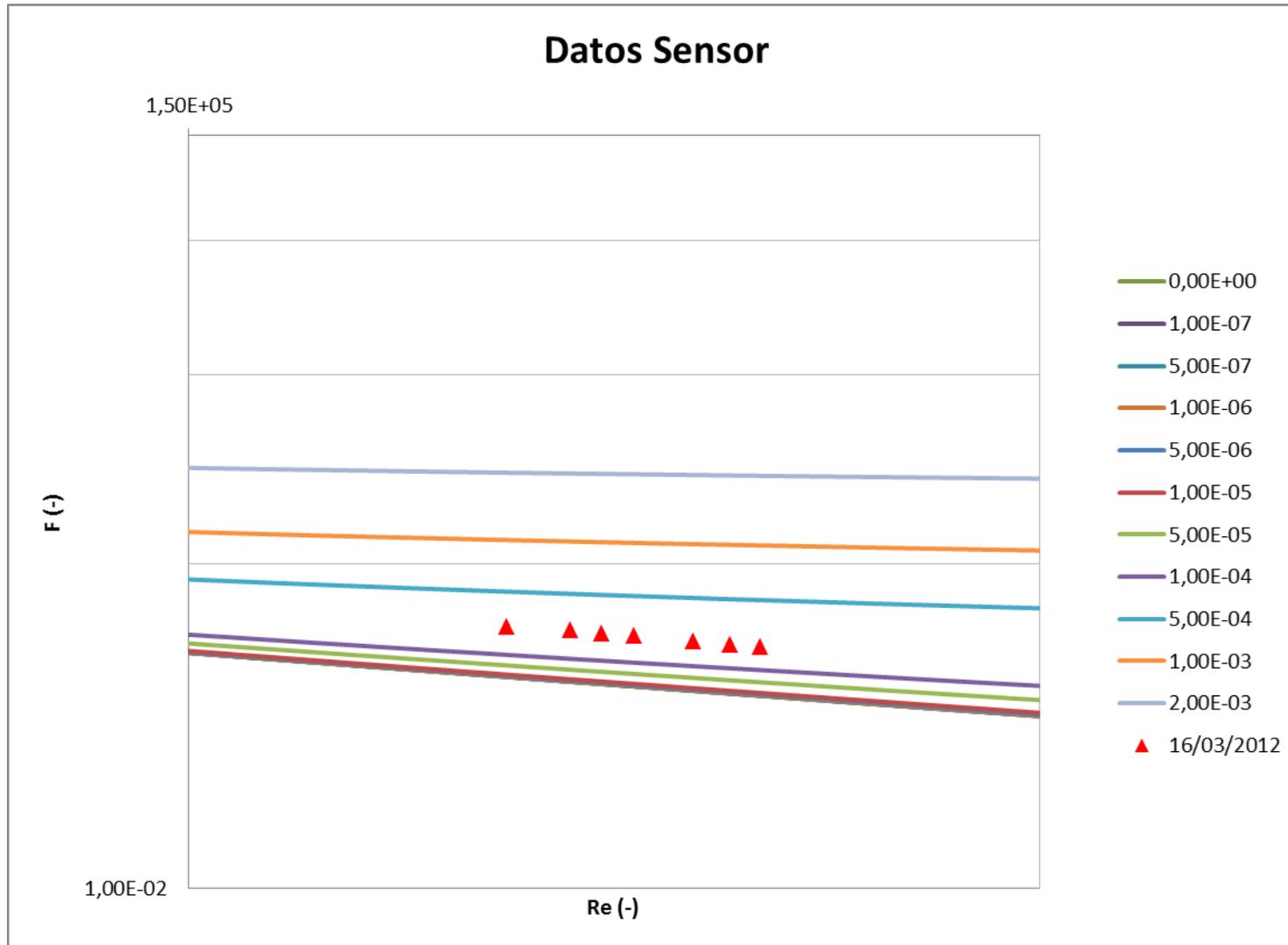


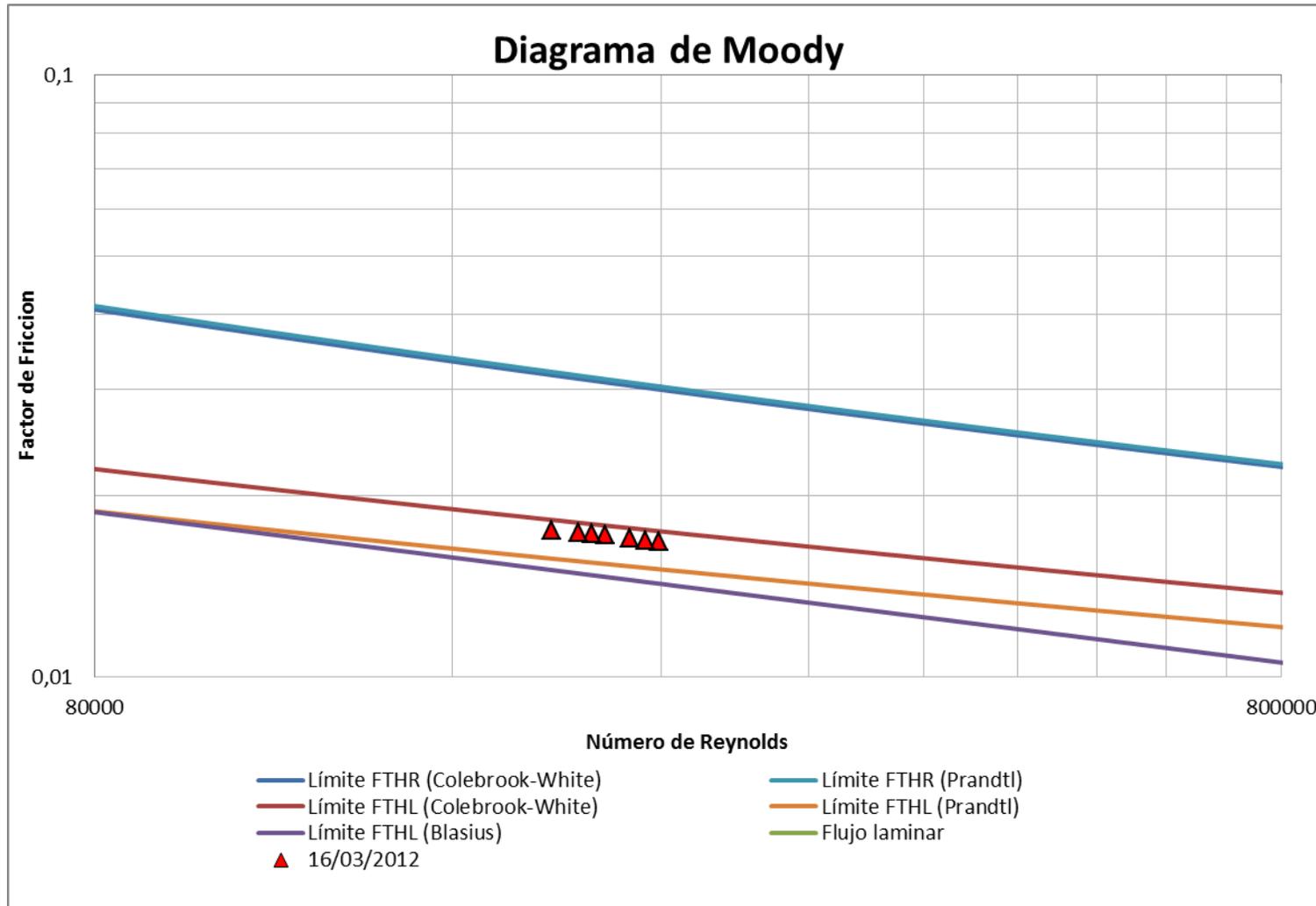


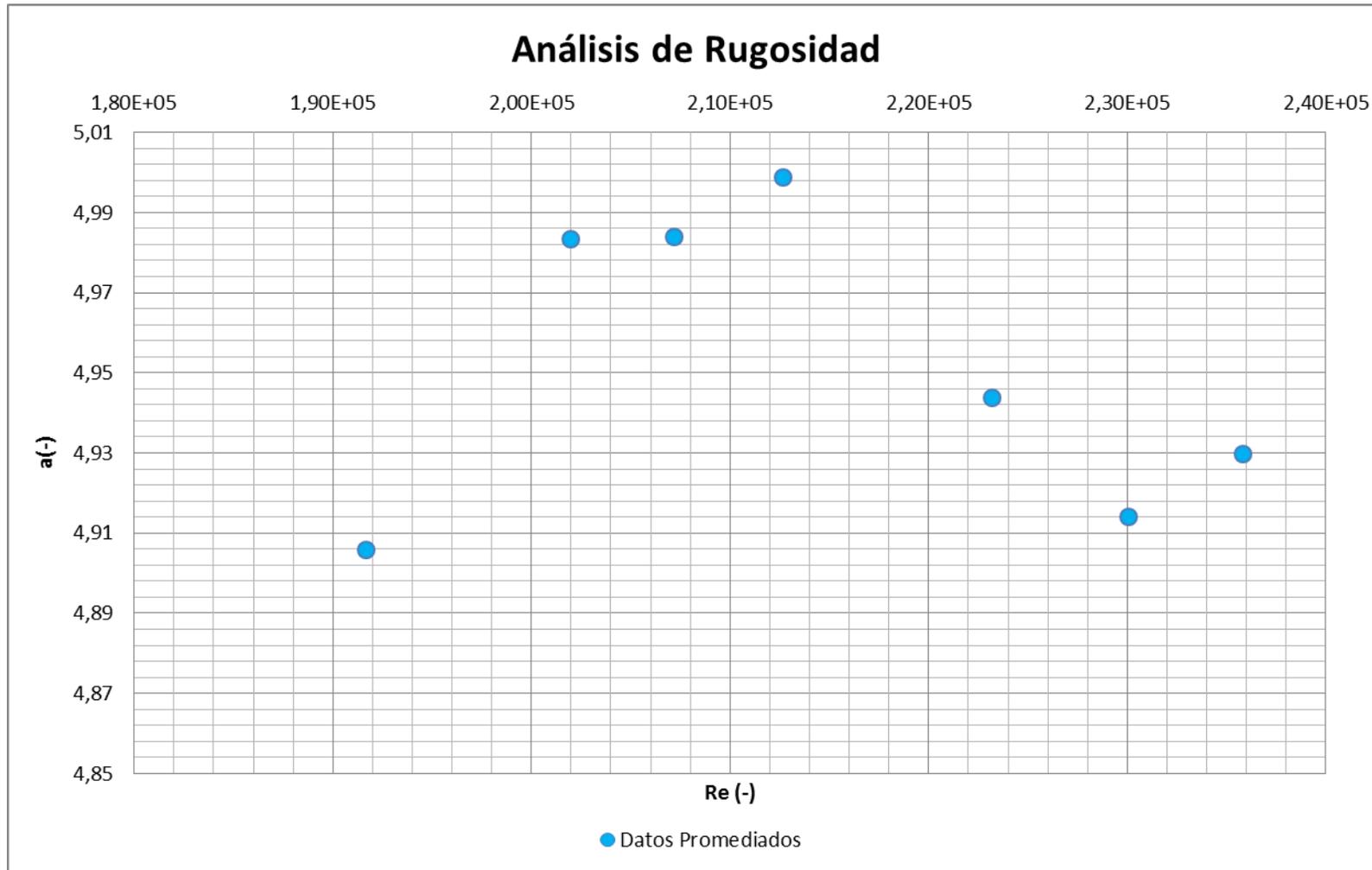
**Semana 12: Abril 18 de 2012**

Abril 18 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks
33,21 L/s	0,0164	234391,81	0,0171	237841,44	0,0168	235807,13	0,0335	4,92981	-1,6132E-19
32,32 L/s	0,0166	231768,55	0,0172	231768,55	0,0169	230074,92	0,0340	4,91404	1,6132E-19
31,28 L/s	0,0166	221652,45	0,0173	224732,23	0,0170	223219,10	0,0355	4,94386	-7,5621E-19
29,80 L/s	0,0169	211429,34	0,0175	213857,78	0,0172	212665,86	0,0382	4,99879	3,3609E-19
29,03 L/s	0,0169	205663,57	0,0176	209223,68	0,0173	207186,97	0,0388	4,98392	-3,2427E-19
28,23 L/s	0,0170	200180,58	0,0177	203416,91	0,0174	201978,13	0,0397	4,98338	-1,0810E-18
26,79 L/s	0,0172	190349,74	0,0178	193342,62	0,0175	191685,24	0,0402	4,90570	-8,8728E-19



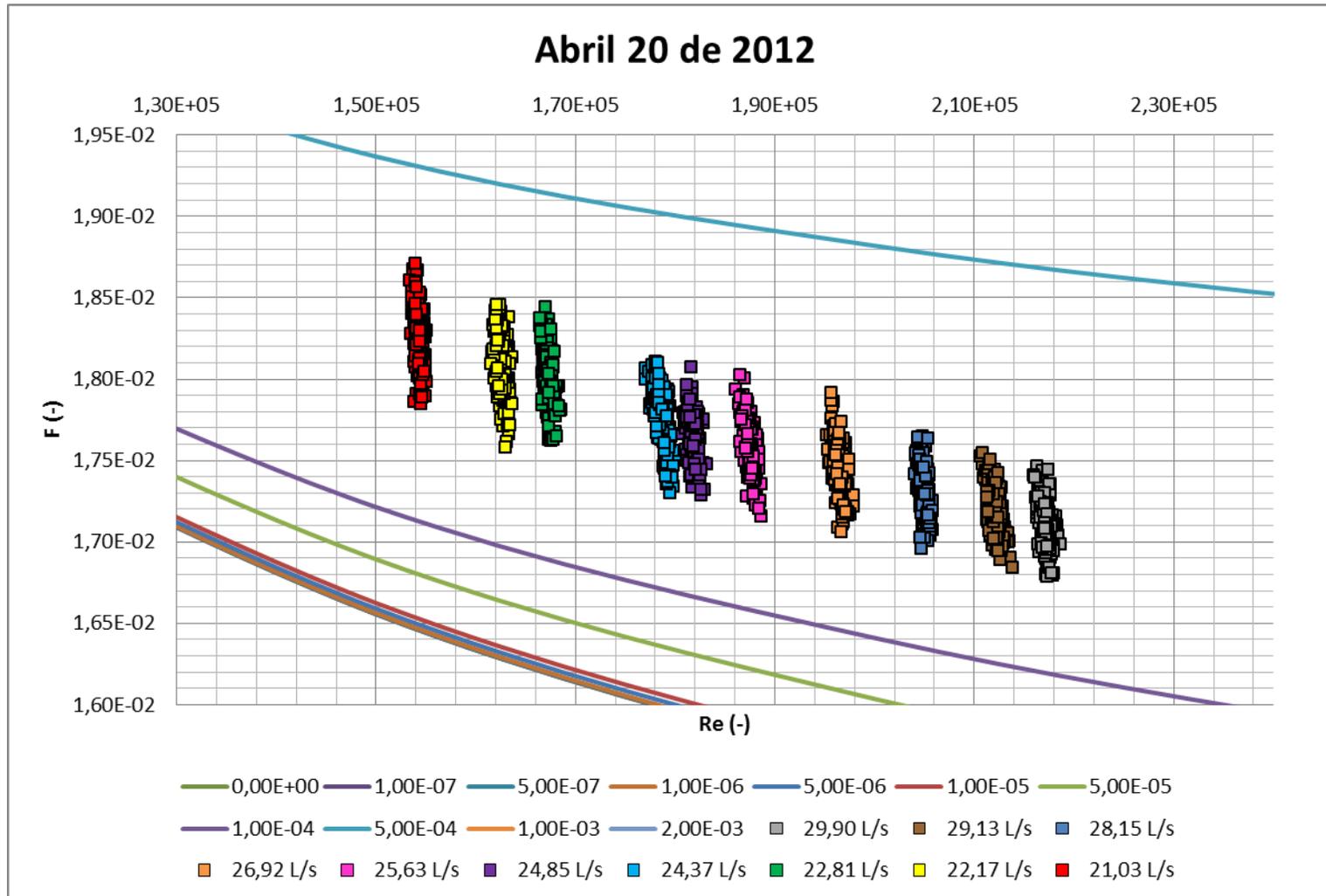


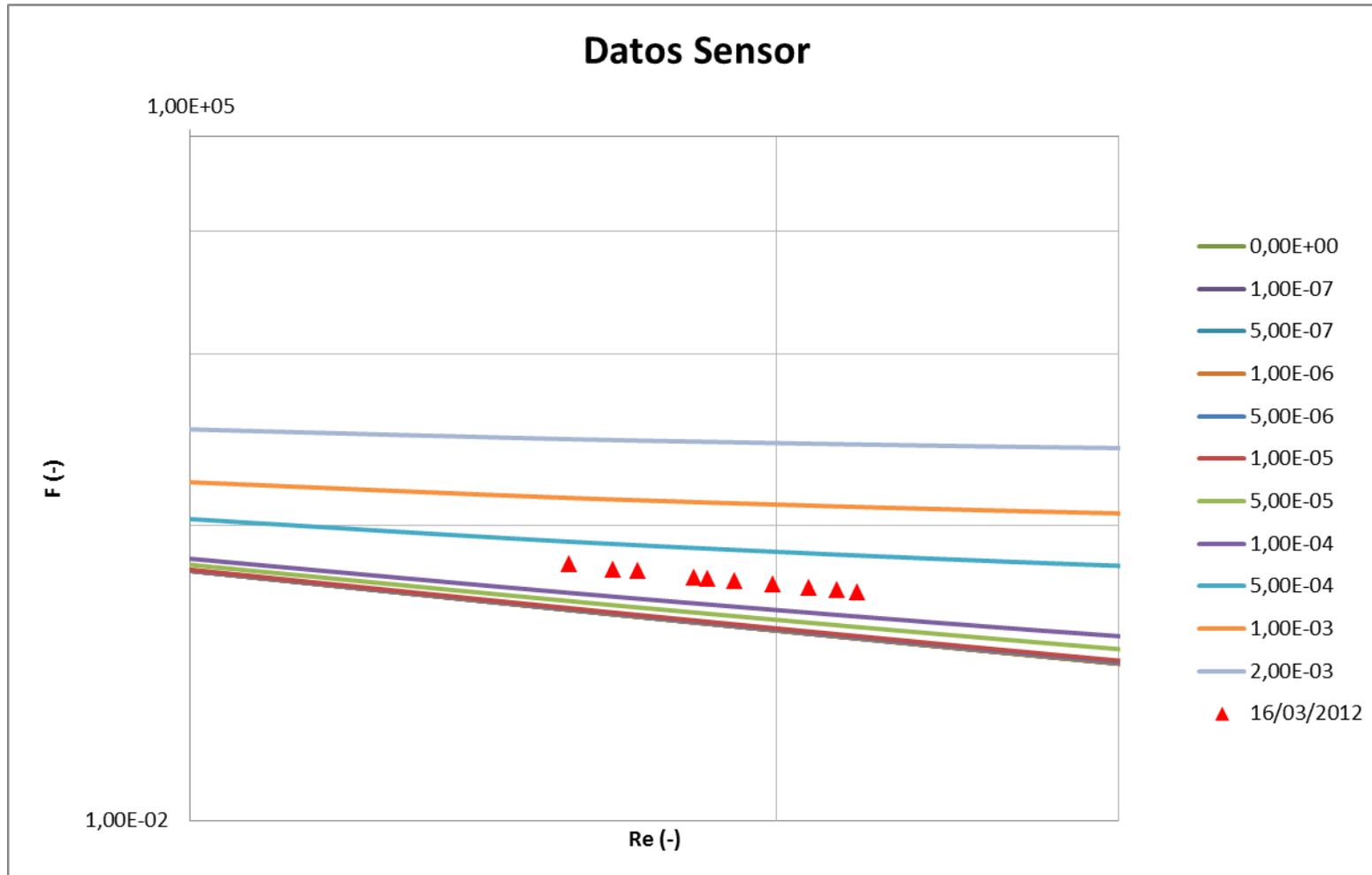


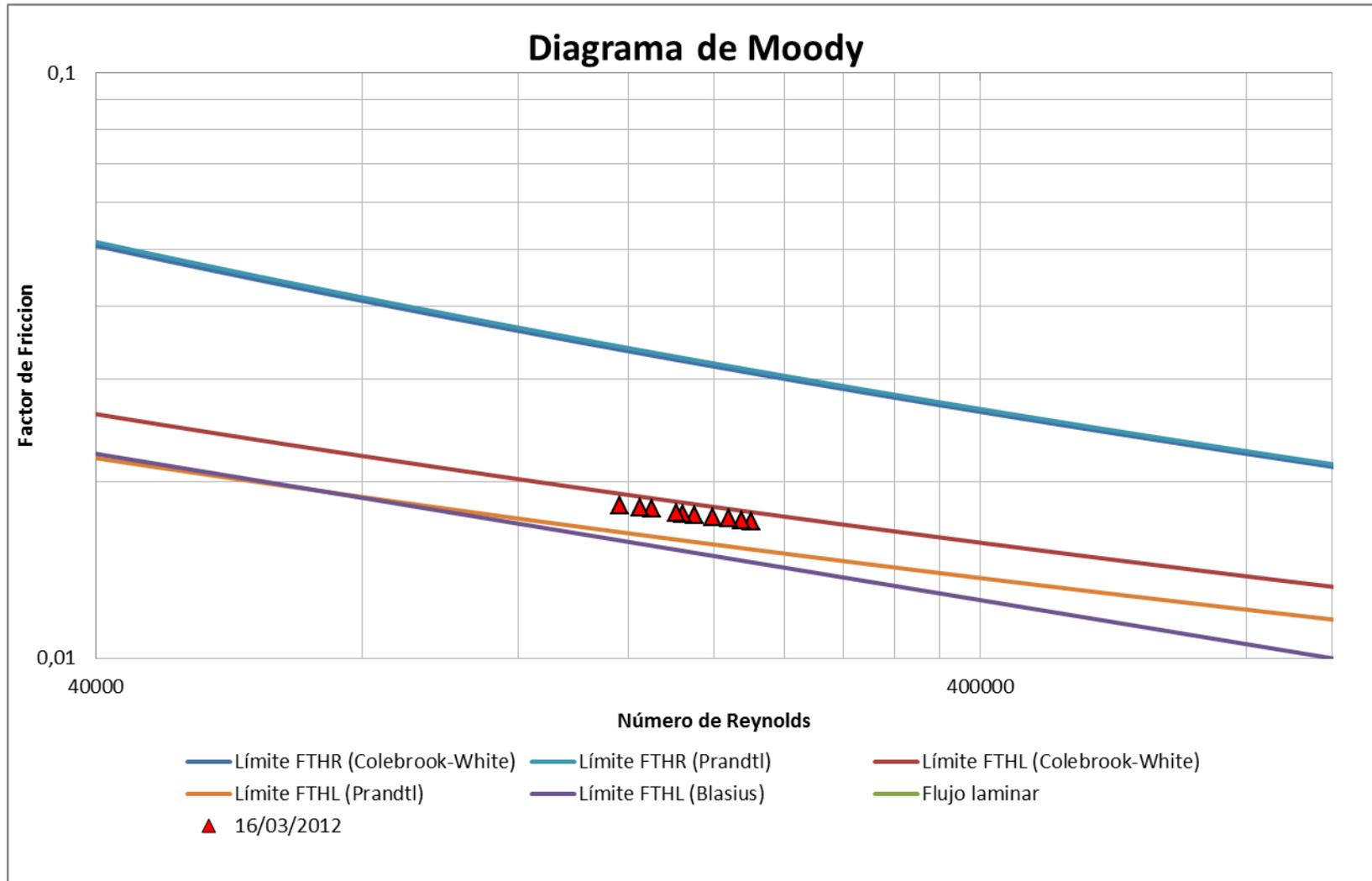


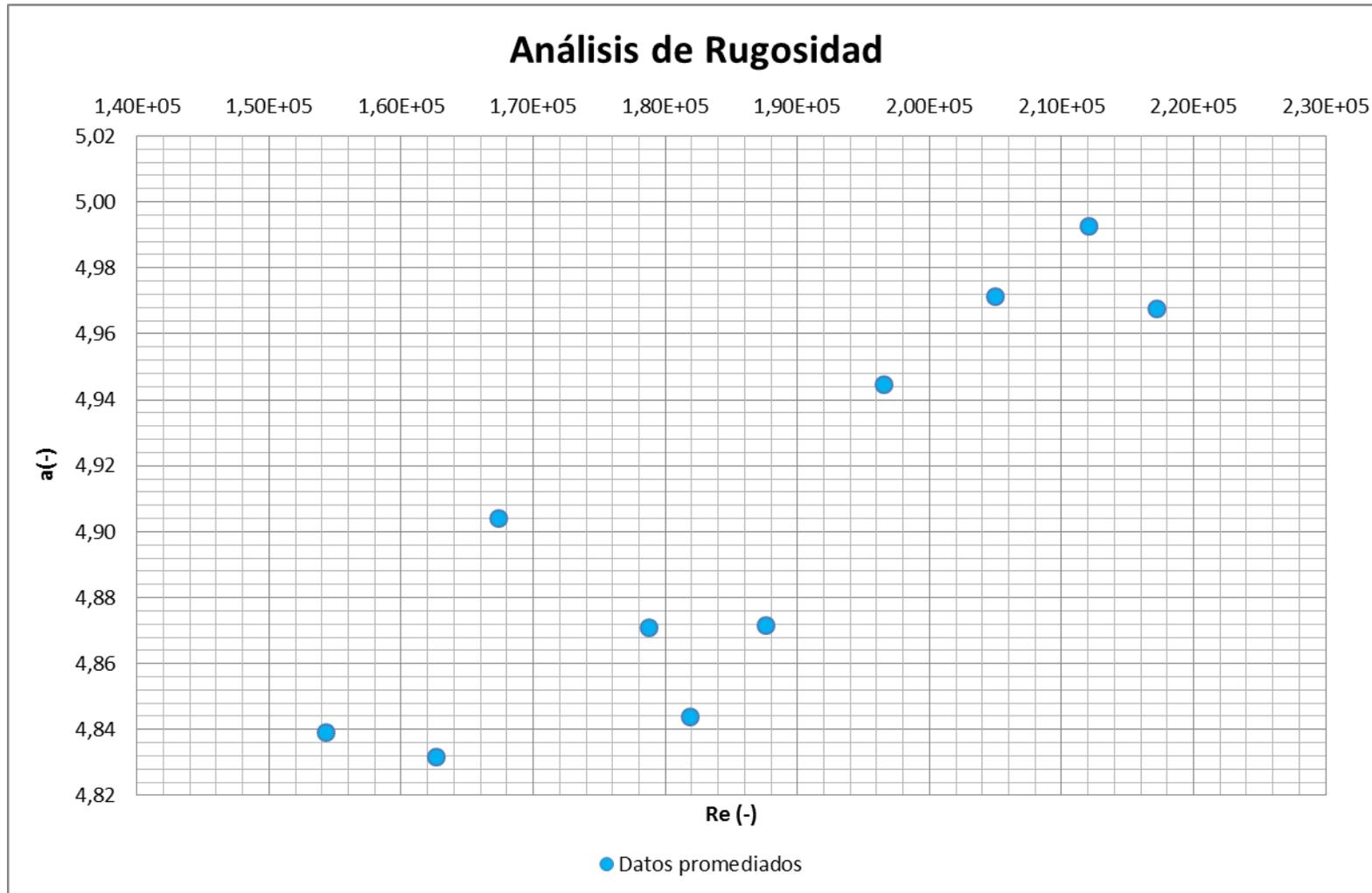
**Semana 12: Abril 20 de 2012**

Abril 20 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
29,90 L/s	0,0168	216024,38	0,0175	218674,11	0,0171	217212,27	0,0369	4,96772	-3,2265E-19
29,13 L/s	0,0168	213903,38	0,0175	213903,38	0,0172	212095,54	0,0381	4,99275	8,0662E-20
28,15 L/s	0,0170	204065,40	0,0176	205878,99	0,0173	204977,15	0,0390	4,97136	-1,6132E-19
26,92 L/s	0,0171	195234,79	0,0179	197906,45	0,0174	196519,67	0,0400	4,94454	3,2265E-19
25,63 L/s	0,0172	186146,91	0,0180	188619,65	0,0176	187600,05	0,0403	4,87144	-5,6464E-19
24,85 L/s	0,0173	180791,81	0,0181	183207,64	0,0177	181884,13	0,0410	4,84383	-7,2596E-19
24,37 L/s	0,0173	177088,92	0,0181	180047,16	0,0177	178791,53	0,0422	4,87091	-8,4023E-20
22,81 L/s	0,0176	166413,46	0,0184	168547,97	0,0180	167377,86	0,0456	4,90390	1,6214E-19
22,17 L/s	0,0176	161513,32	0,0185	163704,64	0,0181	162627,65	0,0452	4,83158	4,0331E-19
21,03 L/s	0,0178	153448,10	0,0187	155086,56	0,0183	154308,31	0,0476	4,83914	3,2265E-19



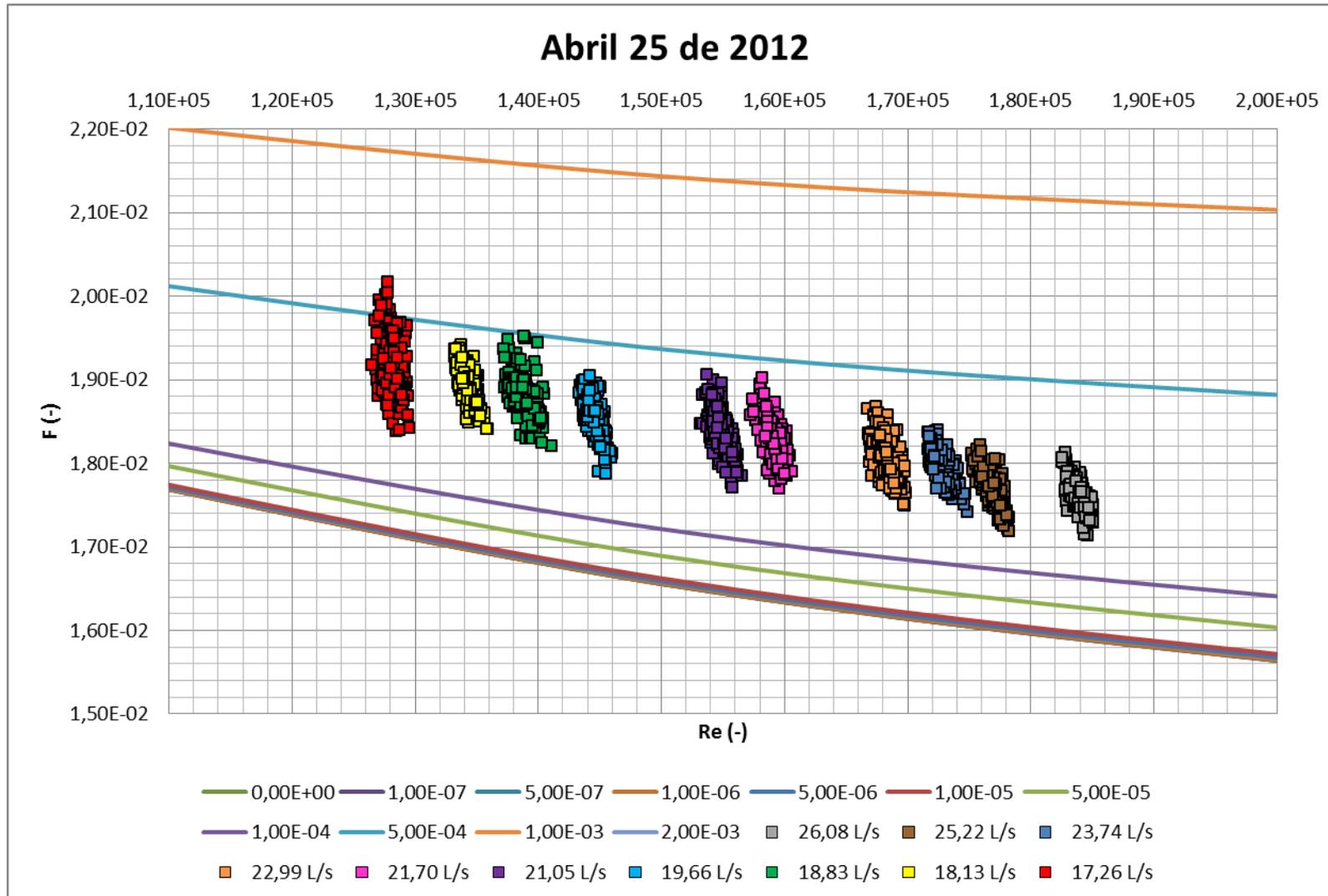


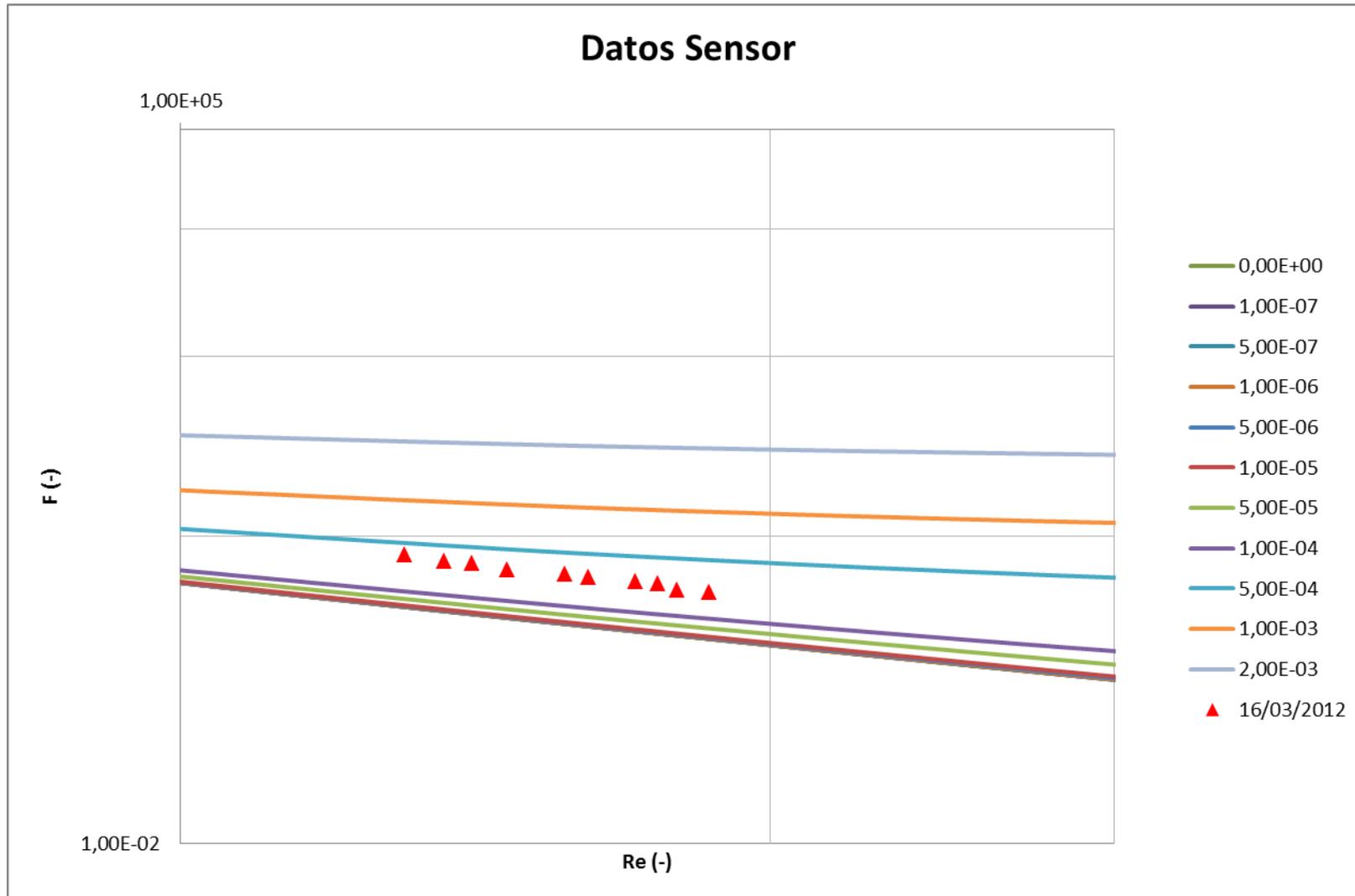


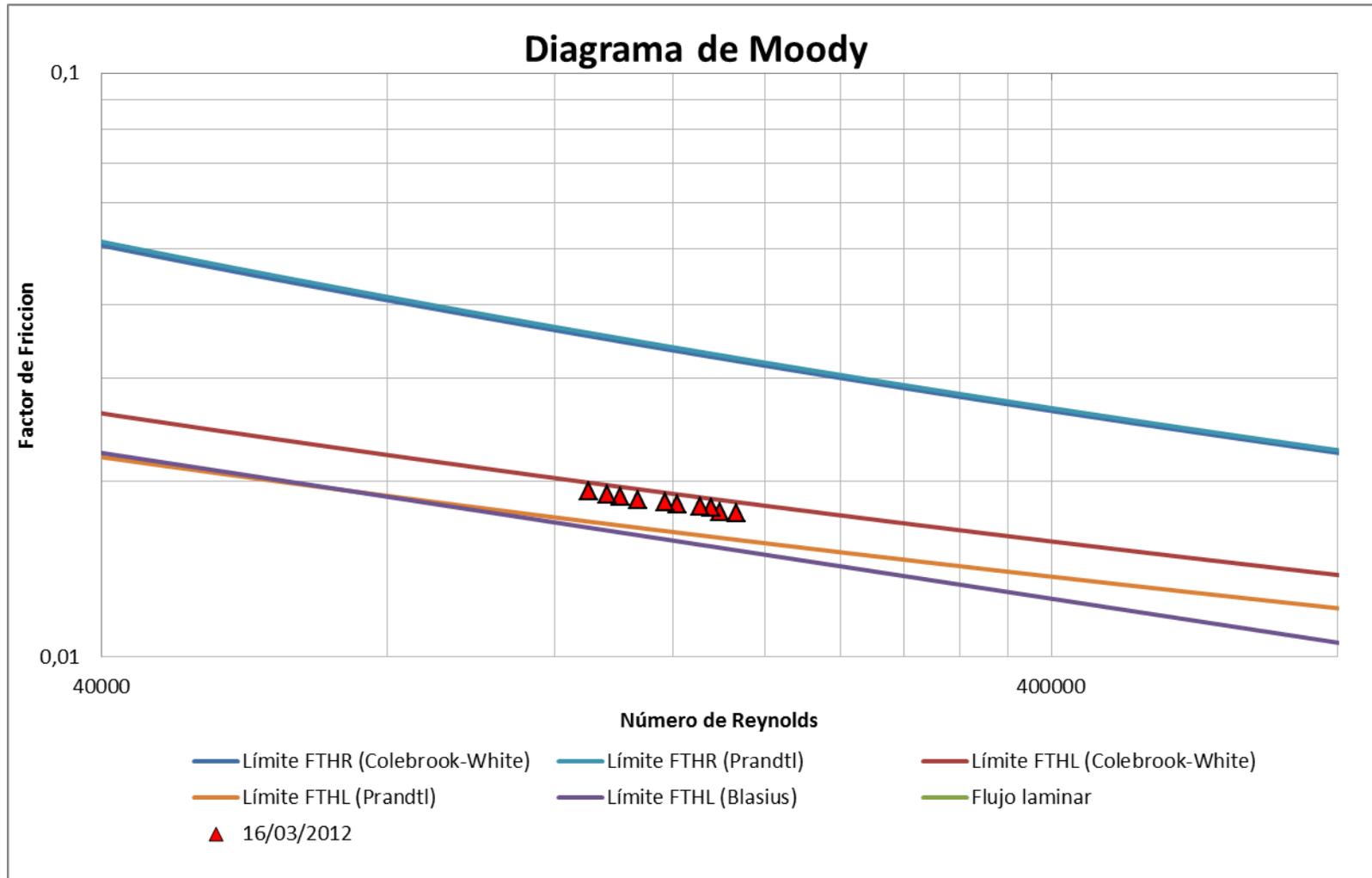


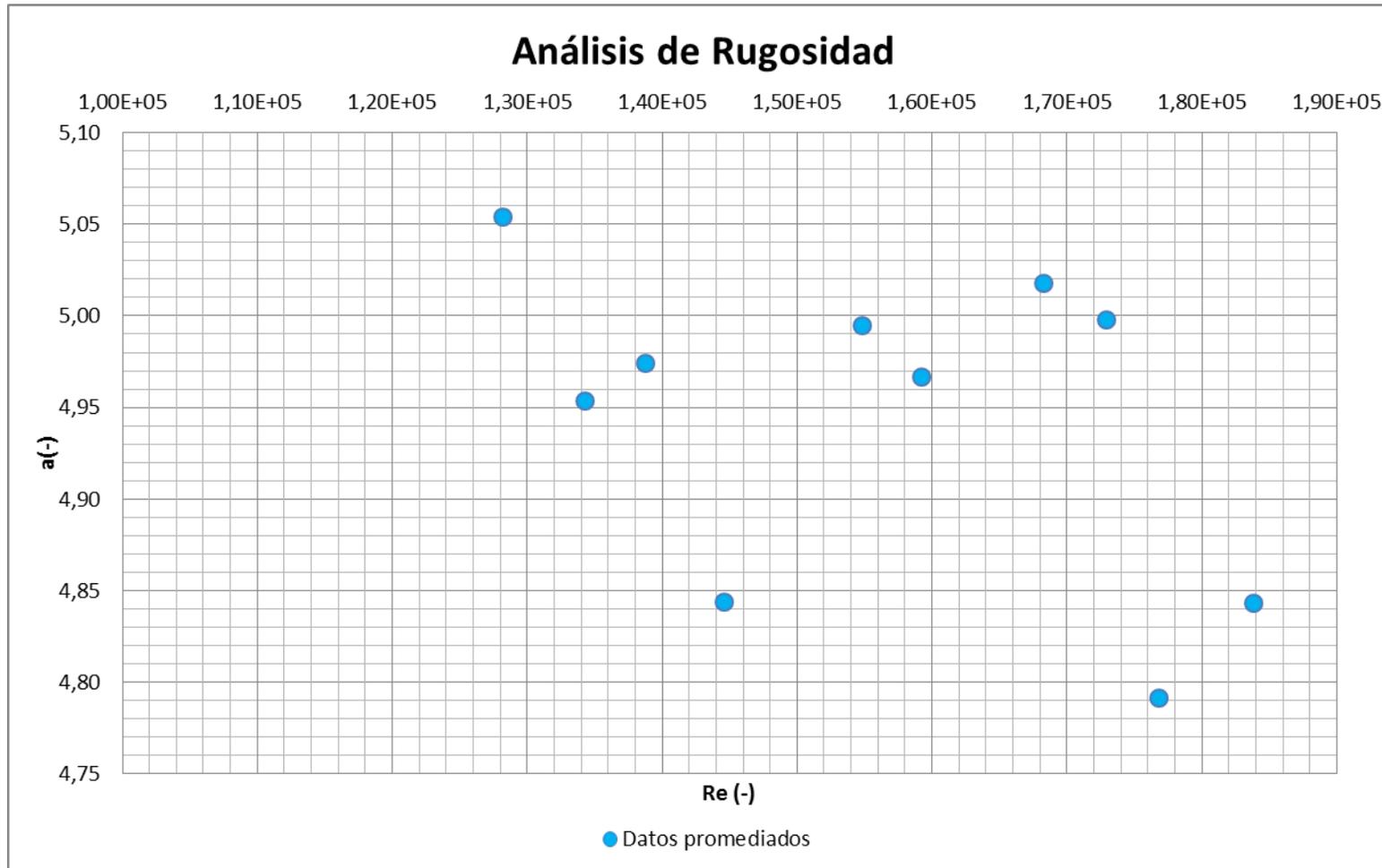
**Semana 13: Abril 25 de 2012**

Abril 25 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
26,08 L/s	0,0171	182532,15	0,0181	185111,77	0,0176	183814,26	0,0405	4,84348	-7,2596E-19
25,22 L/s	0,0172	178258,41	0,0182	178258,41	0,0177	176832,05	0,0409	4,79122	-8,0662E-20
23,74 L/s	0,0174	171665,77	0,0184	174853,17	0,0180	172910,02	0,0462	4,99750	-5,6464E-19
22,99 L/s	0,0175	166753,22	0,0187	169844,05	0,0181	168260,45	0,0479	5,01792	0,0000E+00
21,70 L/s	0,0177	157238,22	0,0190	160618,28	0,0183	159192,27	0,0492	4,96632	-6,4530E-19
21,05 L/s	0,0177	153192,66	0,0191	156580,69	0,0184	154856,88	0,0512	4,99475	4,1365E-19
19,66 L/s	0,0179	143382,82	0,0190	146062,71	0,0185	144637,34	0,0507	4,84351	-3,0970E-35
18,83 L/s	0,0182	137191,98	0,0195	141055,78	0,0188	138810,08	0,0561	4,97390	-1,7440E-19
18,13 L/s	0,0184	133220,07	0,0194	135908,59	0,0189	134319,48	0,0573	4,95351	8,0662E-20
17,26 L/s	0,0184	126491,02	0,0202	129522,93	0,0192	128216,27	0,0626	5,05418	0,0000E+00



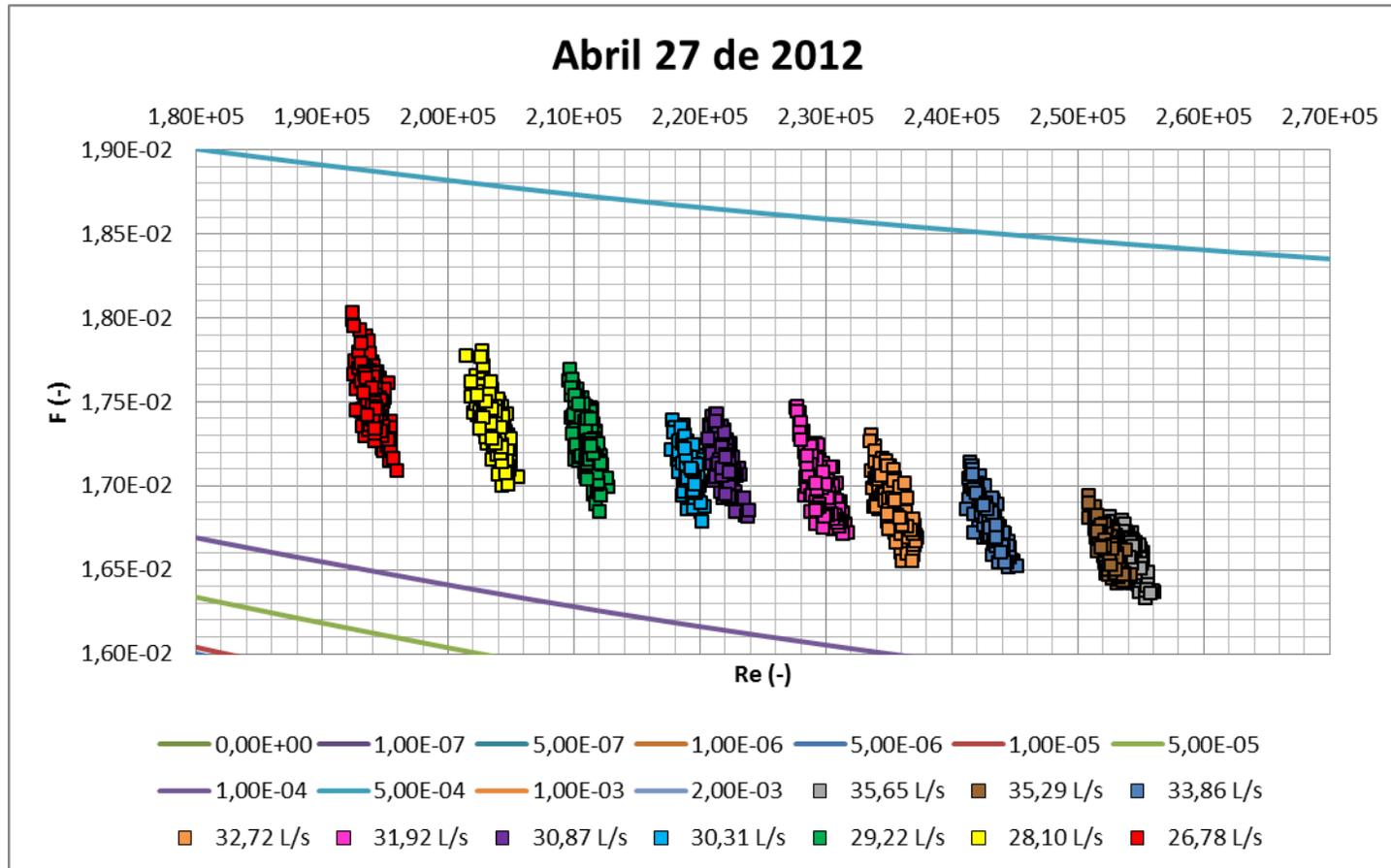


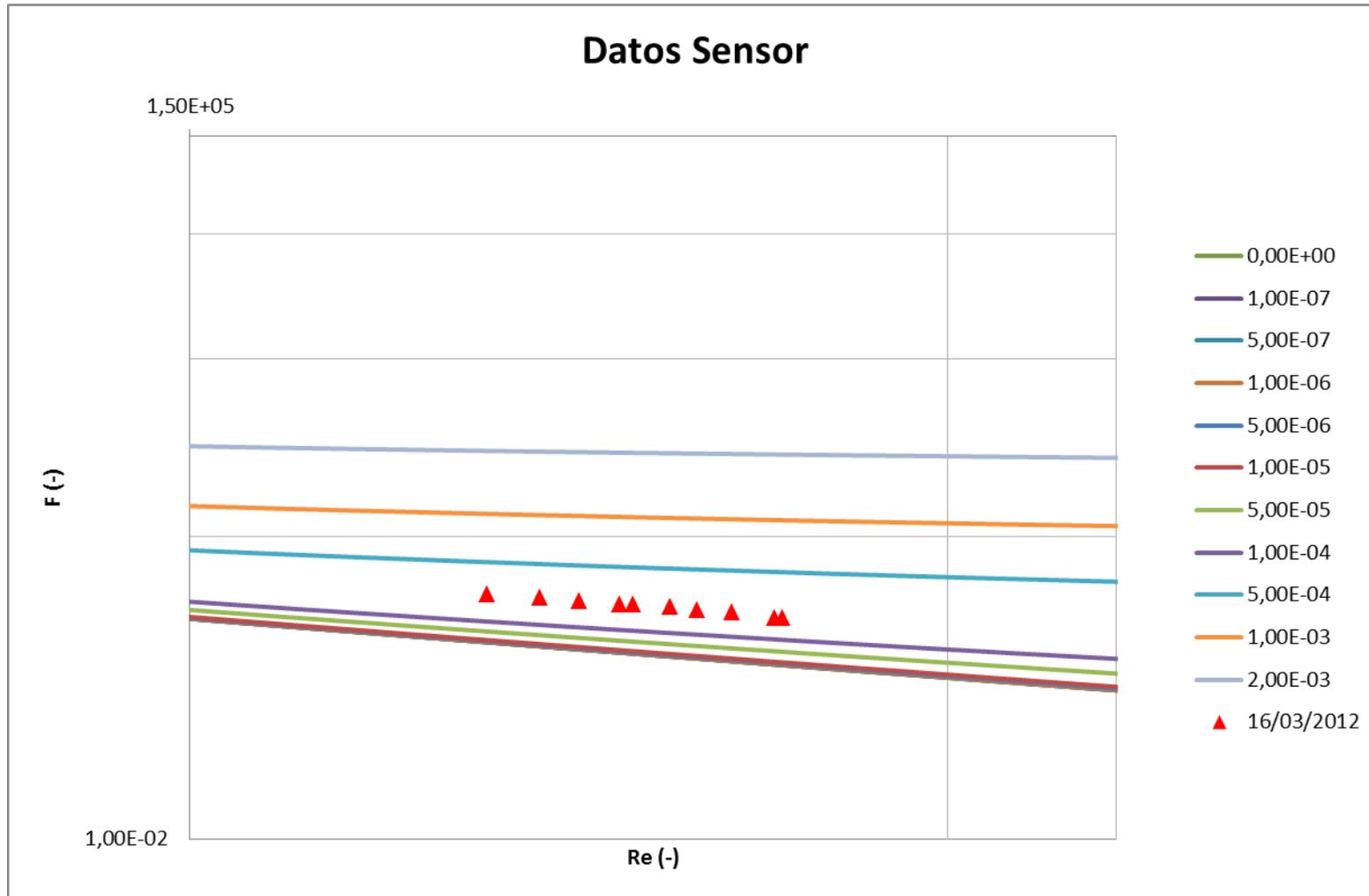


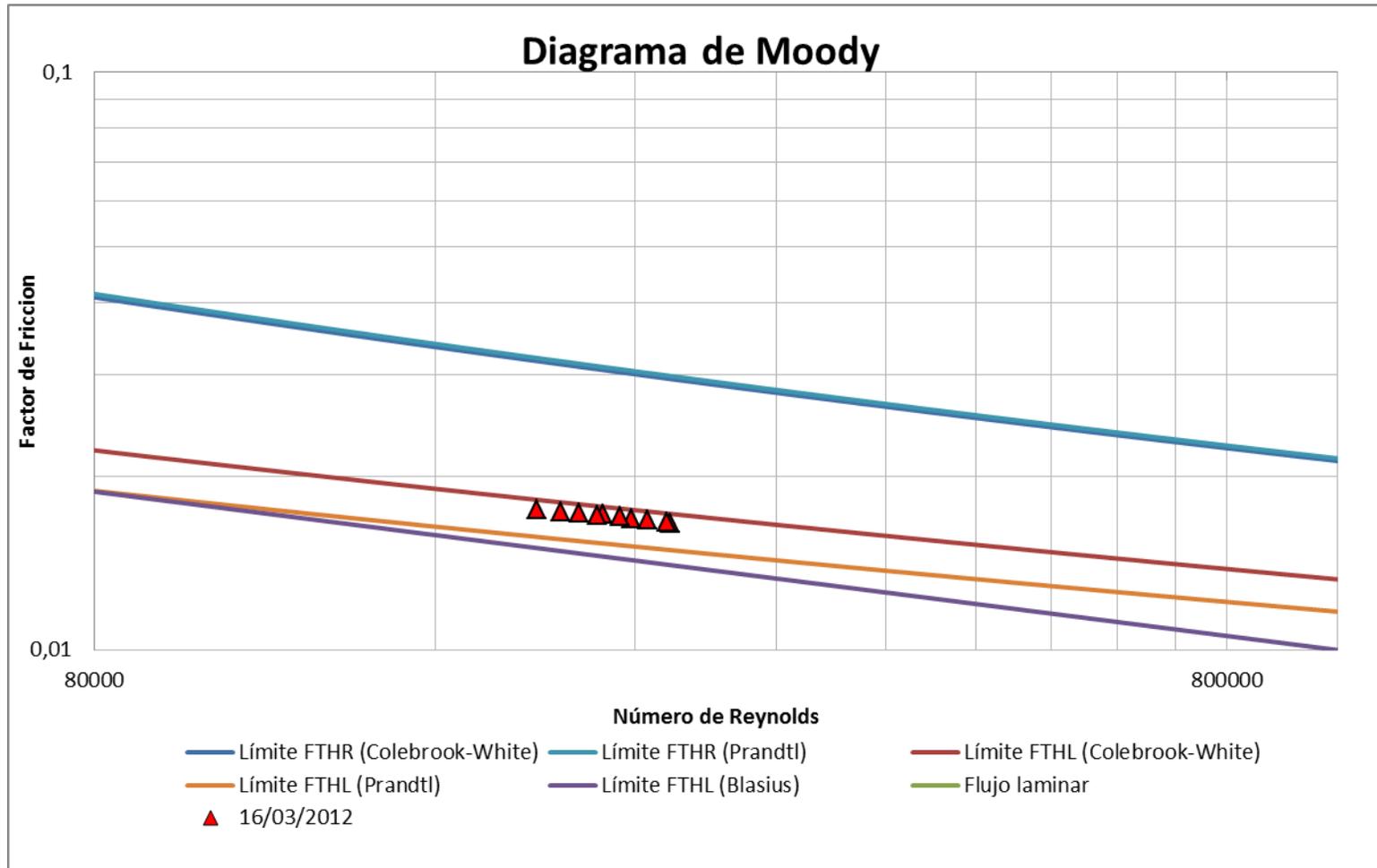


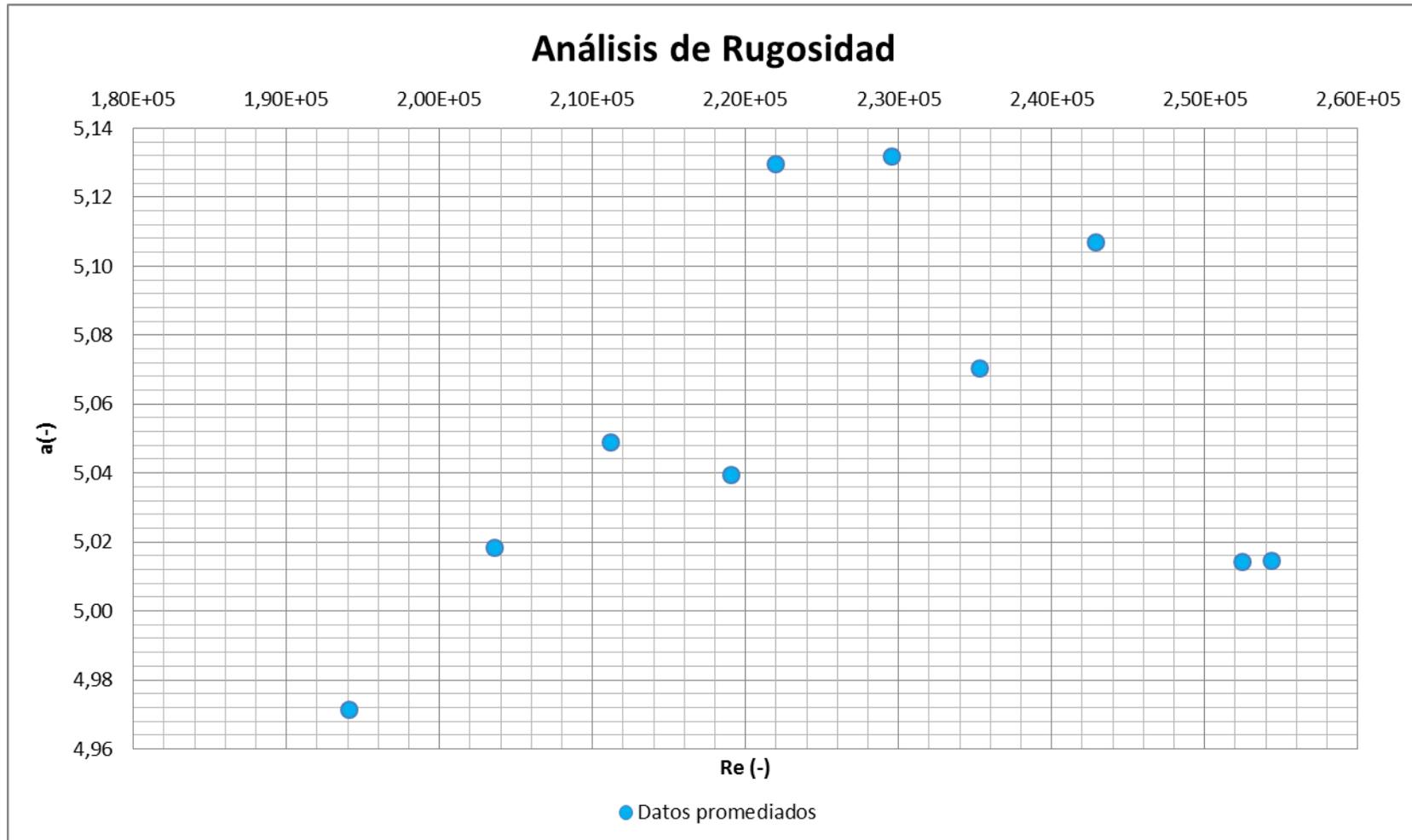
**Semana 13: Abril 27 de 2012**

Abril 27 de 2012									
Q prom	Mín		Máx		Promedio				
	f	Re	f	Re	f	Re	Ks	a	Ks'
35,65 L/s	0,0163	252573,44	0,0168	256097,39	0,0166	254409,40	0,0325	5,01440	0,0000E+00
35,29 L/s	0,0164	254185,29	0,0169	254185,29	0,0166	252497,48	0,0327	5,01424	0,0000E+00
33,86 L/s	0,0165	241184,04	0,0171	245176,85	0,0168	242915,49	0,0354	5,10685	8,0662E-20
32,72 L/s	0,0165	233524,40	0,0173	237276,70	0,0169	235311,05	0,0359	5,07047	8,1068E-20
31,92 L/s	0,0167	227654,10	0,0175	231768,40	0,0170	229524,96	0,0377	5,13192	-2,4320E-19
30,87 L/s	0,0168	220701,84	0,0174	223883,98	0,0171	222003,12	0,0389	5,12959	2,4199E-19
30,31 L/s	0,0168	217777,64	0,0174	220358,91	0,0171	219086,90	0,0378	5,03940	3,2427E-19
29,22 L/s	0,0168	209635,68	0,0177	212751,27	0,0173	211157,50	0,0393	5,04902	-4,0331E-19
28,10 L/s	0,0170	201496,35	0,0178	205554,52	0,0174	203632,97	0,0401	5,01828	4,0331E-19
26,78 L/s	0,0171	192422,54	0,0180	196006,14	0,0175	194069,49	0,0410	4,97124	8,0662E-20











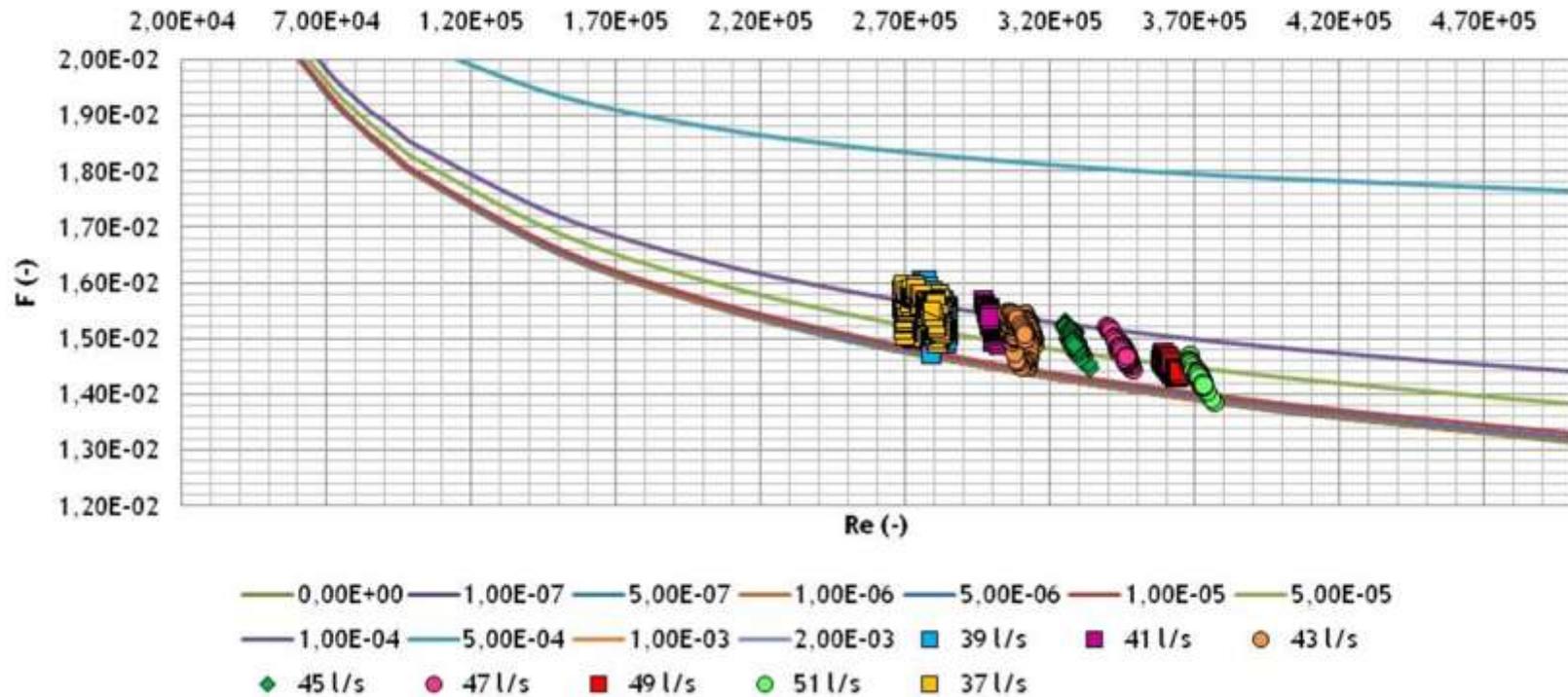
# ANEXO II – Resultados correspondientes a cada día de pruebas para el periodo 2011-2

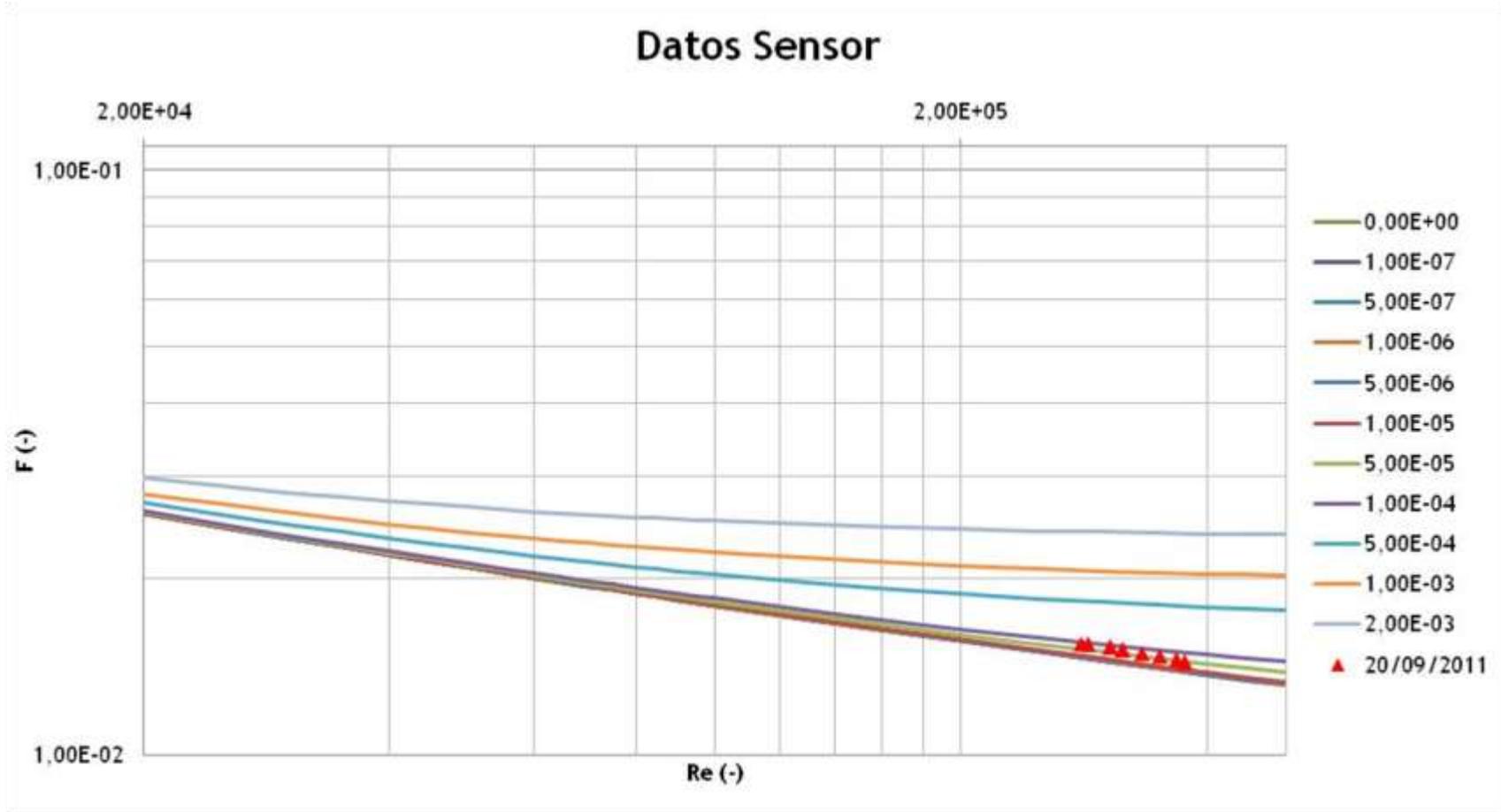


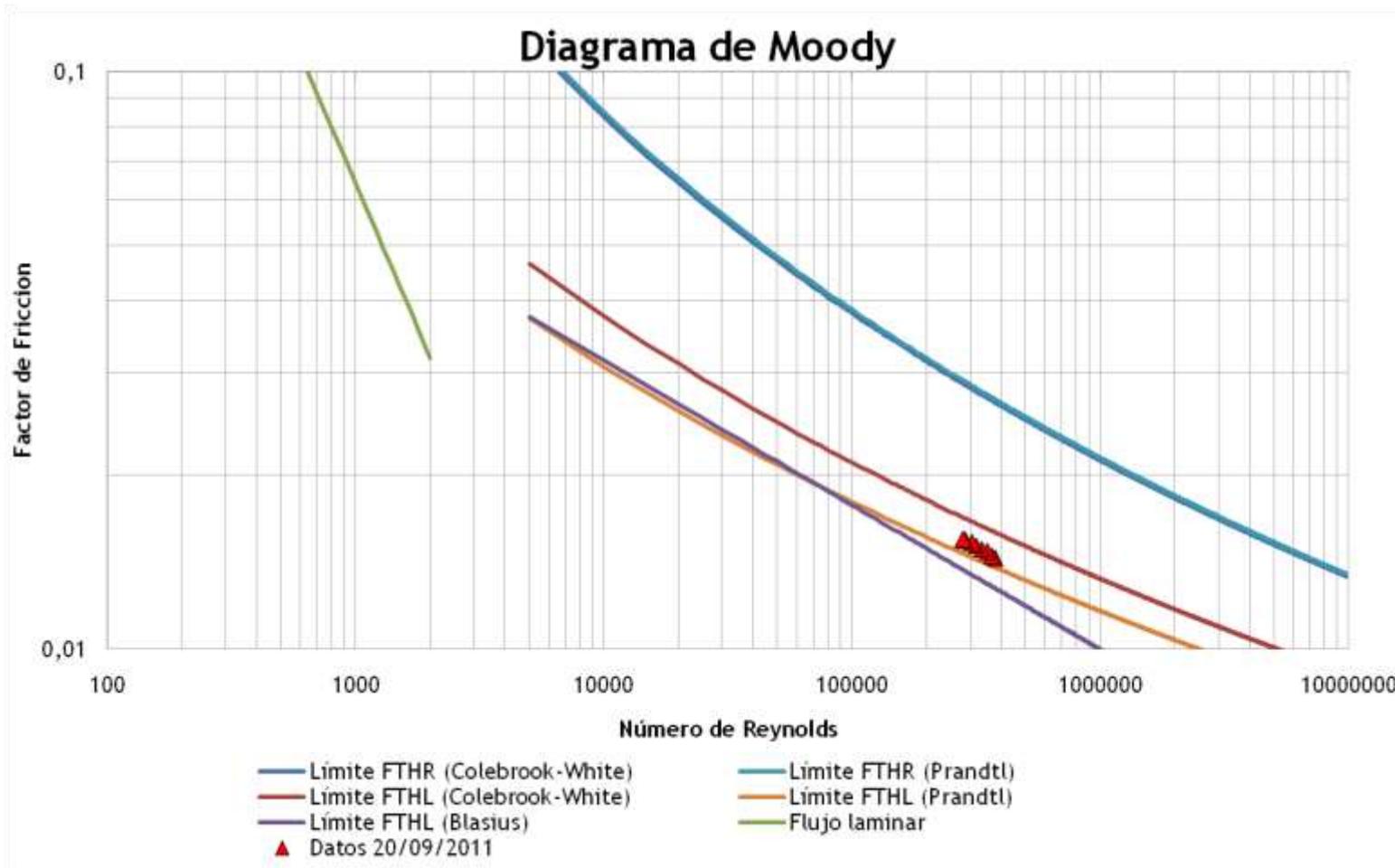
**Semana 1: Septiembre 20 de 2011**

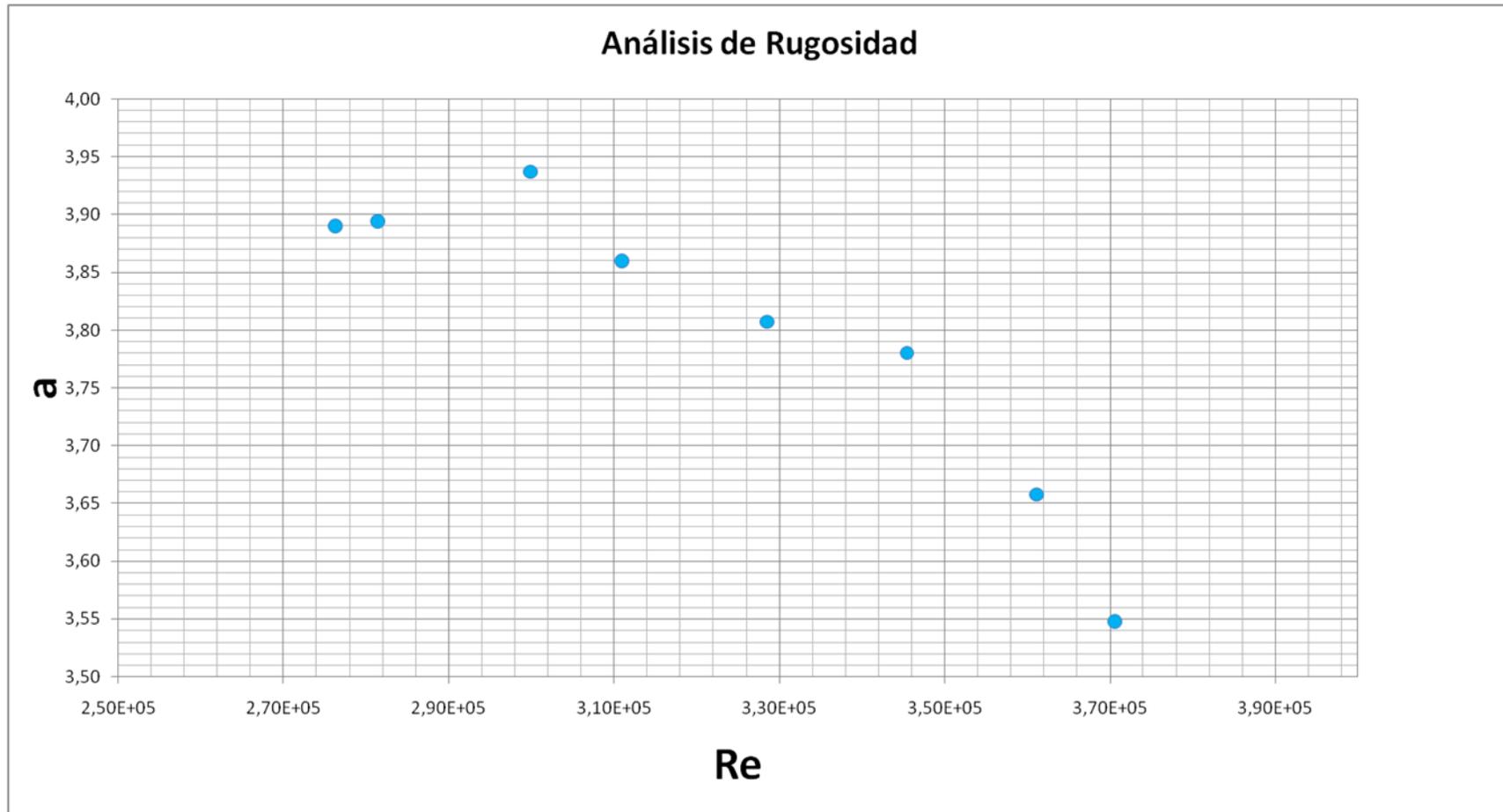
Septiembre 20 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
51	0,0139	367819,34	0,0147	376957,19	0,0144	370683,04	0,0067	3,547346	0,00E+00
49	0,0143	358410,83	0,0148	365131,42	0,0145	361232,50	0,0081	3,65778	0,00E+00
47	0,0144	339730,74	0,0152	348590,28	0,0148	345412,91	0,0100	3,7806	4,89E-20
45	0,0145	324944,85	0,0153	333811,19	0,0149	328605,26	0,0108	3,807559	7,33E-20
43	0,0145	305227,86	0,0155	314688,00	0,0151	311015,11	0,0121	3,859367	4,46E-20
41	0,0149	297296,03	0,0157	302917,68	0,0153	299966,50	0,0136	3,937544	-1,88E-19
39	0,0147	275596,97	0,0160	285114,07	0,0154	281466,73	0,0138	3,893558	-5,49E-20
37	0,0149	268907,54	0,0160	283621,90	0,0155	276323,54	0,0140	3,889549	4,48E-20

## Septiembre 20 de 2011





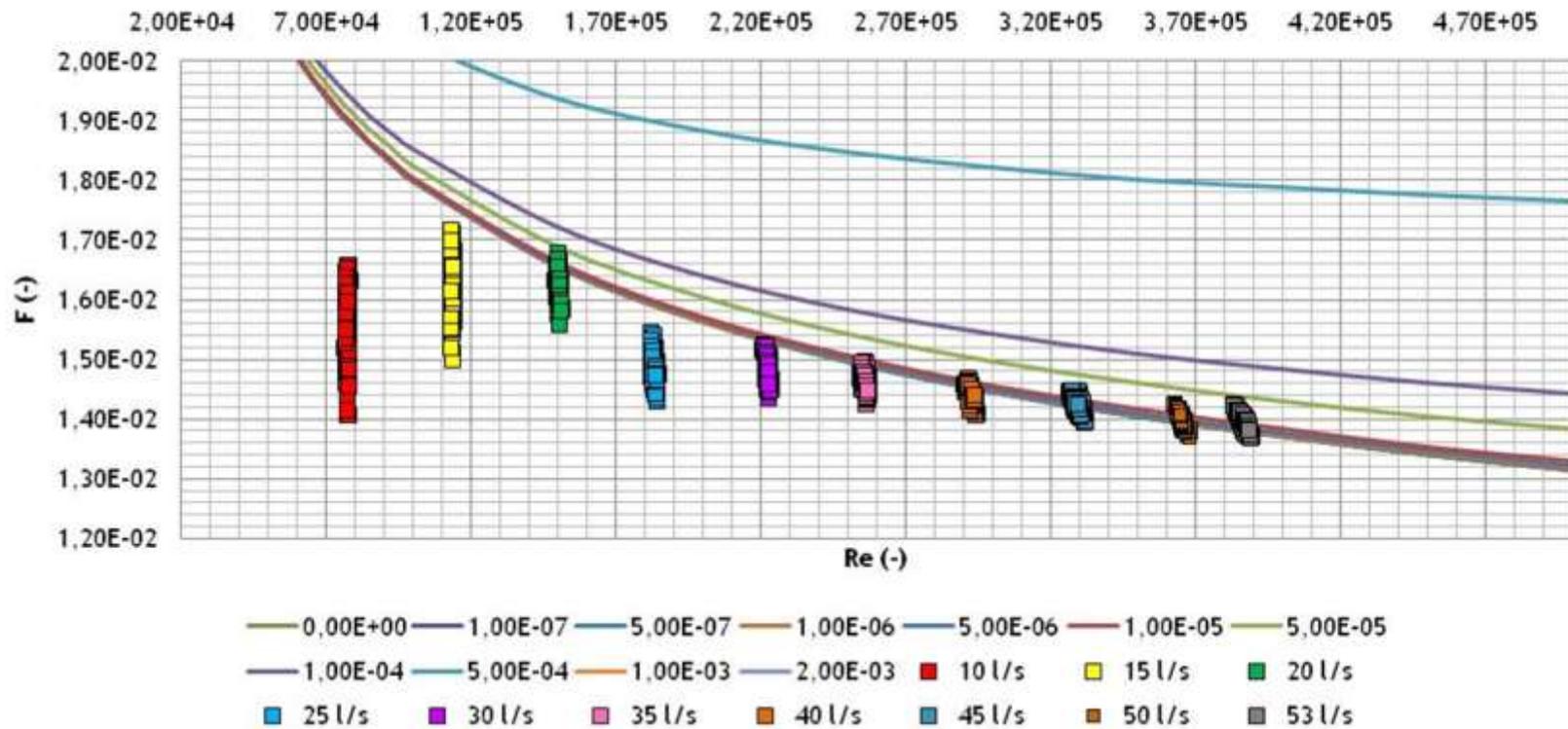


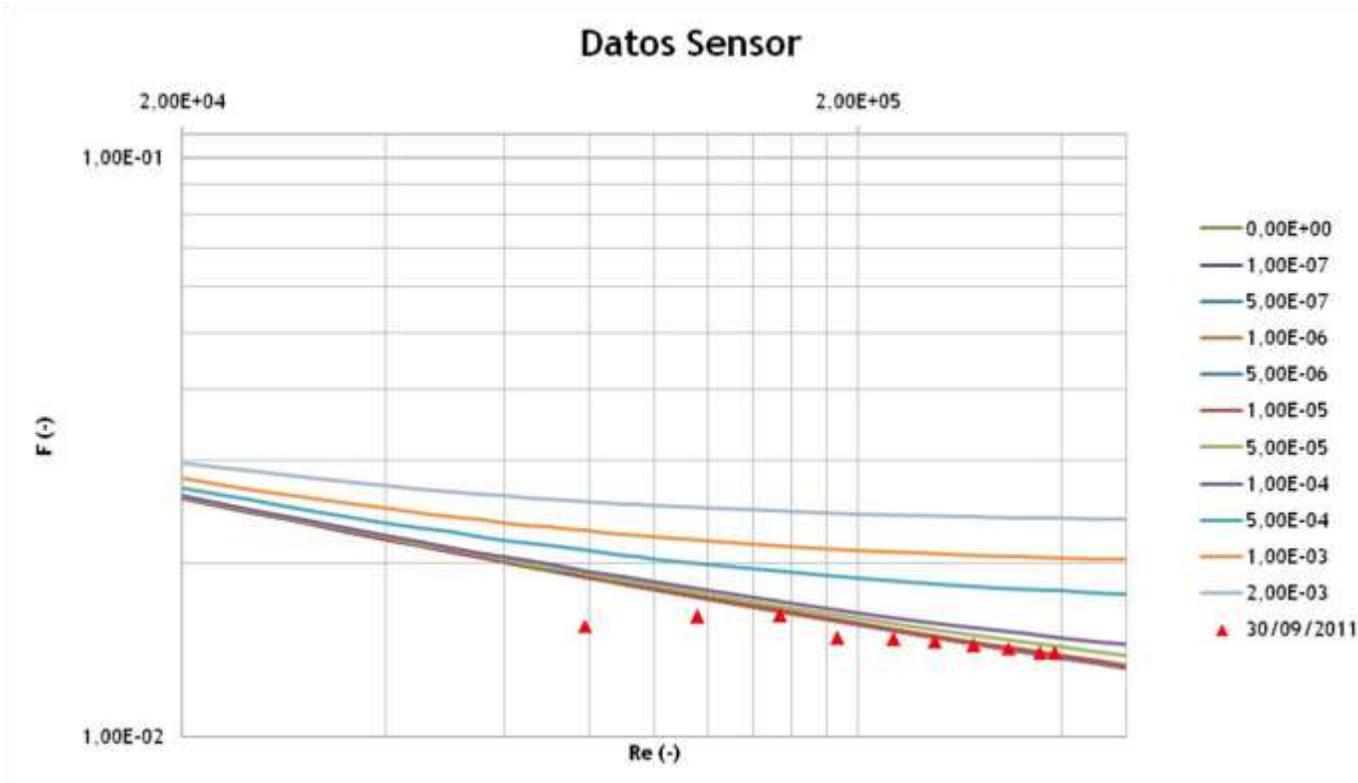


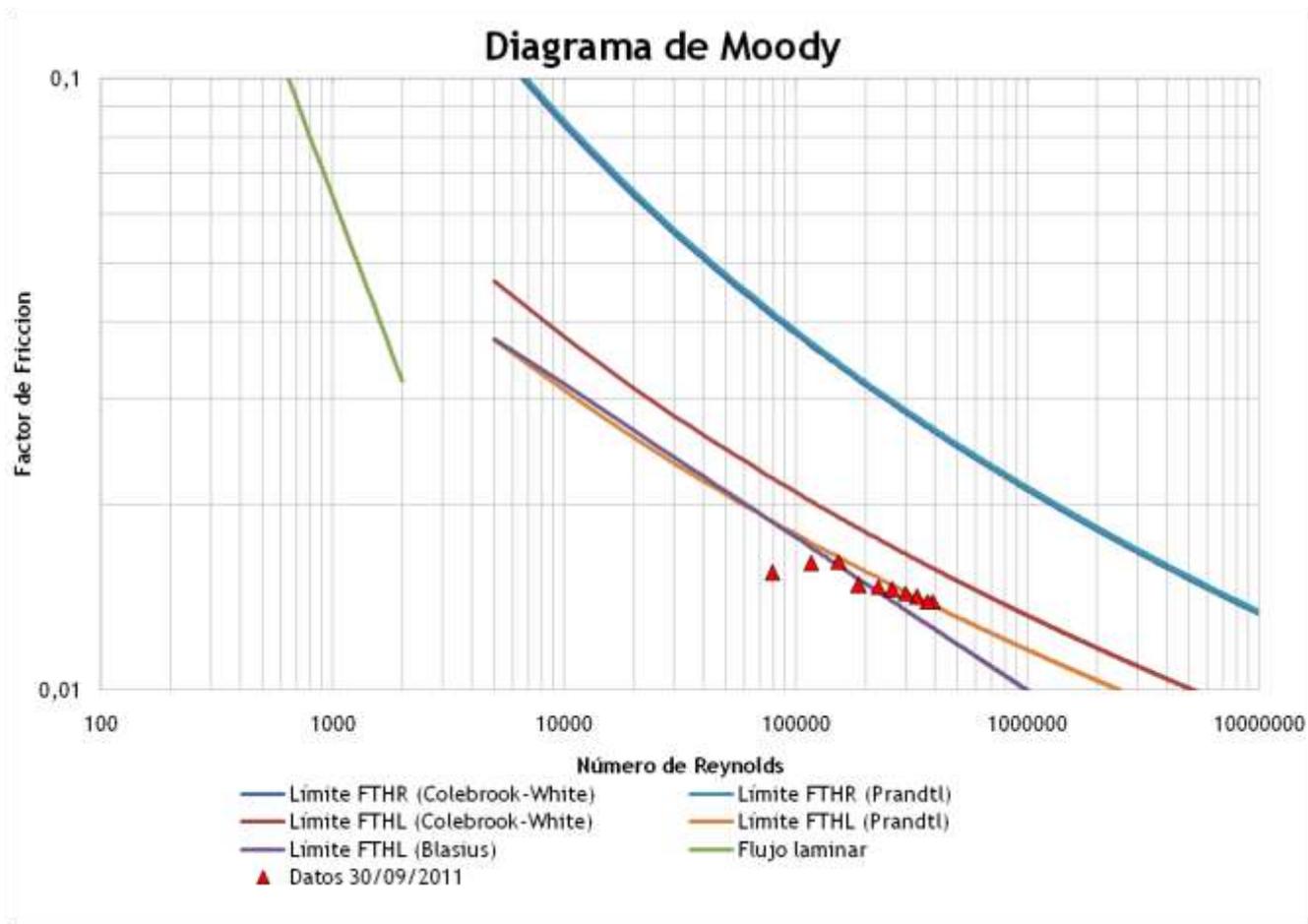
**Semana 2: Septiembre 30 de 2011**

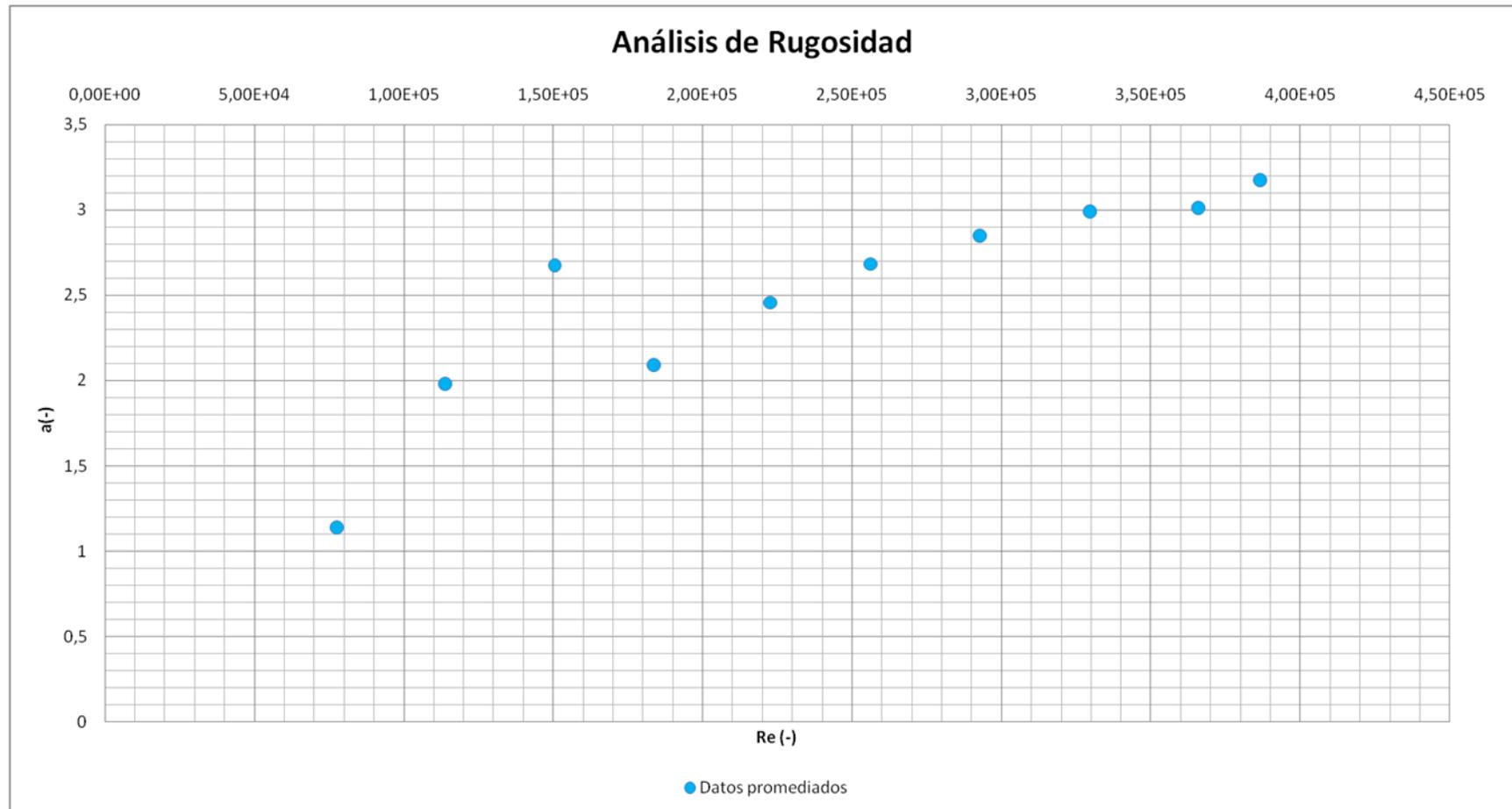
Septiembre 30 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
53	0,0137	383172,63	0,0142	389393,17	0,0140	386495,73	0,0023	3,177767	0,00E+00
50	0,0137	363055,33	0,0143	386495,73	0,0140	365820,09	0,0005	3,014049	0,00E+00
45	0,0139	326683,80	0,0145	332060,86	0,0142	329502,76	0,0004	2,991452	0,00E+00
40	0,0141	290197,88	0,0147	294764,36	0,0144	292648,29	-0,0016	2,851418	0,00E+00
35	0,0142	254196,00	0,0150	257692,27	0,0146	256151,79	-0,0044	2,683951	-1,90E-19
30	0,0144	220776,81	0,0152	223929,93	0,0148	222593,25	-0,0093	2,457082	-5,69E-19
25	0,0143	182361,91	0,0154	184727,01	0,0149	183542,85	-0,0195	2,092609	6,17E-19
20	0,0156	149295,78	0,0168	151566,65	0,0162	150461,85	-0,0068	2,677266	0,00E+00
15	0,0150	113302,38	0,0172	114640,35	0,0162	113851,55	-0,0336	1,980211	2,85E-19
10	0,0141	77514,93	0,0166	78349,78	0,0156	77514,93	-0,0948	1,138208	3,32E-19

### Septiembre 30 de 2011





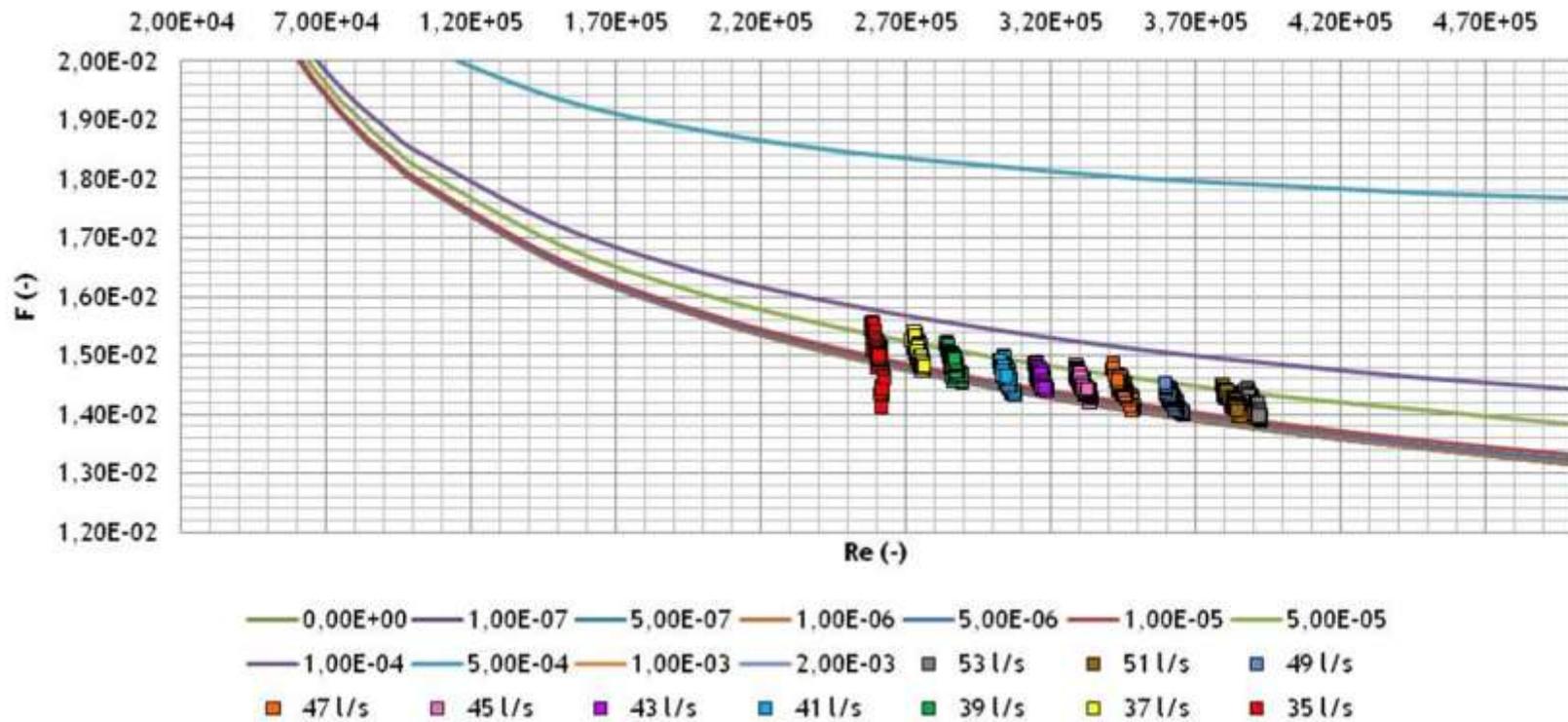


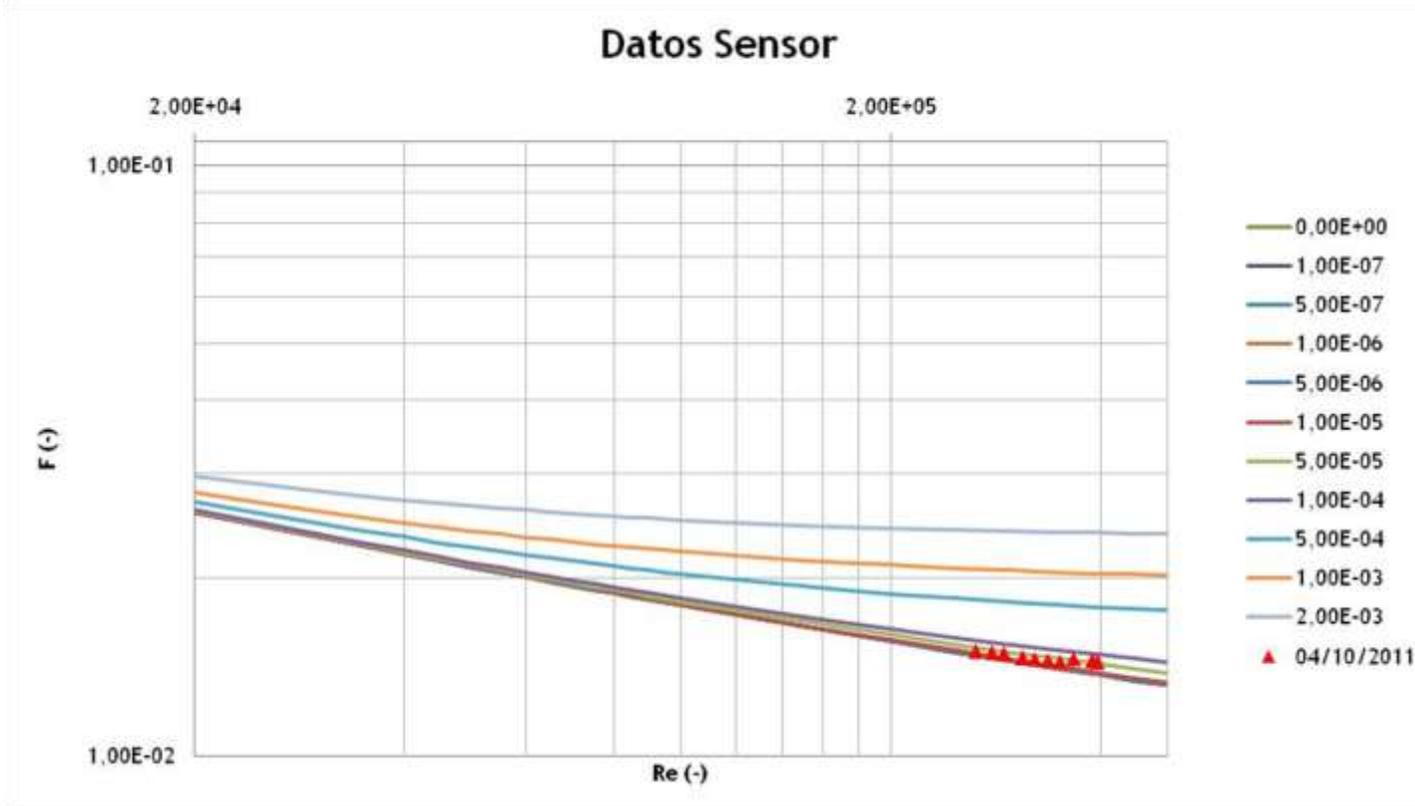


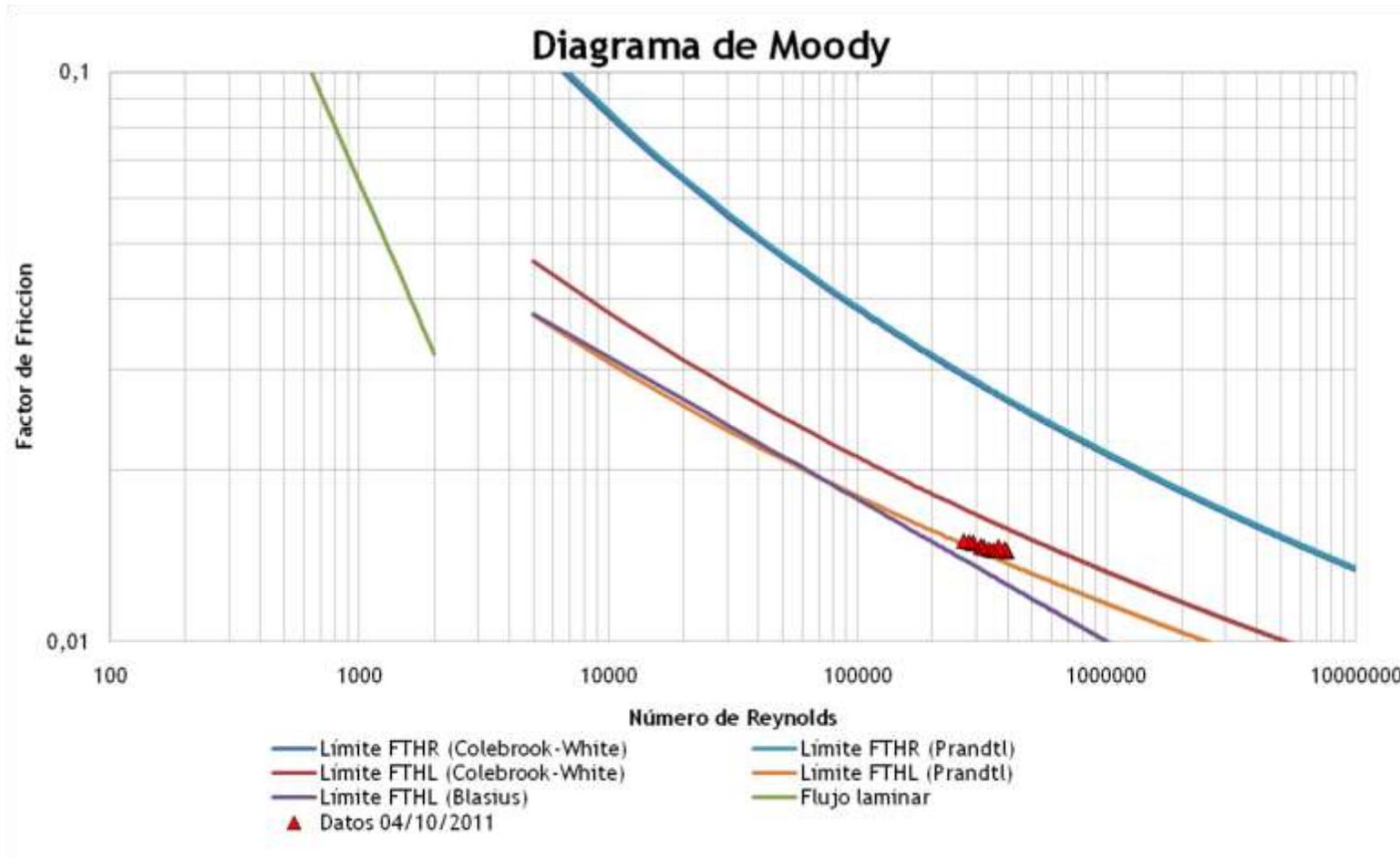
**Semana 3: Octubre 4 de 2011**

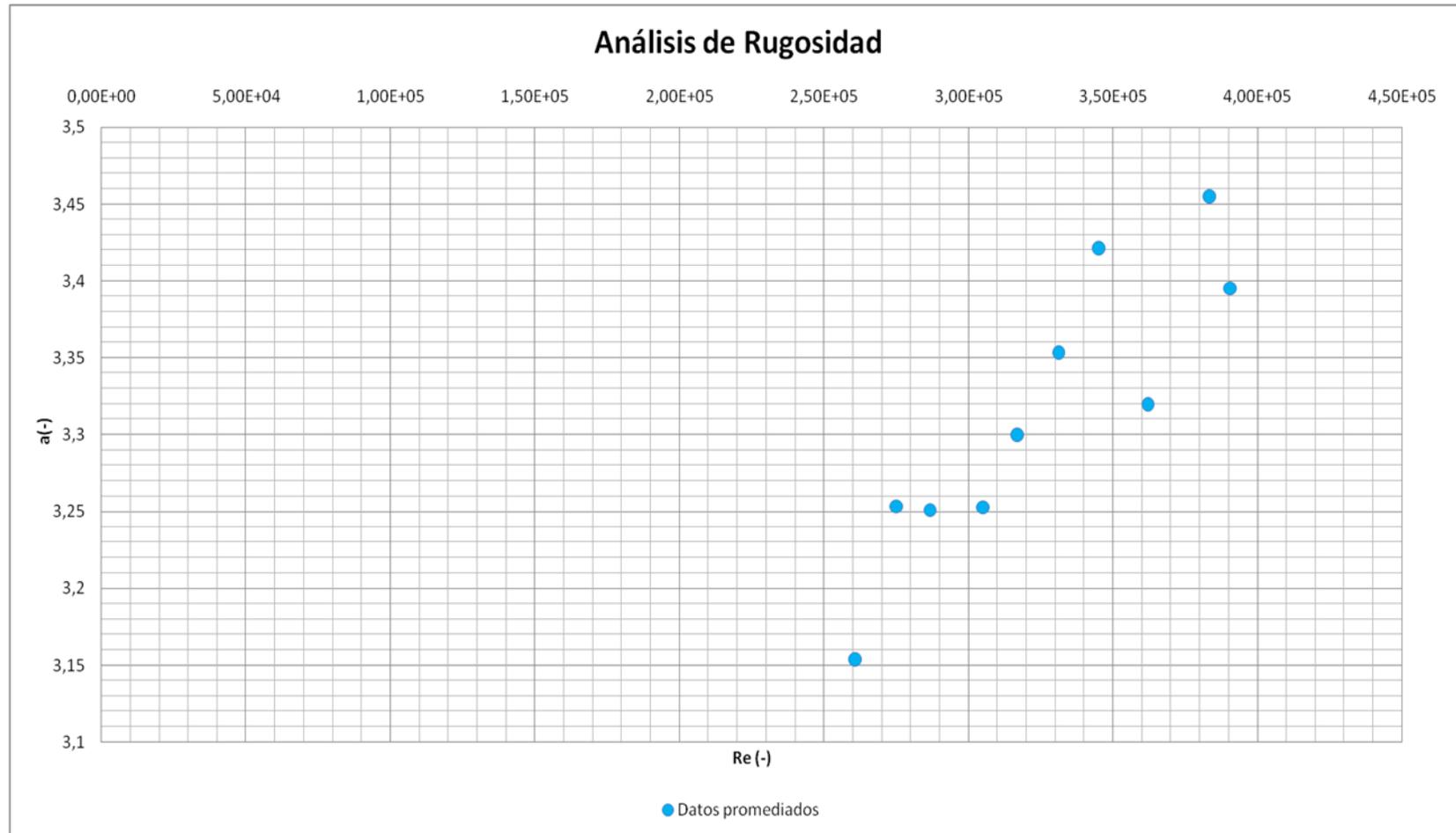
Octubre 04 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
53	0,0139	387302,63	0,0144	392860,70	0,0141	390414,28	0,0047	3,395269	0,00E+00
51	0,0140	386841,09	0,0145	386841,09	0,0142	383202,54	0,0054	3,455146	0,00E+00
49	0,0140	359443,35	0,0145	365859,69	0,0143	362036,69	0,0042	3,319719	0,00E+00
47	0,0141	341506,93	0,0148	348909,24	0,0145	344905,37	0,0056	3,421242	0,00E+00
45	0,0142	328873,42	0,0149	334279,00	0,0145	331150,68	0,0050	3,353507	0,00E+00
43	0,0144	314889,00	0,0149	318866,07	0,0146	316843,37	0,0045	3,299756	0,00E+00
41	0,0143	302309,67	0,0150	308202,89	0,0147	304946,90	0,0041	3,252688	0,00E+00
39	0,0145	284189,09	0,0152	289659,55	0,0149	286750,05	0,0043	3,25070	0,00E+00
37	0,0147	272488,32	0,0154	276567,17	0,0150	275067,37	0,0045	3,253152	0,00E+00
35	0,0141	258670,35	0,0156	262554,61	0,0150	260693,76	0,0032	3,15346	-4,74E-20

### Octubre 4 de 2011





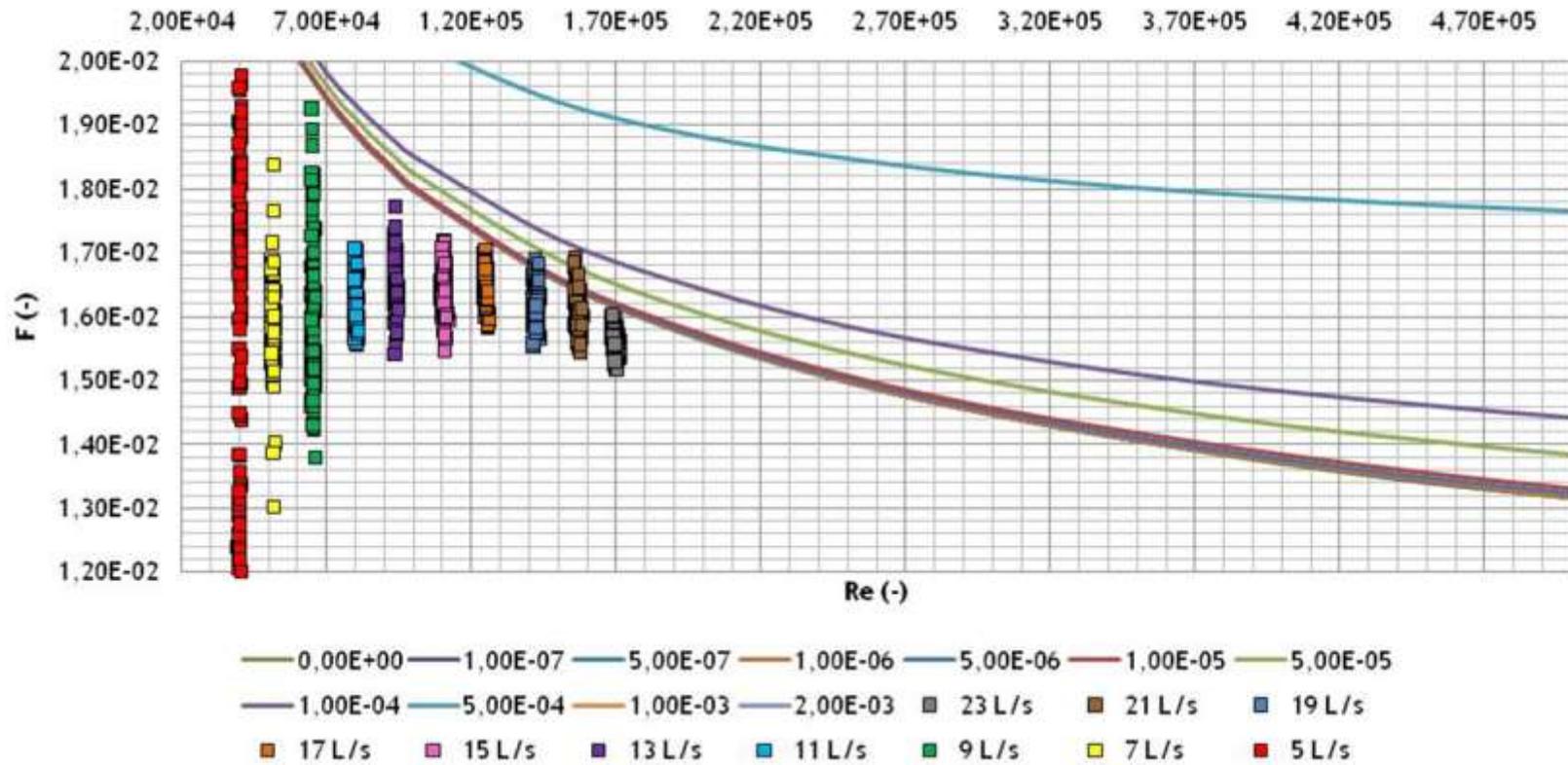


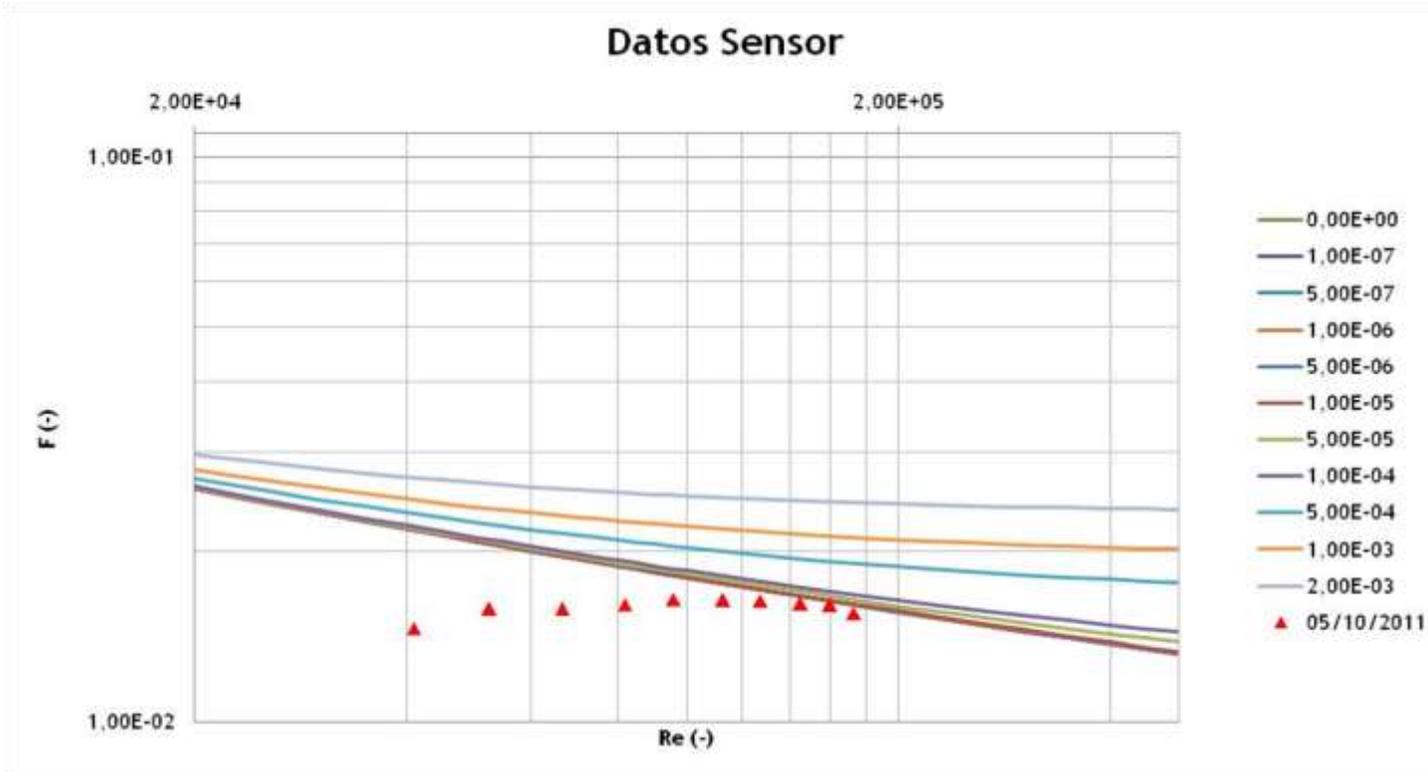


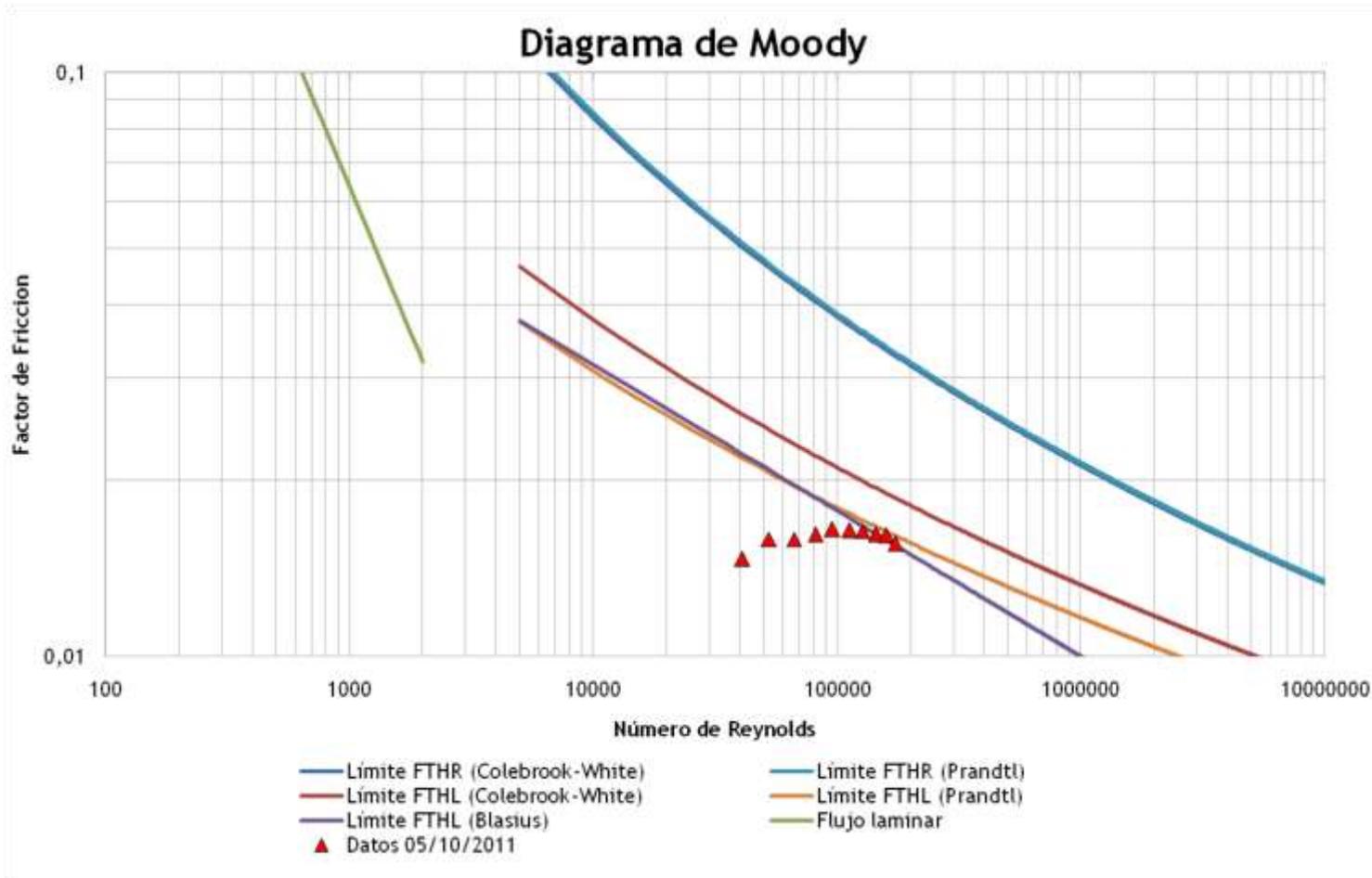
**Semana 3: Octubre 5 de 2011**

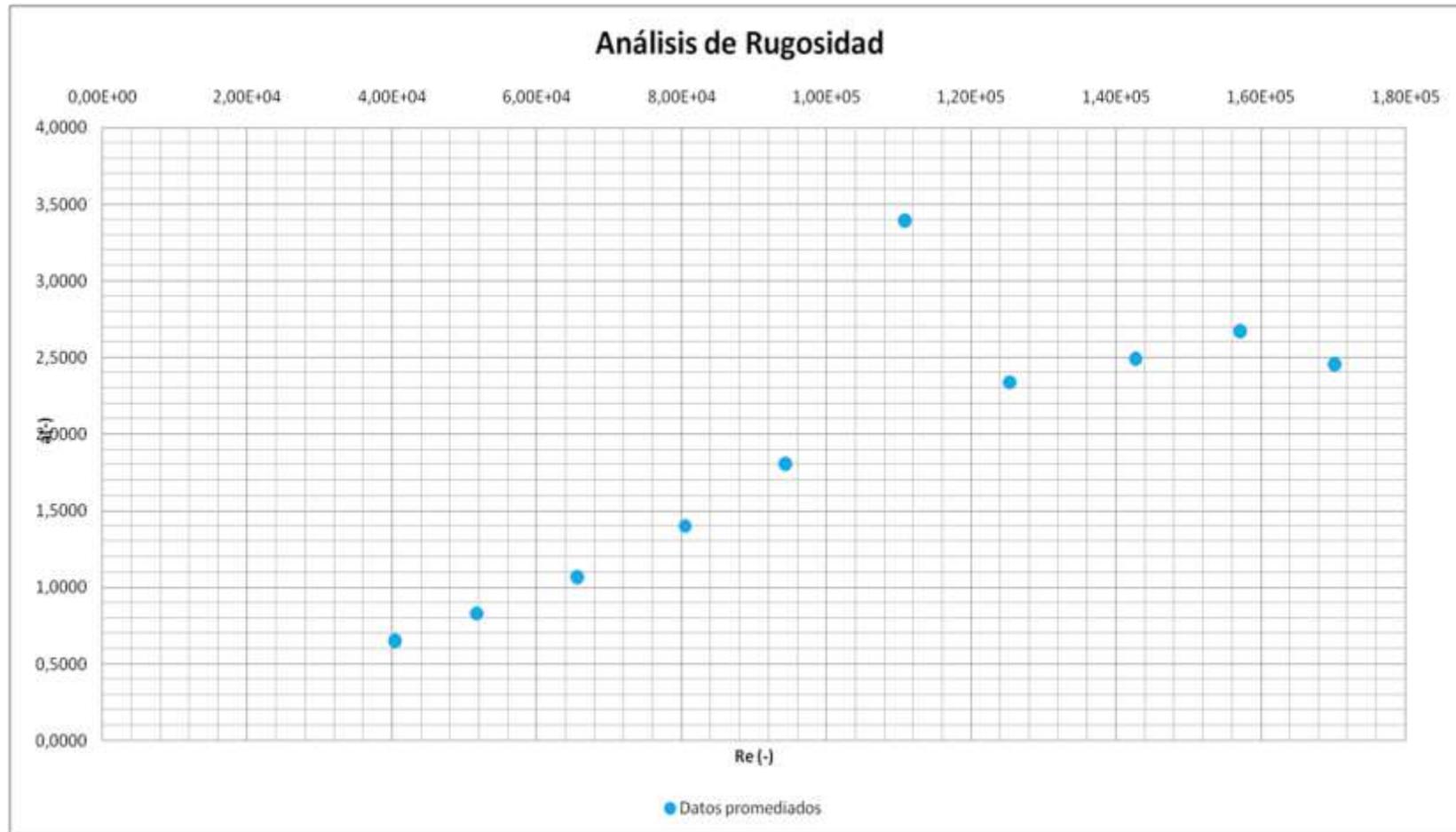
Octubre 05 de 2011								
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio			
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)
23	0,0152	168622,55	0,0160	171578,95	0,0156	170200,79	-0,0116	2,4556
21	0,0154	158631,92	0,0169	158631,92	0,0161	157083,98	-0,0067	2,6741
19	0,0155	141551,96	0,0169	143832,38	0,0162	142696,14	-0,0124	2,4929
17	0,0158	124598,17	0,0171	126369,68	0,0164	125331,40	-0,0188	2,3393
15	0,0154	109941,05	0,0172	112267,73	0,0164	110816,28	-0,0299	3,3953
13	0,0154	93235,77	0,0177	94857,58	0,0165	94288,33	-0,0473	1,8076
11	0,0155	79944,26	0,0170	81382,91	0,0162	80490,39	-0,0762	1,4021
9	0,0138	64975,94	0,0192	66168,51	0,0158	65584,65	-0,1159	1,0676
7	0,0119	51191,39	0,0184	52300,09	0,0159	51715,43	-0,1649	0,8292
5	0,0088	39888,38	0,0214	40997,08	0,0147	40384,52	-0,2483	0,6513

### Octubre 5 de 2011





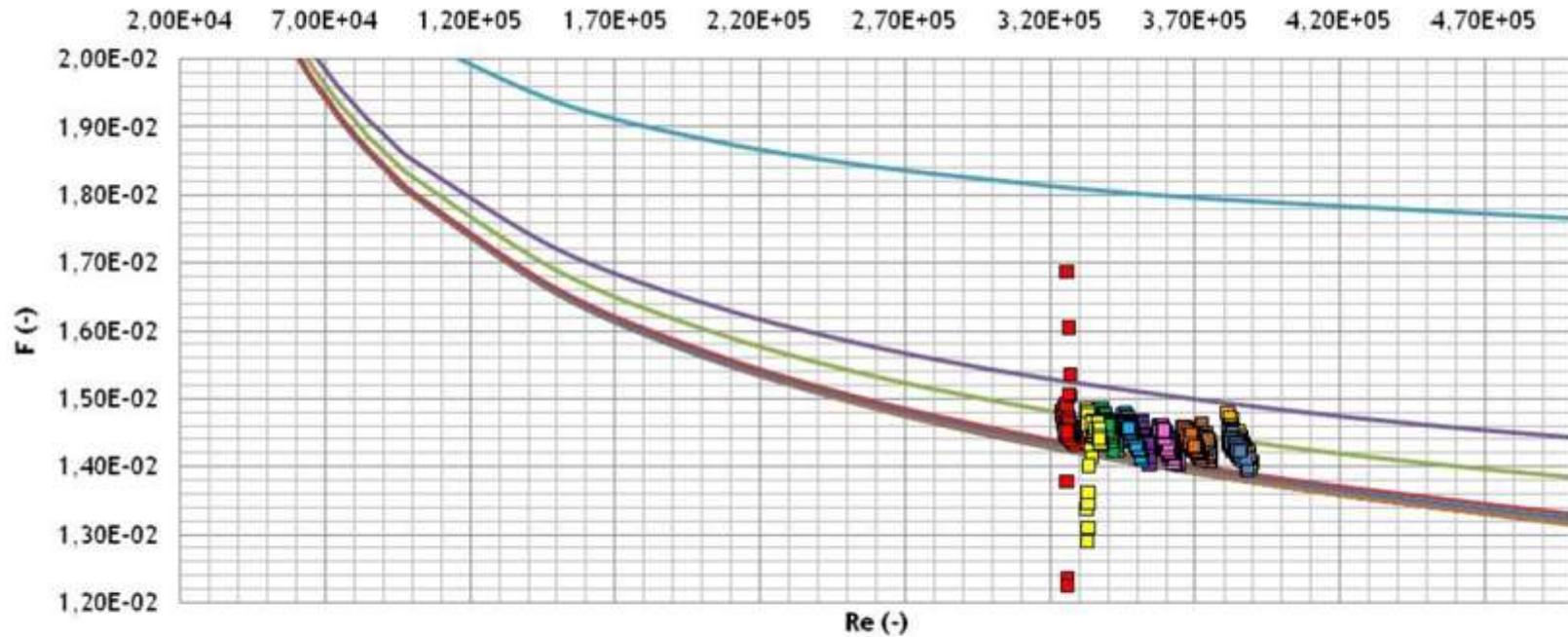


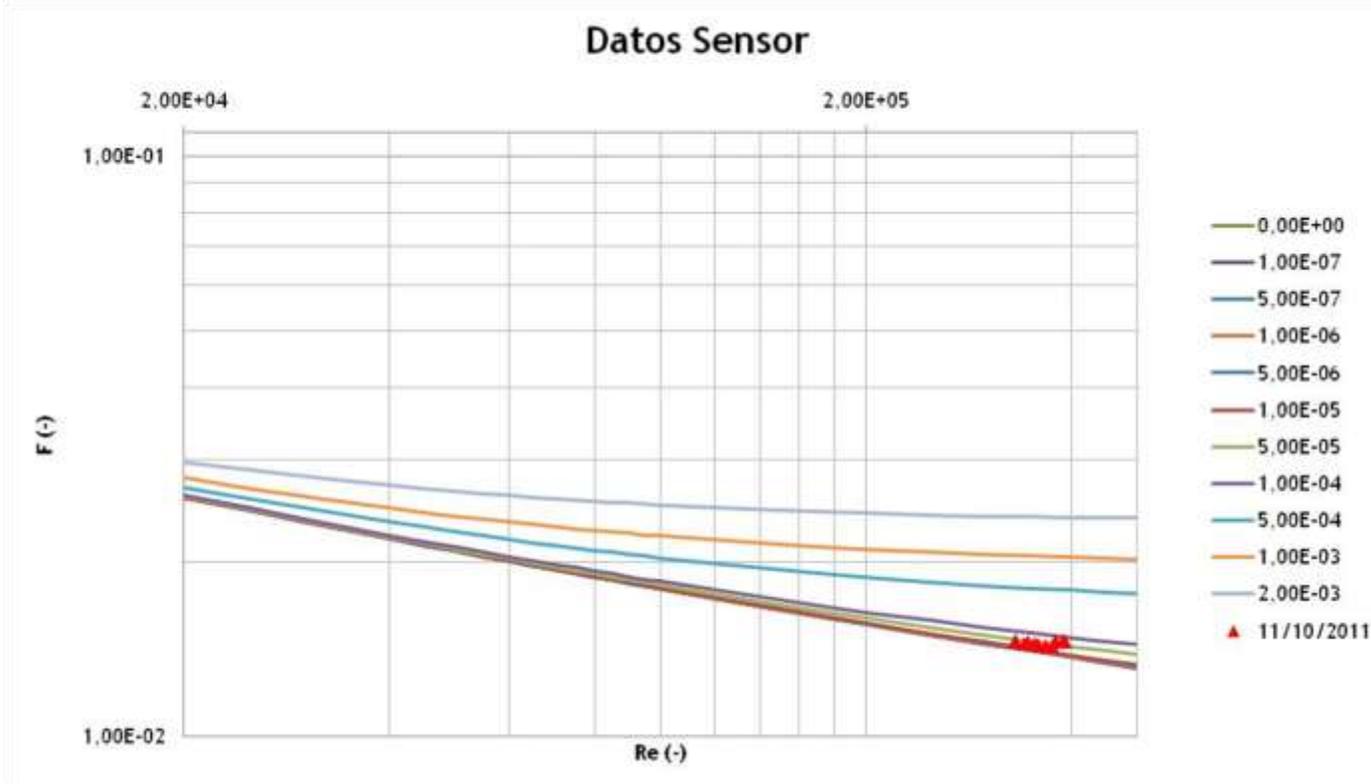


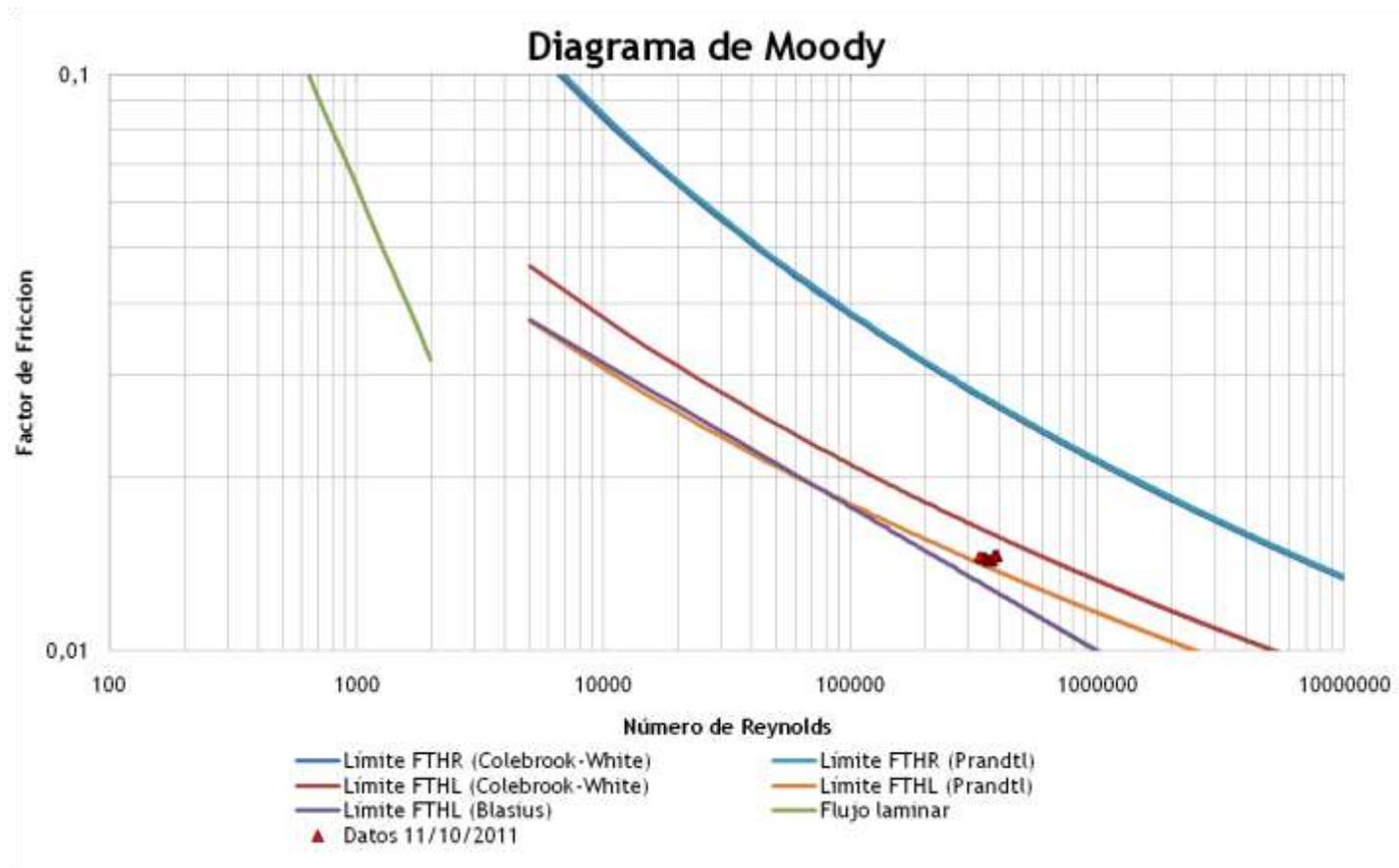
**Semana 4: Octubre 11 de 2011**

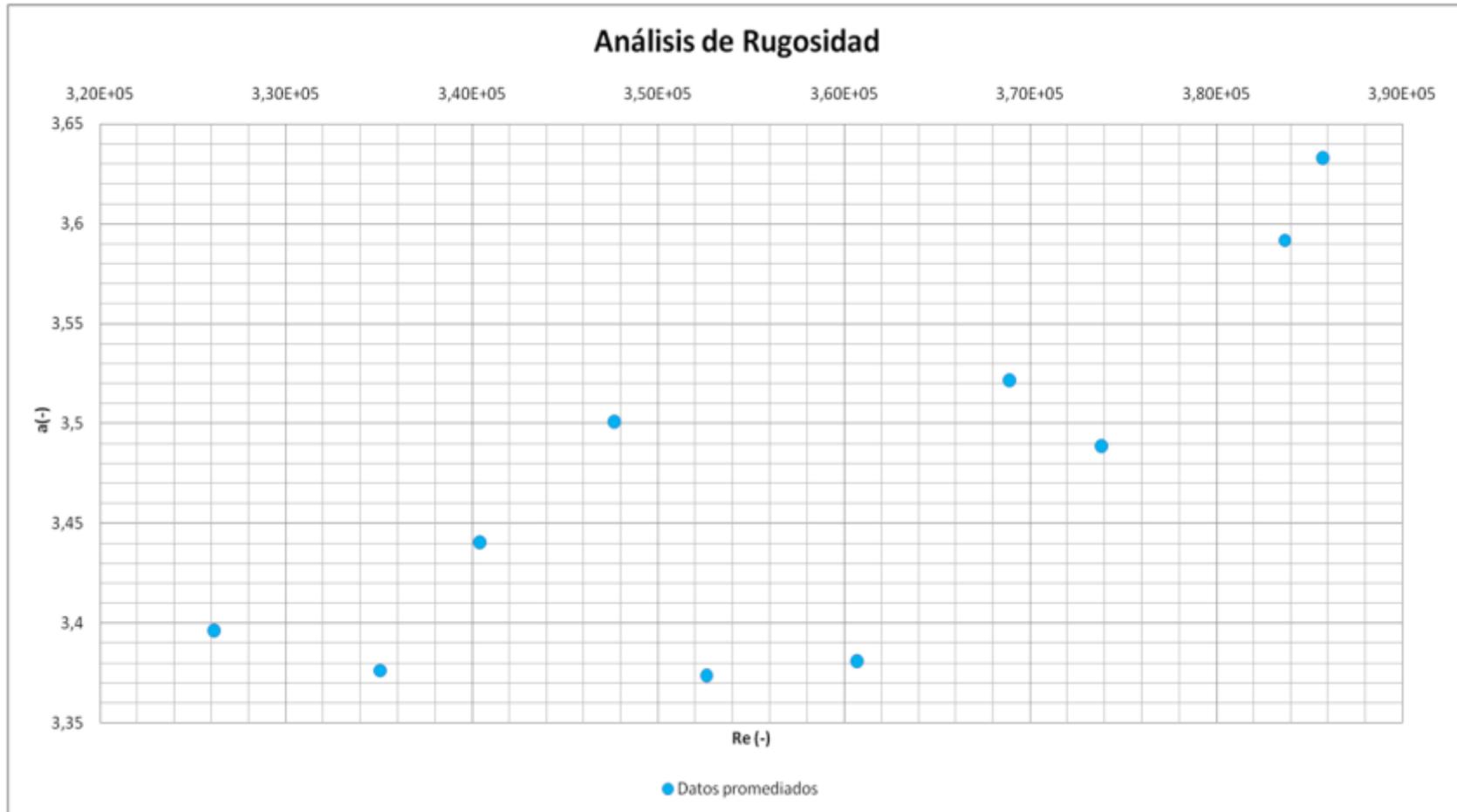
Octubre 11 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
52	0,0140	381644,47	0,0148	389927,91	0,0143	385712,58	0,0073	3,63324	0,00E+00
51	0,0139	388151,22	0,0145	388151,22	0,0143	383668,99	0,0069	3,59179	0,00E+00
50	0,0141	371761,42	0,0146	375839,69	0,0143	373816,18	0,0059	3,48891	0,00E+00
49	0,0141	365659,56	0,0146	372419,46	0,0144	368875,62	0,0064	3,52170	0,00E+00
48	0,0140	357578,92	0,0146	364692,53	0,0143	360686,66	0,0049	3,38096	0,00E+00
47	0,0140	350520,73	0,0147	355111,05	0,0144	352613,04	0,0049	3,37365	0,00E+00
46	0,0141	345674,14	0,0148	351985,72	0,0145	347646,67	0,0065	3,50100	0,00E+00
45	0,0142	337848,91	0,0148	343591,38	0,0145	340410,20	0,0059	3,44063	0,00E+00
44	0,0129	332261,39	0,0149	338109,21	0,0145	335069,42	0,0052	3,37630	2,37E-20
43	0,0122	323934,82	0,0169	329634,93	0,0146	326134,35	0,0056	3,39627	0,00E+00

Octubre 11 de 2011





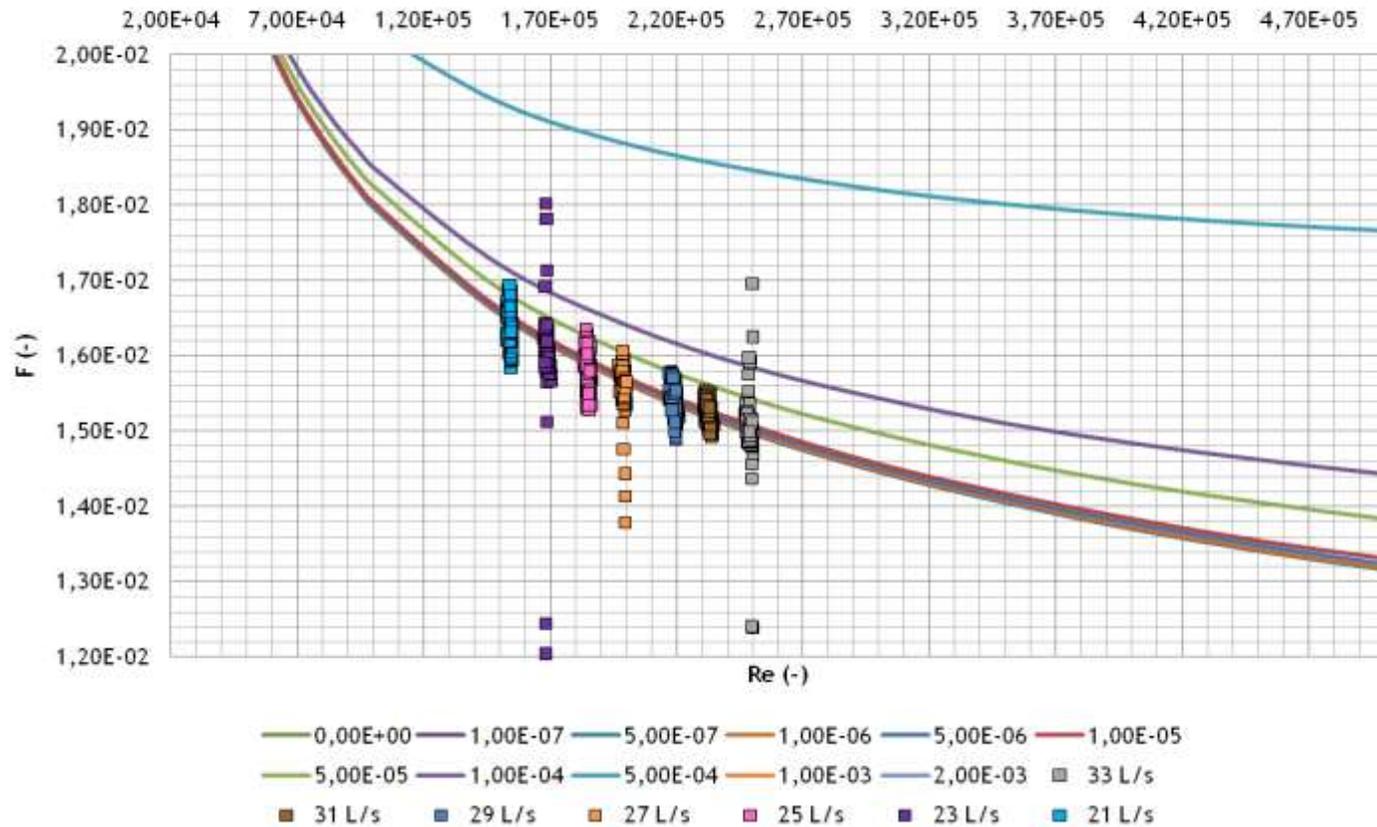


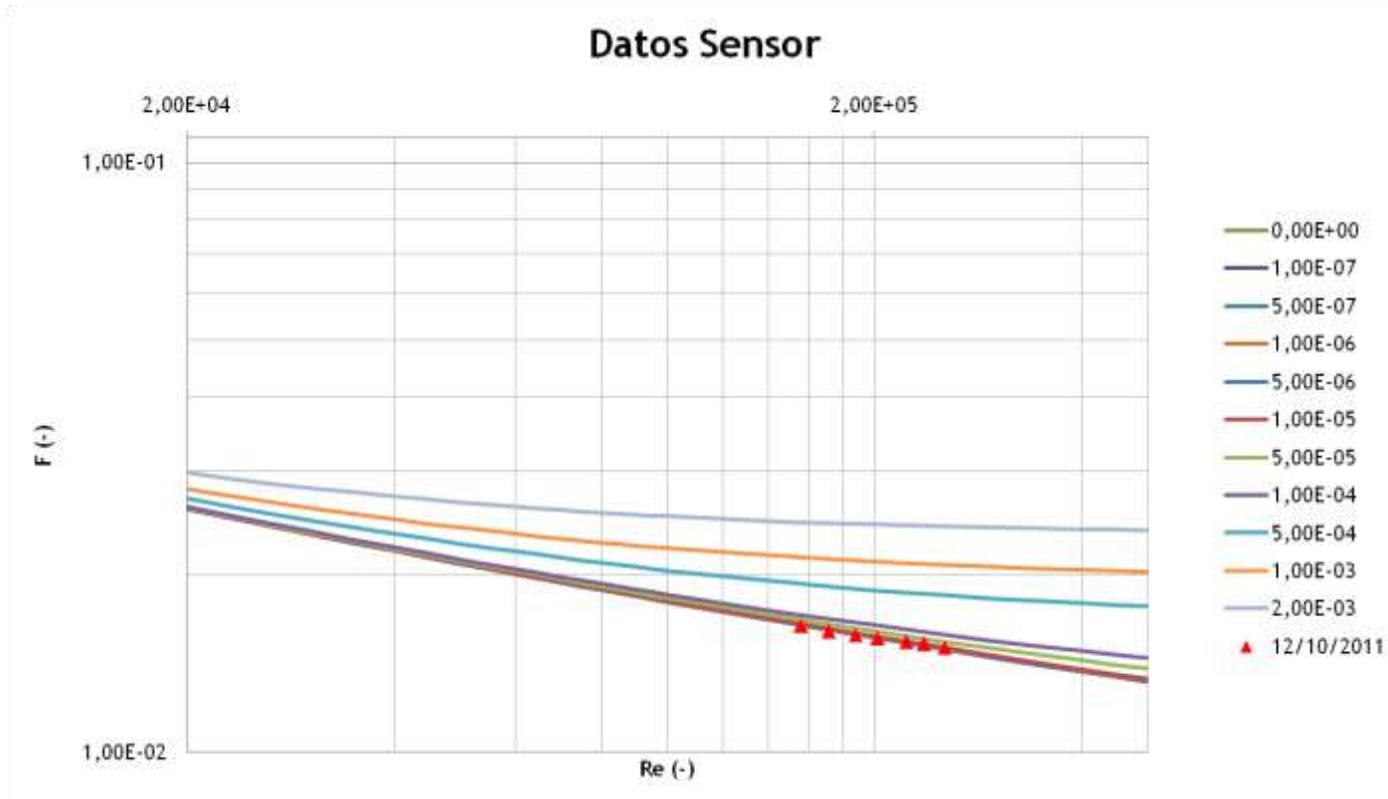


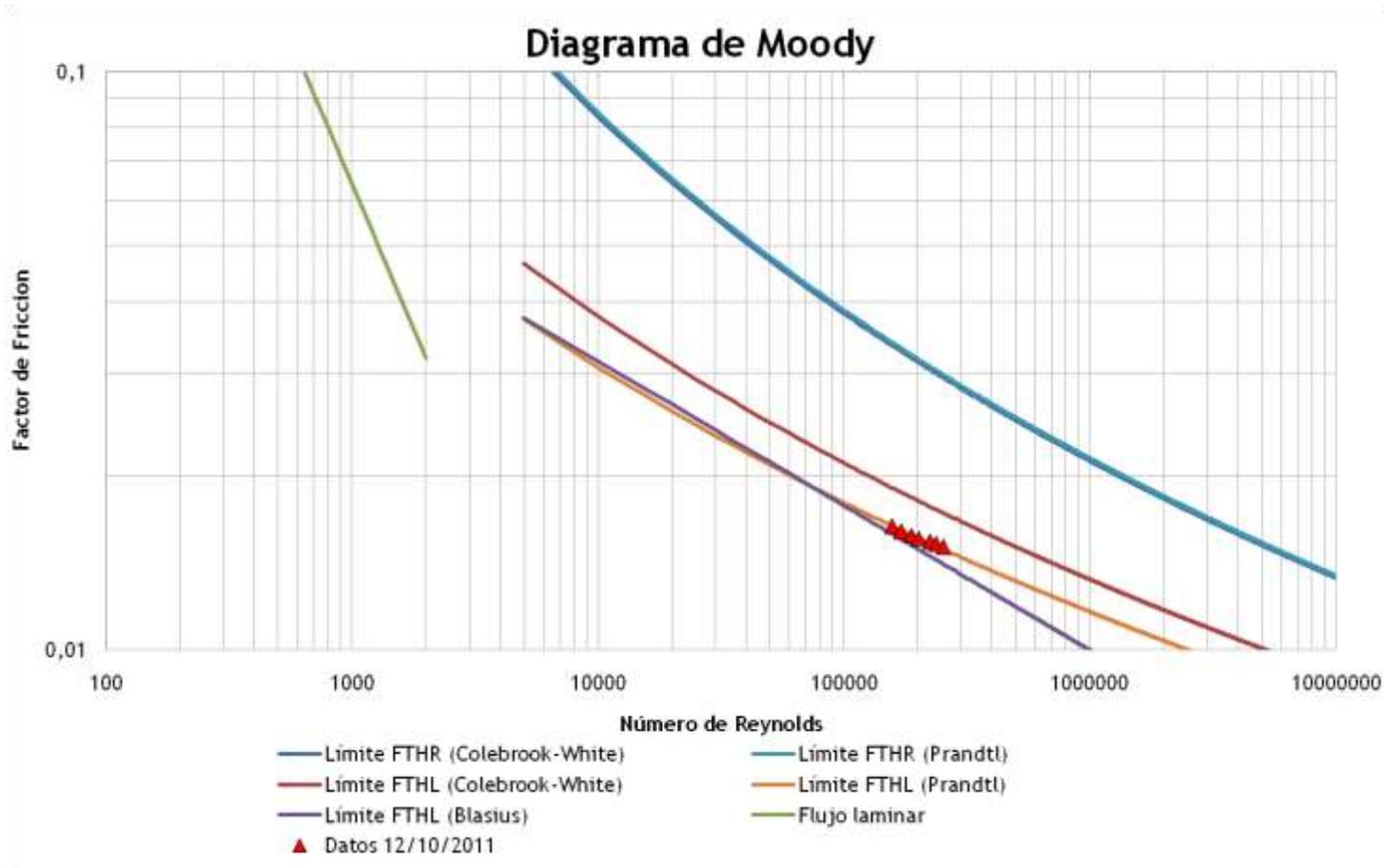
**Semana 4: Octubre 12 de 2011**

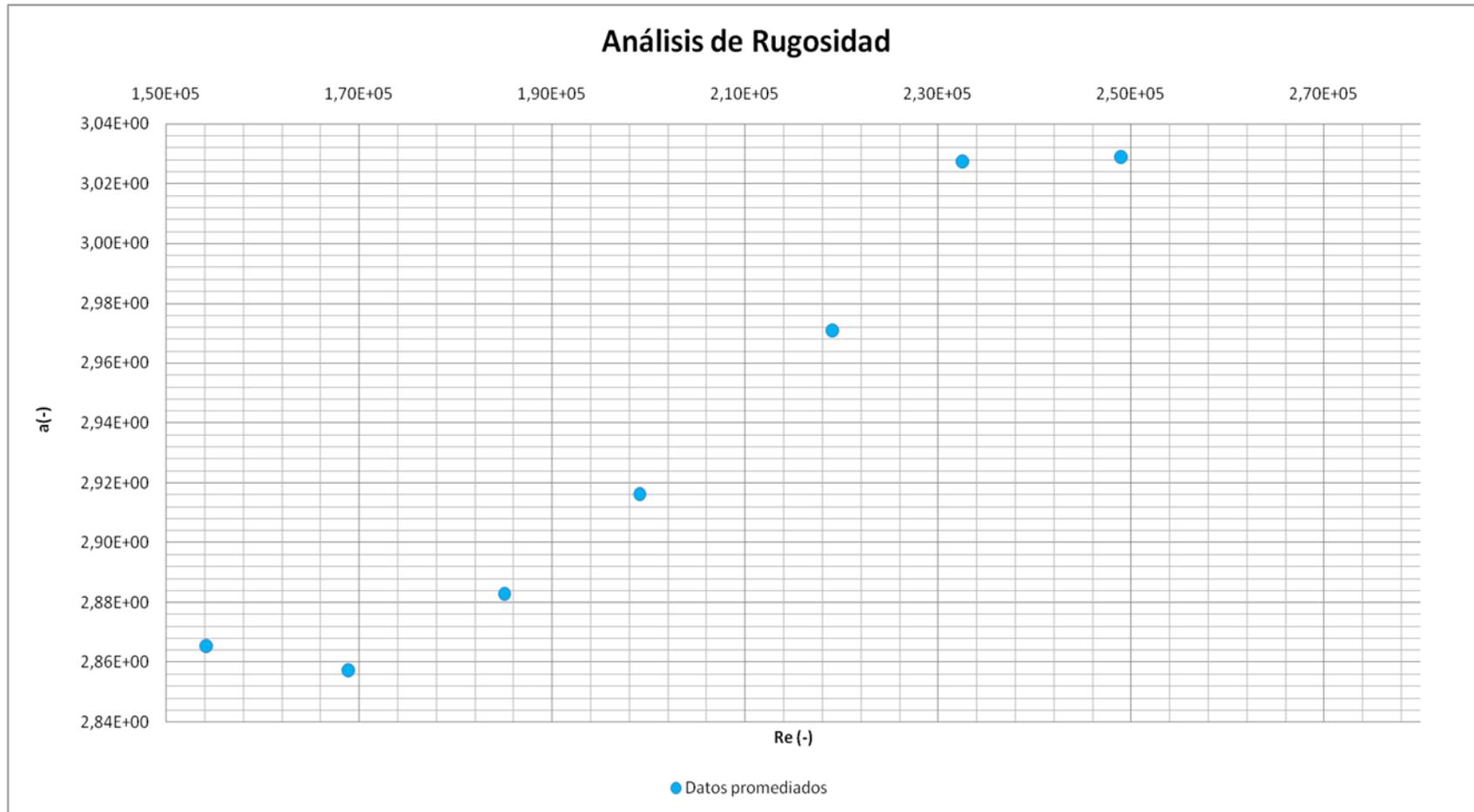
Octubre 12 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
33	0,0124	247533,23	0,0170	250410,54	0,0150	248990,07	0,0012	3,02866	-1,42E-19
31	0,0149	234590,98	0,0155	234590,98	0,0153	232594,29	0,0014	3,02724	-1,42E-19
29	0,0149	217513,47	0,0158	220872,27	0,0154	219101,81	0,0005	2,97076	-2,37E-19
27	0,0138	197601,61	0,0161	200080,46	0,0156	199084,09	-0,0005	2,91600	
25	0,0153	183822,72	0,0163	186454,29	0,0158	185074,52	-0,0012	2,88267	
23	0,0120	167975,75	0,0204	170370,92	0,0160	168951,51	-0,0021	2,85704	
21	0,0158	153190,75	0,0169	155197,14	0,0164	154244,48	-0,0017	2,86517	
19	0,0164	140091,04	0,0176	142075,42	0,0171	141036,75	0,0074	3,18943	0,00E+00
17	0,0168	123157,60	0,0181	124670,30	0,0174	123941,30	0,0054	3,08860	0,00E+00
15	0,0145	108723,32	0,0232	111408,47	0,0178	110368,17	0,0050	3,06699	5,22E-19

### Octubre 12 de 2011





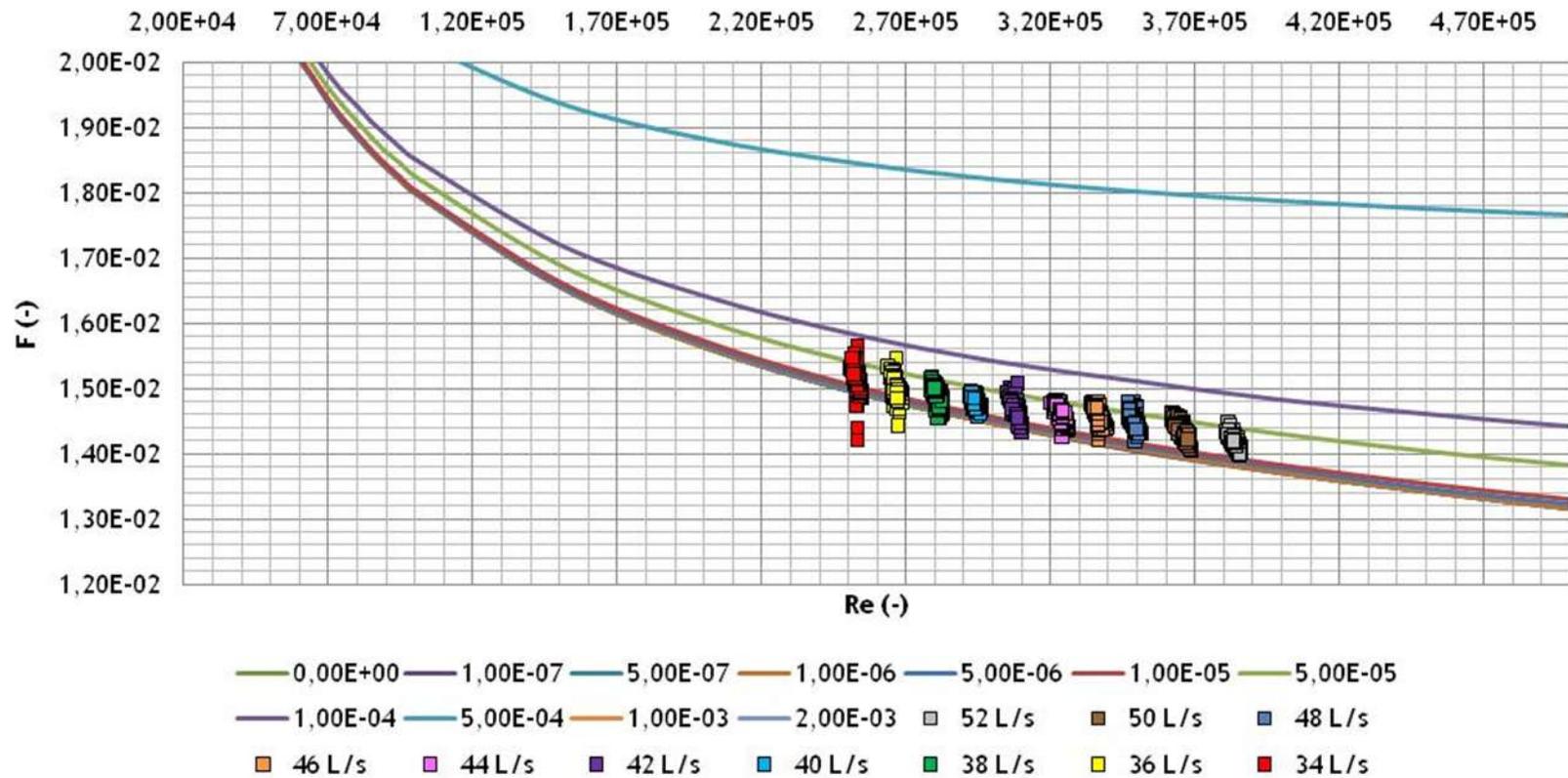


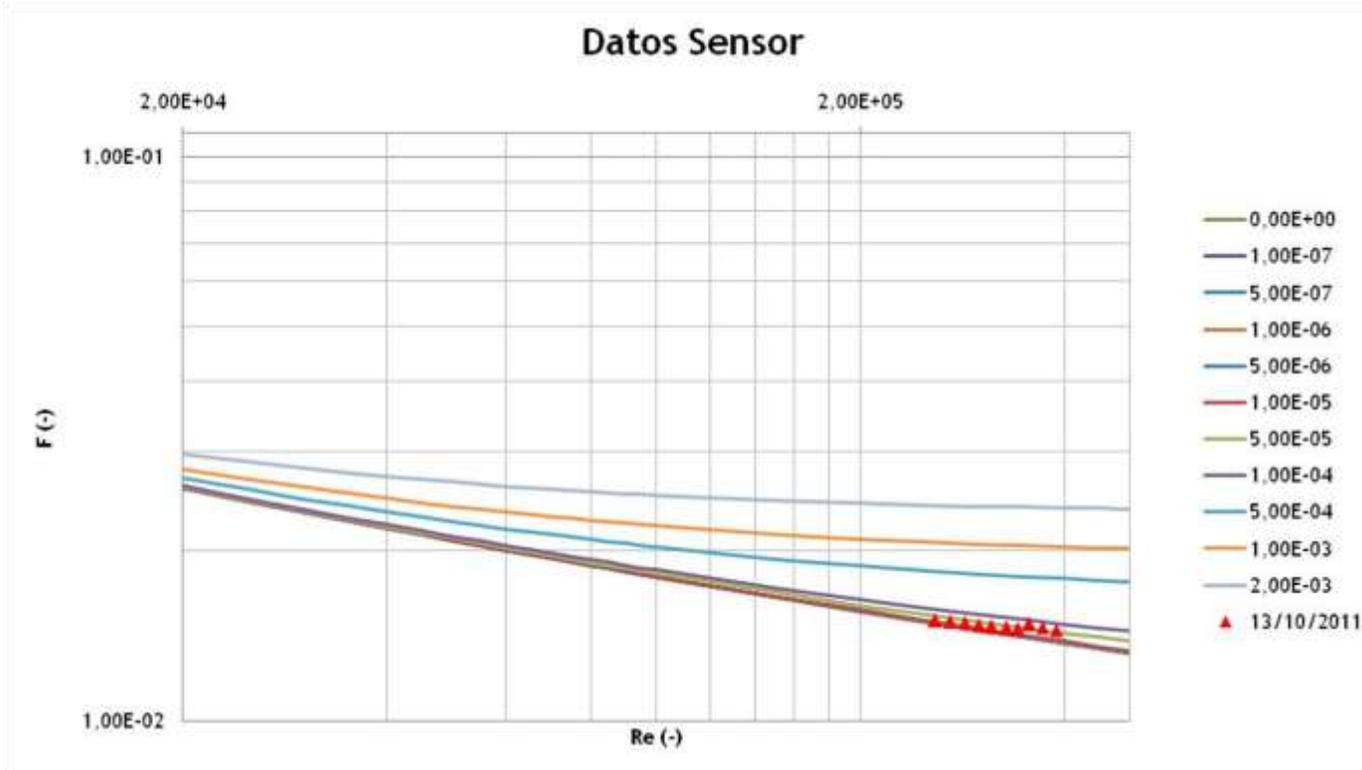


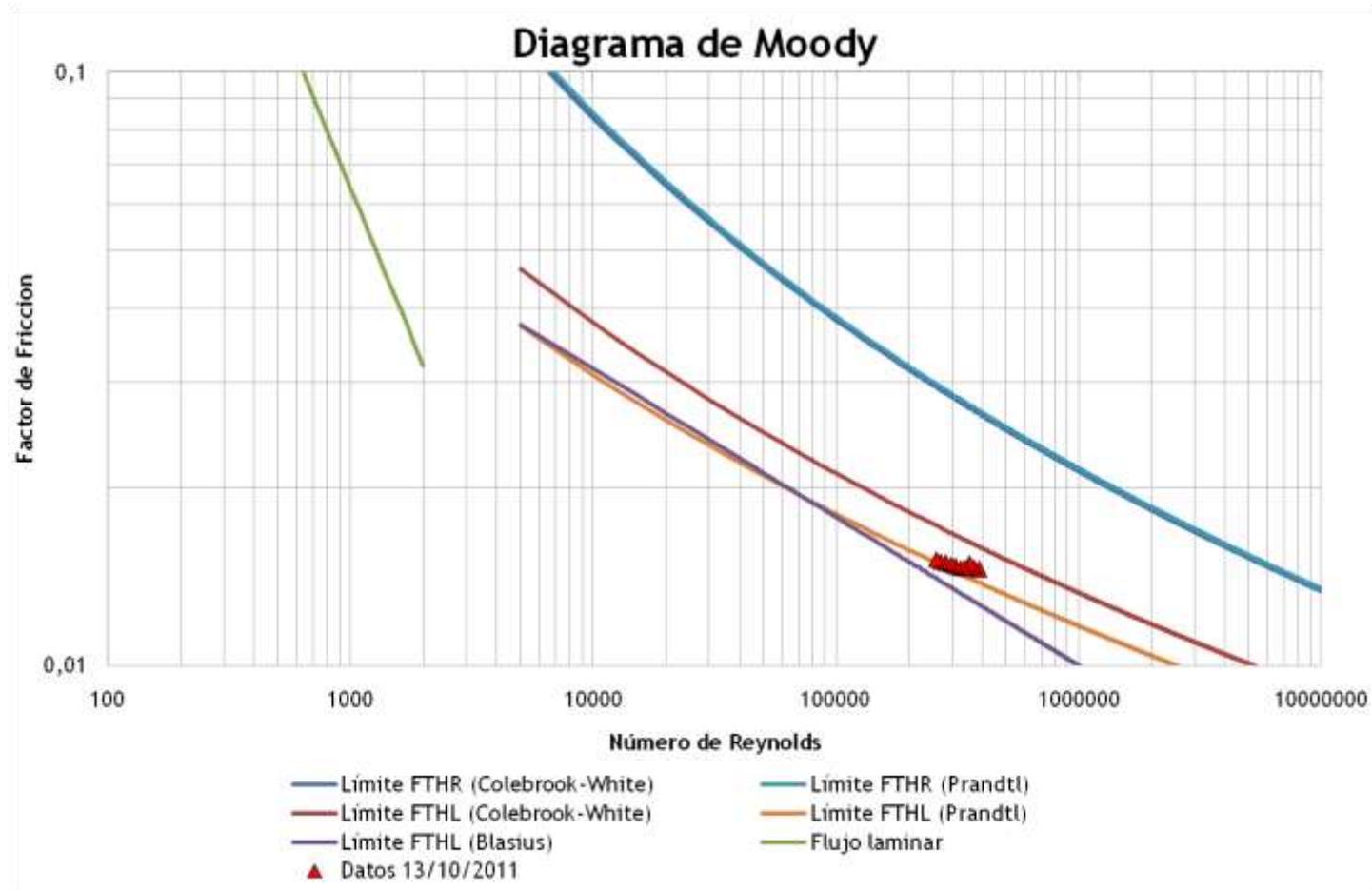
**Semana 4: Octubre 13 de 2011**

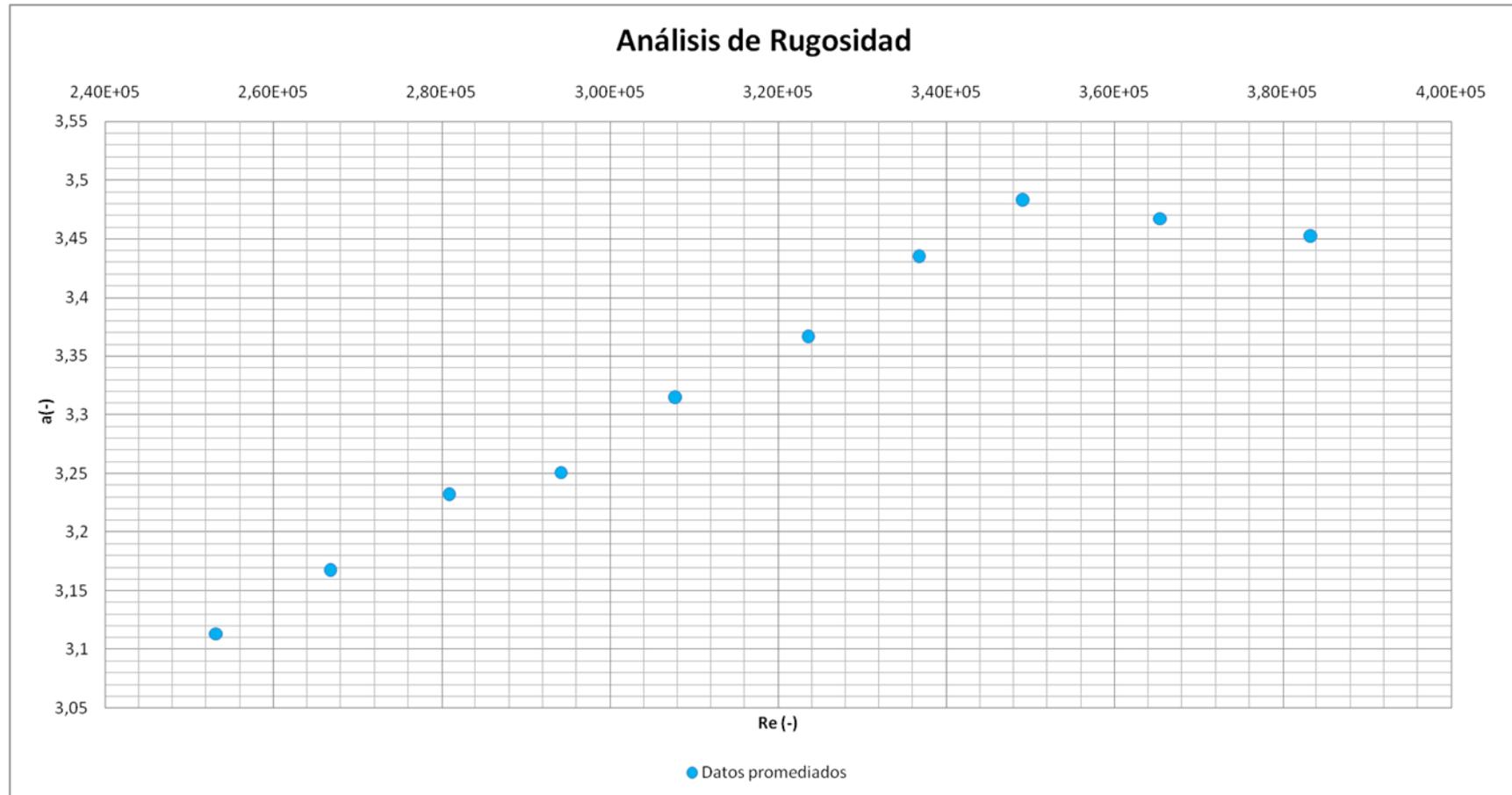
Octubre 13 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
52	0,0140	381279,21	0,0145	385766,19	0,0142	383320,53	0,0054	3,451877	0,00E+00
50	0,0140	368953,25	0,0146	368953,25	0,0144	365457,25	0,0058	3,467186	0,00E+00
48	0,0142	346694,69	0,0148	351353,29	0,0145	349114,73	0,0063	3,482769	0,00E+00
46	0,0142	333728,77	0,0148	339487,14	0,0146	336724,74	0,0059	3,434661	0,00E+00
44	0,0143	320484,32	0,0148	326063,14	0,0146	323540,06	0,0053	3,366442	0,00E+00
42	0,0143	305475,89	0,0151	310385,36	0,0147	307785,79	0,0049	3,314463	0,00E+00
40	0,0146	292260,51	0,0150	296005,25	0,0148	294122,77	0,0042	3,250926	0,00E+00
38	0,0145	278847,91	0,0152	282719,44	0,0149	280863,57	0,0041	3,23195	0,00E+00
36	0,0144	264069,80	0,0155	269010,33	0,0150	266710,82	0,0034	3,167047	4,74E-20
34	0,0142	251267,52	0,0156	254953,93	0,0151	253173,92	0,0027	3,113372	1,90E-19

## Octubre 13 de 2011





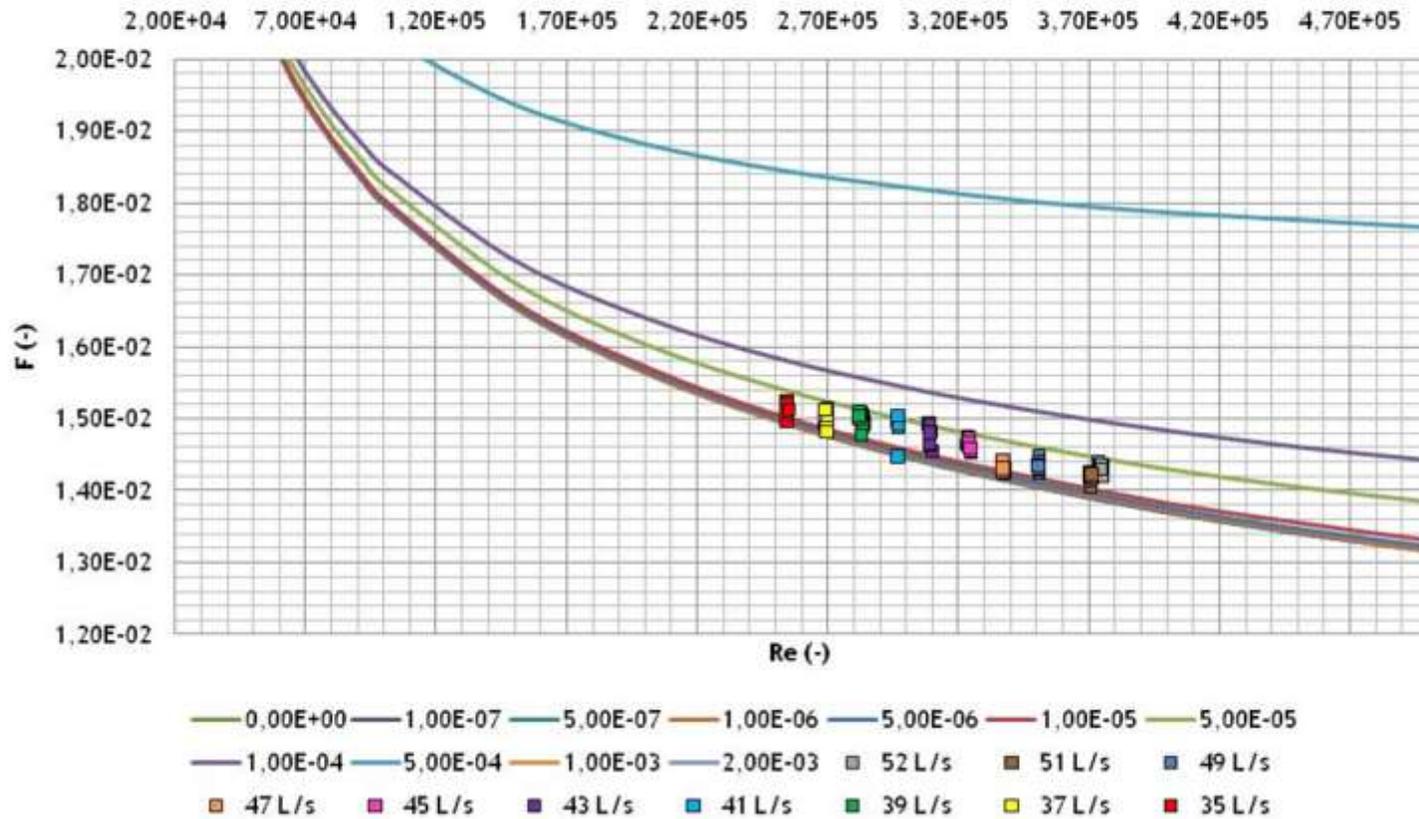


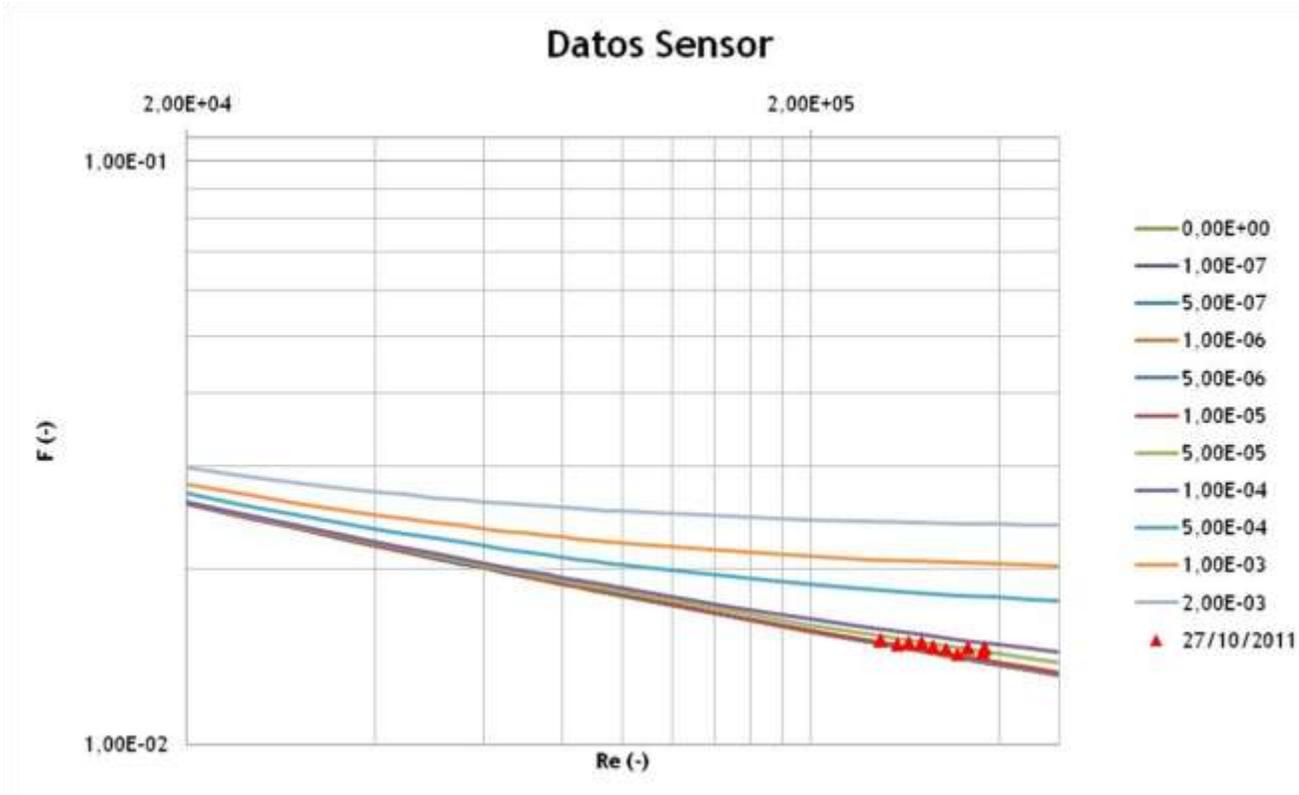


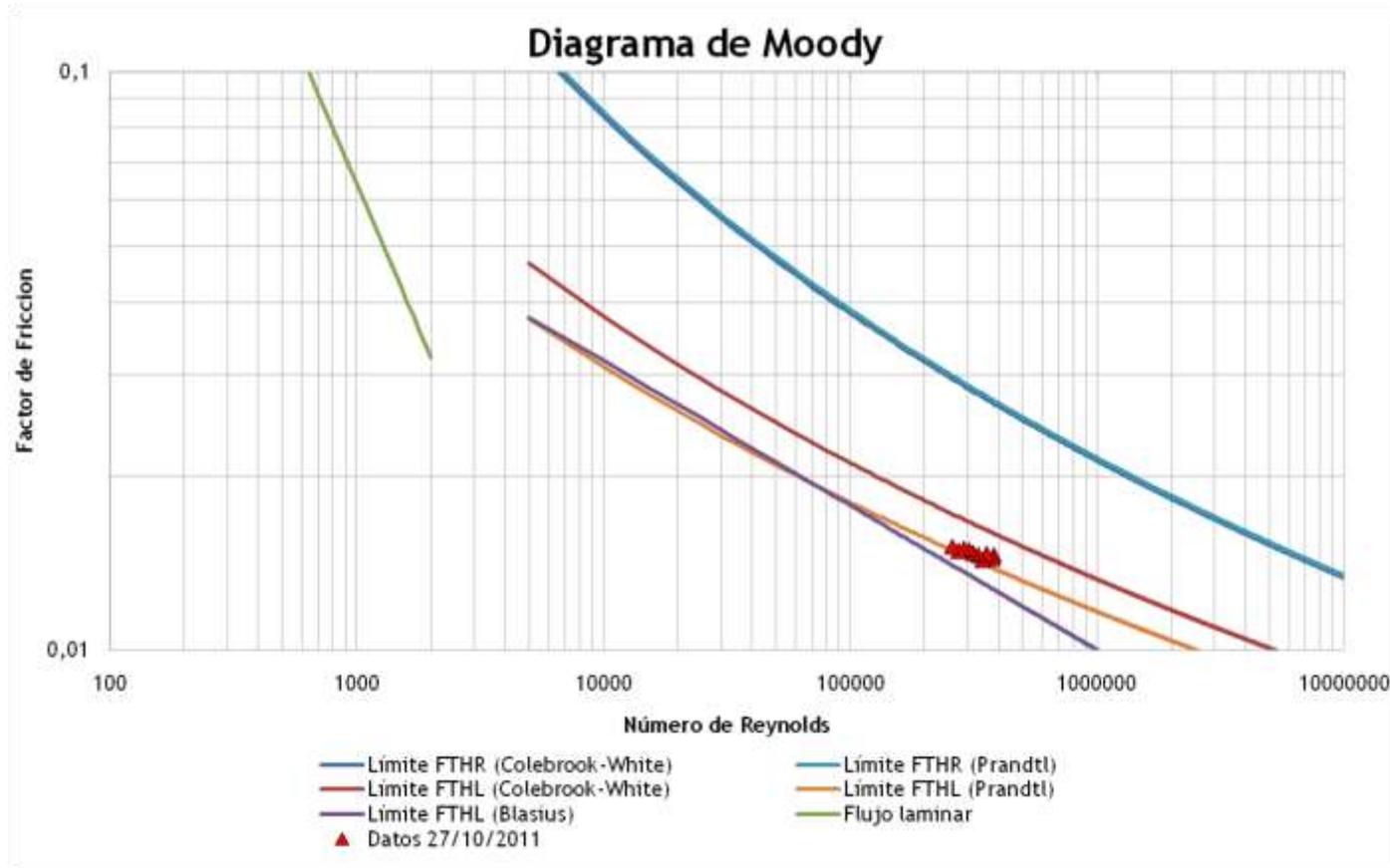
**Semana 6: Octubre 27 de 2011**

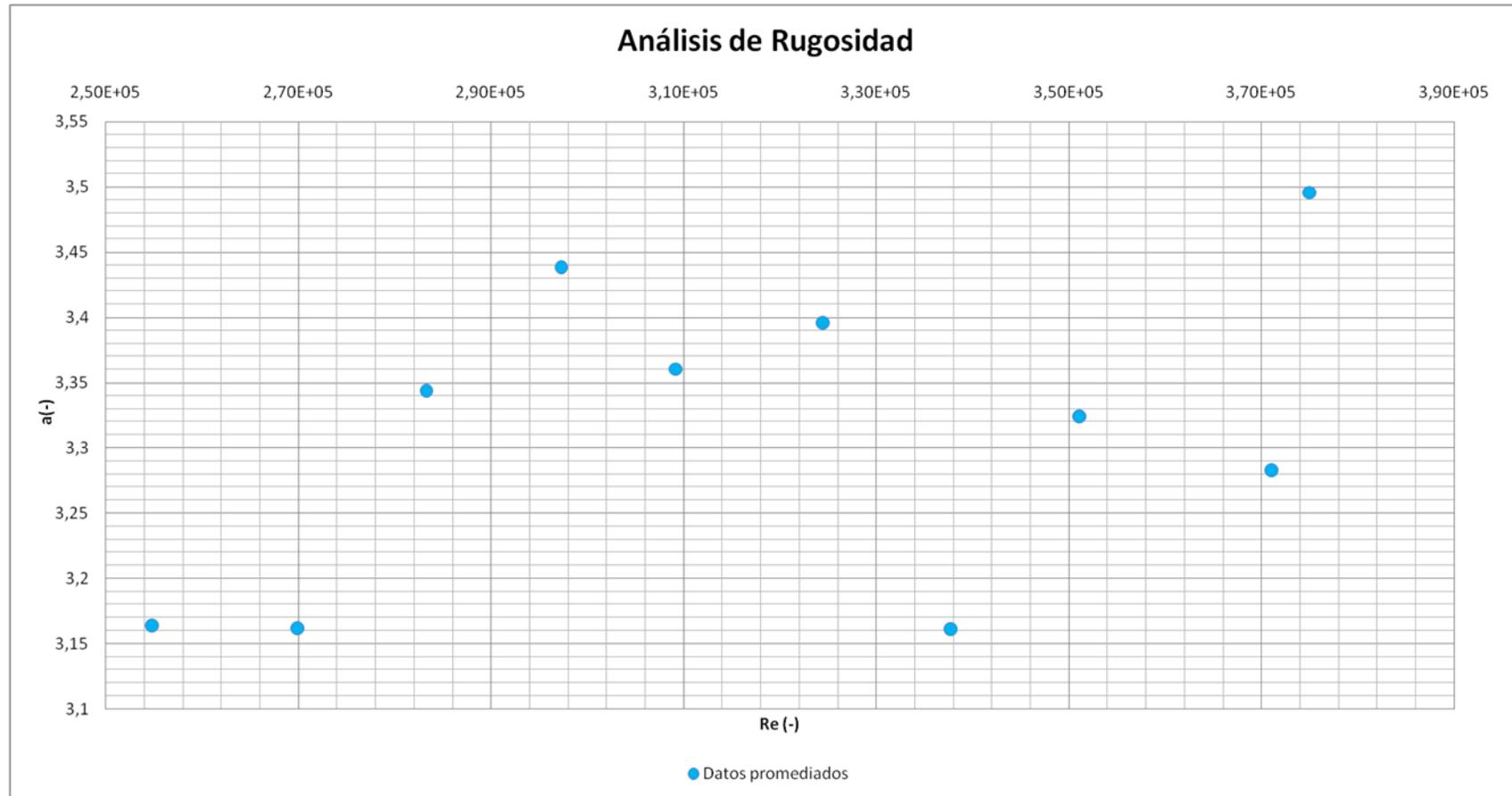
Octubre 27 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
52	0,0142	373867,03	0,0144	375491,52	0,0143	375054,84	0,0060	3,495968	0,00E+00
51	0,0141	371753,60	0,0143	371753,60	0,0142	371114,50	0,0036	3,282521	0,00E+00
49	0,0142	350986,90	0,0145	351379,02	0,0143	351161,68	0,0043	3,32384	0,00E+00
47	0,0142	337668,72	0,0144	338059,33	0,0143	337789,94	0,0025	3,160811	0,00E+00
45	0,0145	323837,87	0,0147	325181,21	0,0146	324528,94	0,0057	3,395641	0,00E+00
43	0,0145	308884,06	0,0149	310069,84	0,0147	309217,98	0,0055	3,360646	0,00E+00
41	0,0145	297130,61	0,0150	297454,08	0,0149	297277,64	0,0068	3,43821	0,00E+00
39	0,0148	282596,39	0,0151	283950,52	0,0150	283269,63	0,0057	3,34326	0,00E+00
37	0,0148	269689,91	0,0151	270260,22	0,0150	269939,24	0,0032	3,161274	0,00E+00
35	0,0150	254821,75	0,0152	255018,30	0,0151	254862,06	0,0035	3,163476	0,00E+00

Octubre 27 de 2011





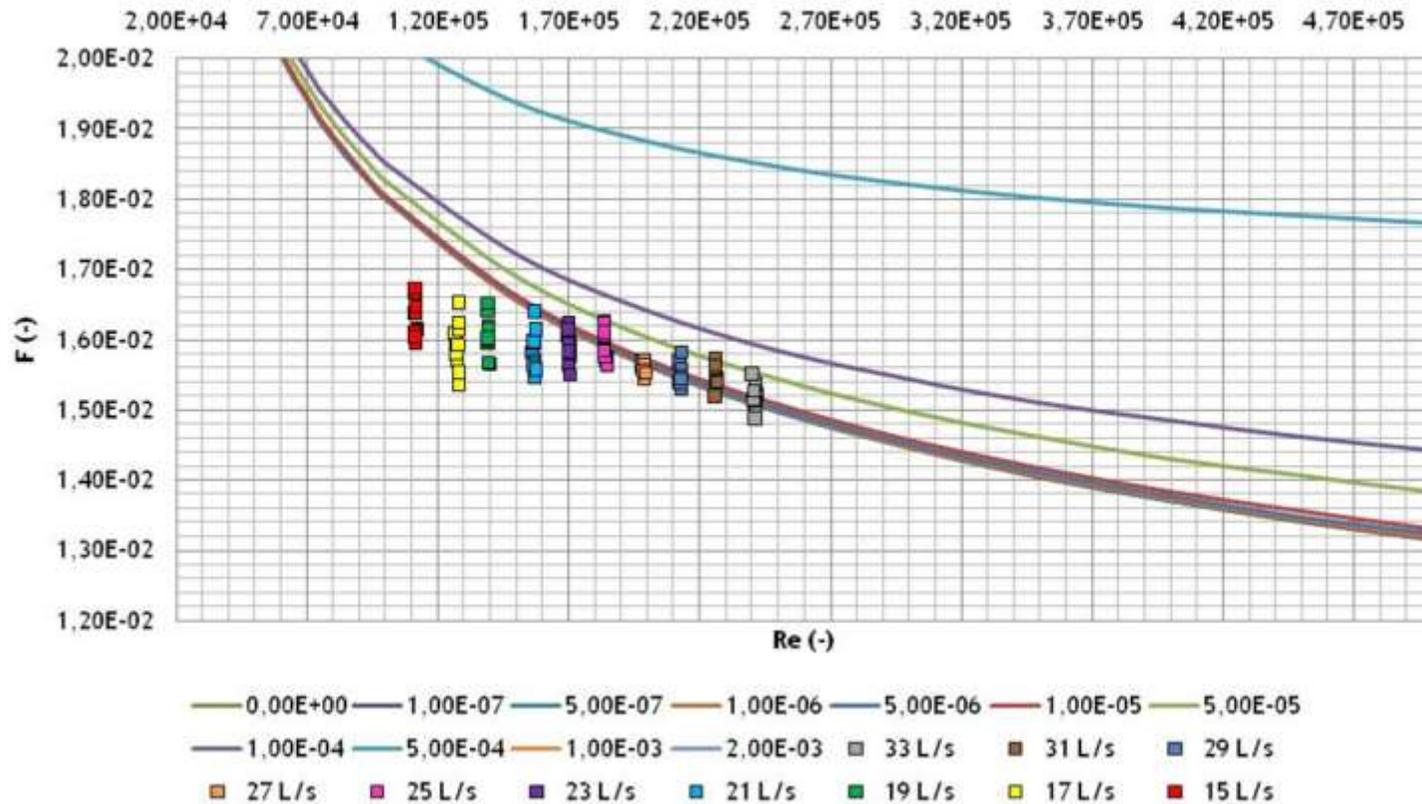


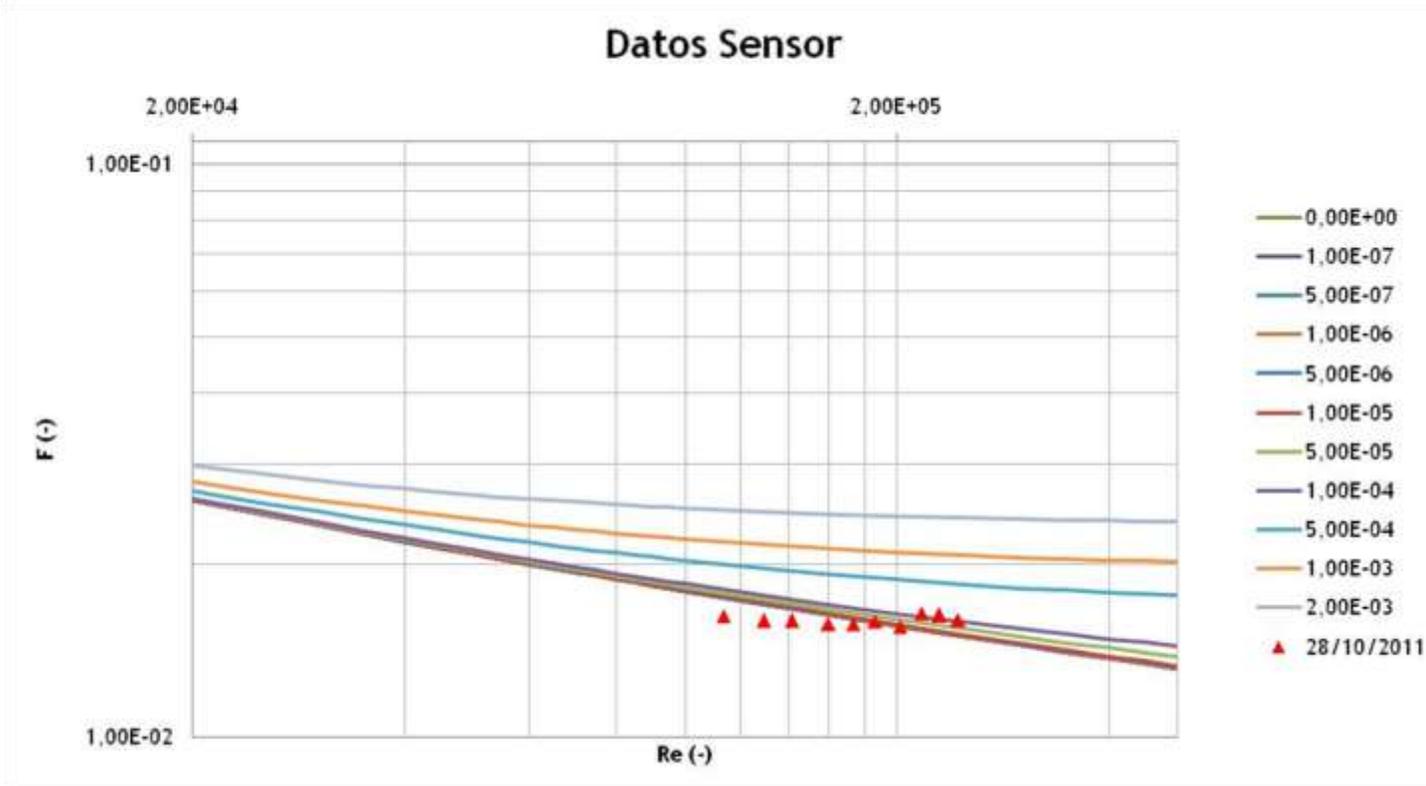


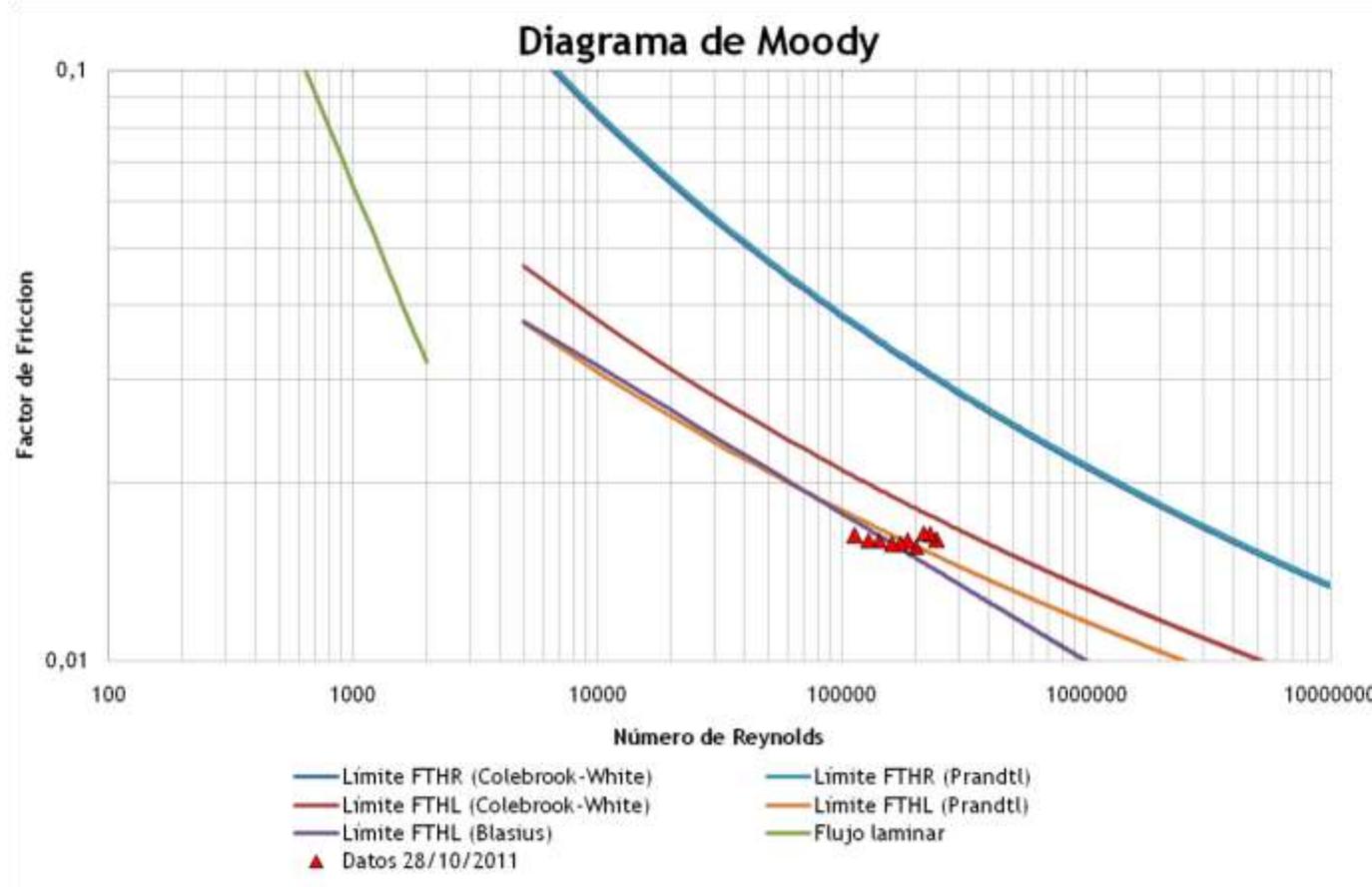
**Semana 6: Octubre 28 de 2011**

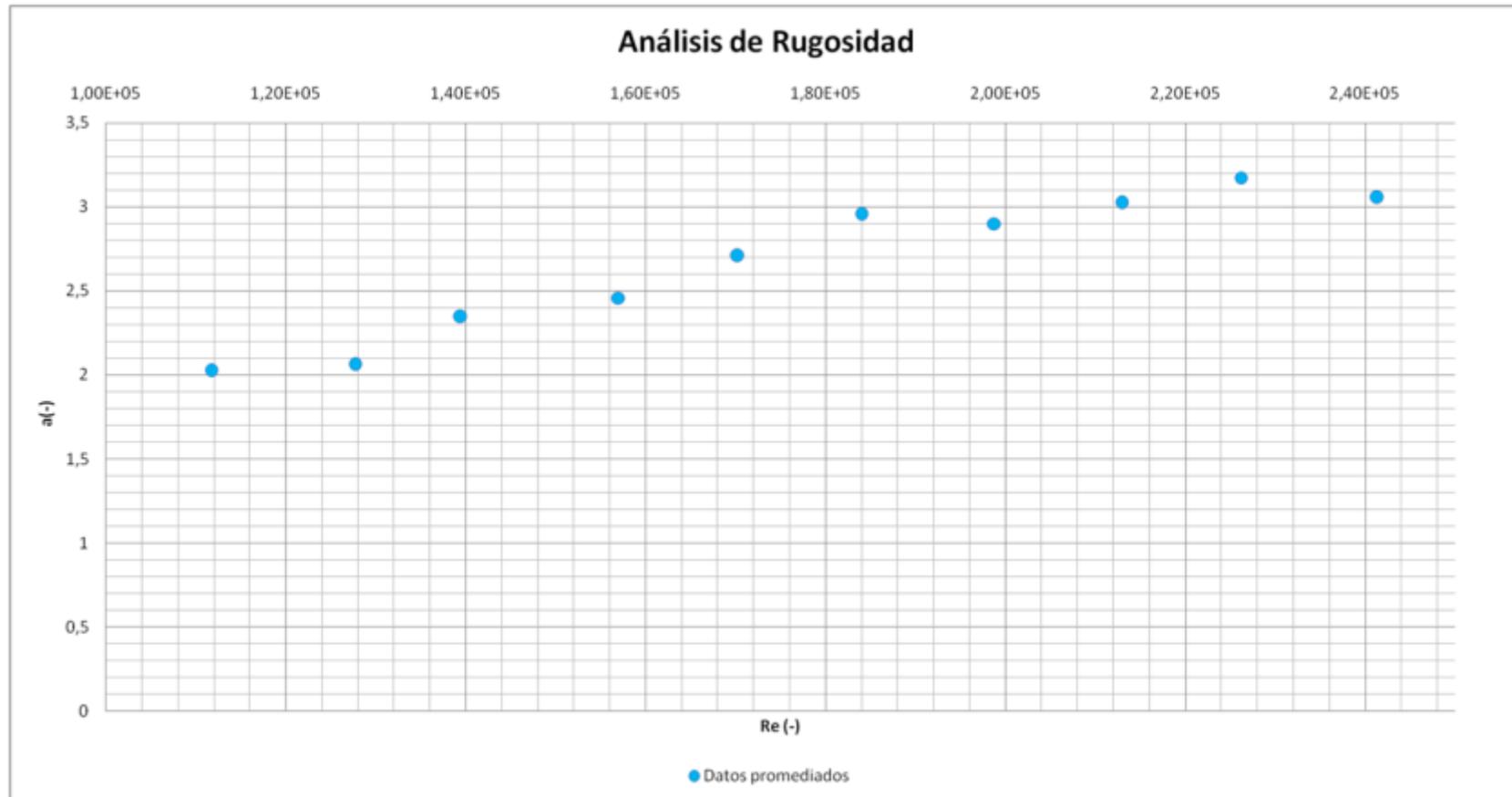
Octubre 28 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
33	0,0149	240493,13	0,0155	241991,43	0,0152	241341,20	0,0018	3,055743	-8,07E-19
31	0,0152	226676,35	0,0157	226676,35	0,0155	226196,42	0,0041	3,173451	-1,61E-18
29	0,0153	212619,74	0,0158	213347,11	0,0155	212950,85	0,0015	3,02337	0,00E+00
27	0,0154	198564,49	0,0157	199208,59	0,0156	198792,90	-0,0008	2,900873	
25	0,0156	183466,39	0,0162	184922,31	0,0159	184006,38	0,0004	2,955422	0,00E+00
23	0,0155	169964,36	0,0162	170463,16	0,0159	170206,88	-0,0054	2,709491	
21	0,0154	156616,44	0,0164	157333,51	0,0158	157010,19	-0,0124	2,45752	
19	0,0156	139087,14	0,0165	139681,60	0,0161	139429,86	-0,0170	2,34643	
17	0,0154	127103,42	0,0165	128144,81	0,0159	127732,24	-0,0277	2,061871	
15	0,0159	111431,99	0,0167	112048,38	0,0163	111744,91	-0,0325	2,02369	

### Octubre 28 de 2011





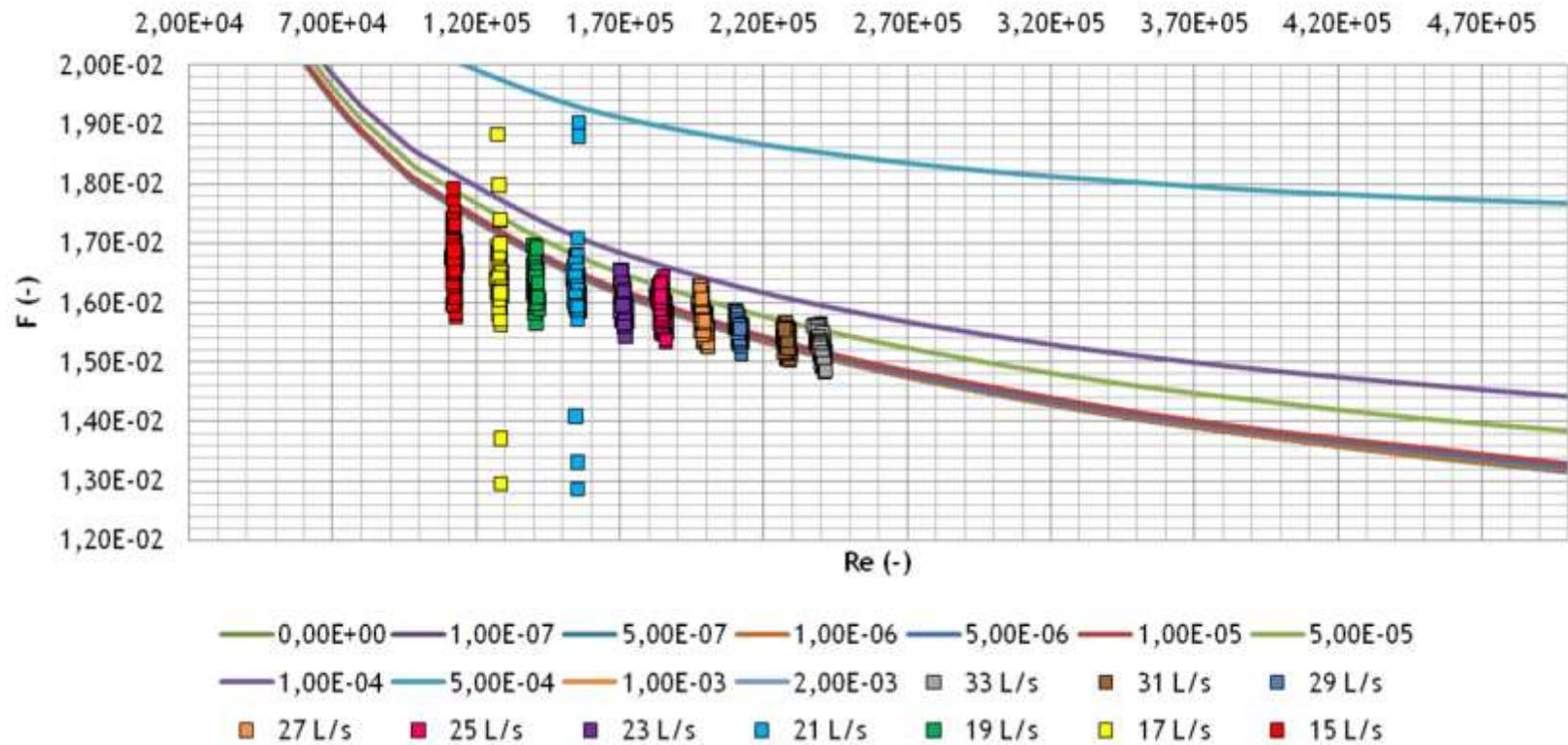


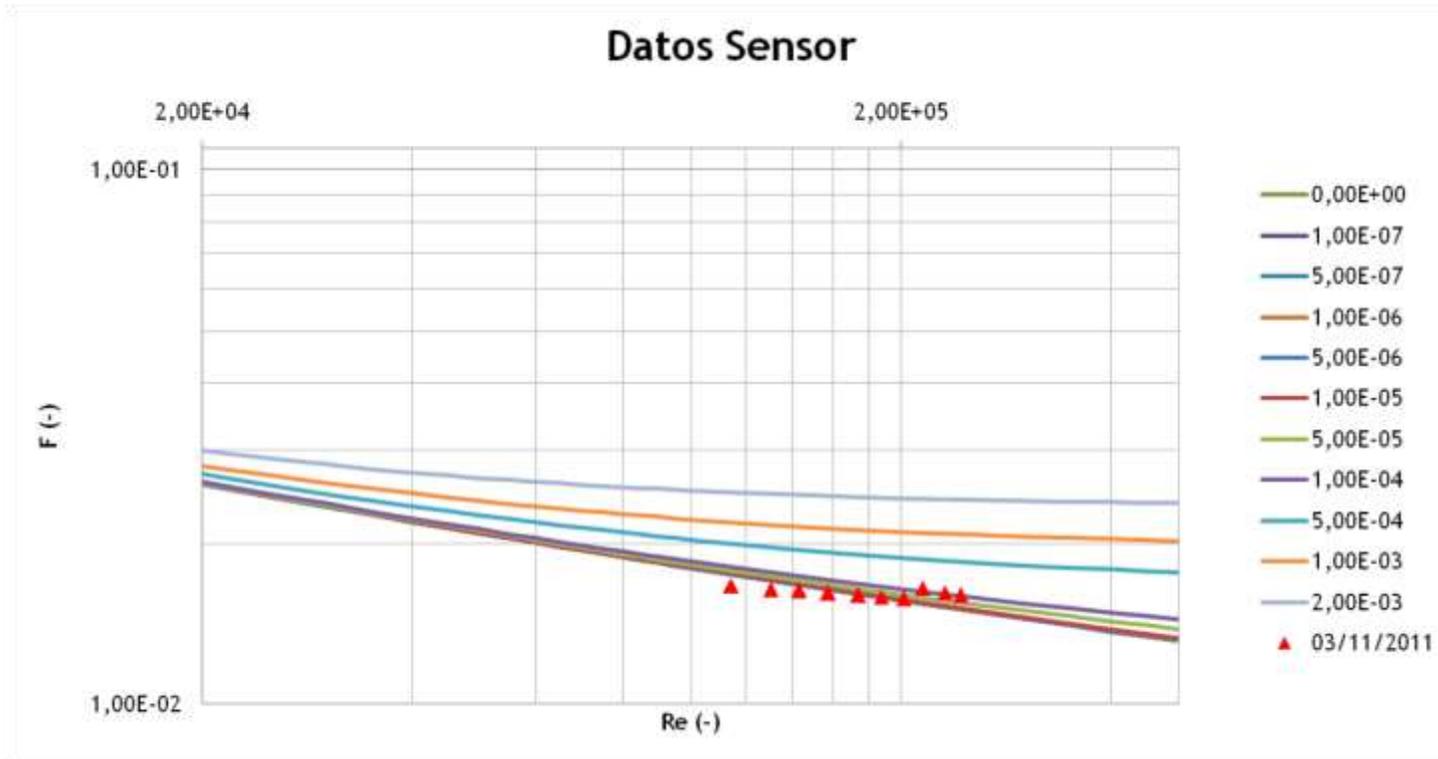


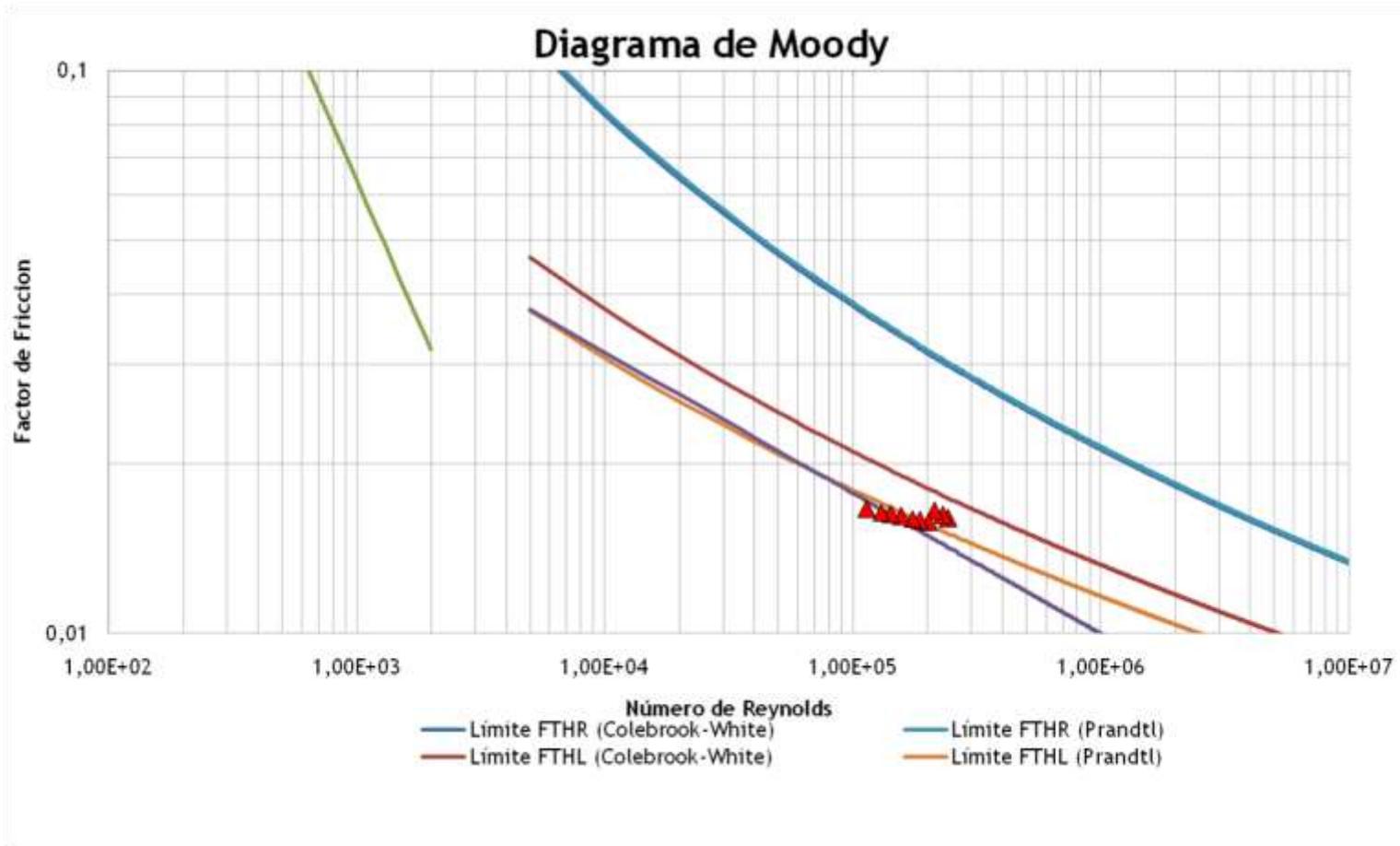
**Semana 7: Noviembre 3 de 2011**

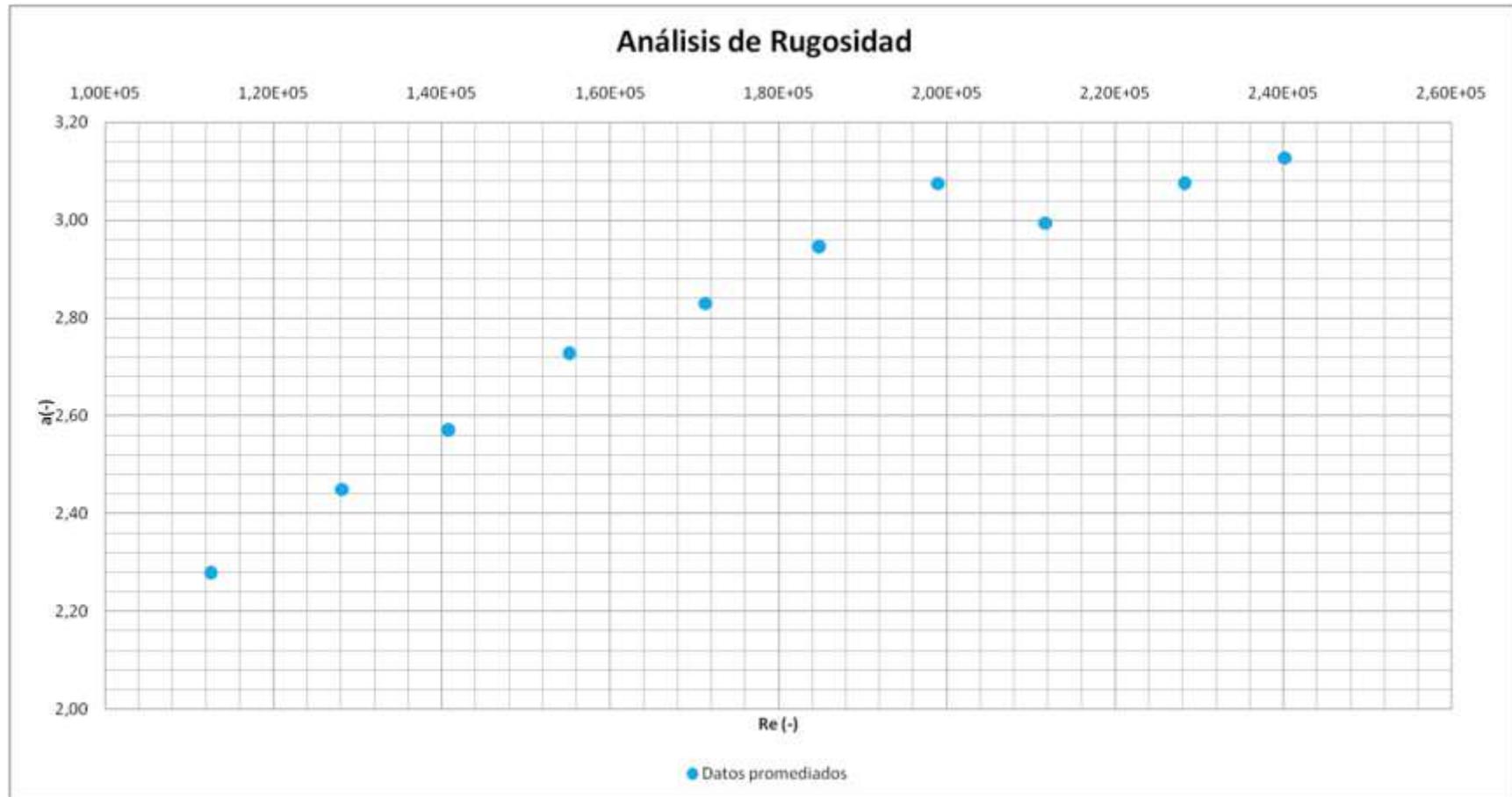
Noviembre 03 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
33	0,0148	237758,04	0,0156	241773,46	0,0153	240228,61	0,0031	3,12781	1,81E-35
31	0,0150	229420,29	0,0157	229420,29	0,0154	228223,06	0,0023	3,07426	1,42E-19
29	0,0151	210440,53	0,0159	212859,24	0,0155	211760,32	0,0010	2,99458	-4,74E-20
27	0,0152	197497,77	0,0163	200589,48	0,0158	198988,67	0,0028	3,07565	-1,90E-19
25	0,0153	183106,25	0,0164	186410,05	0,0159	184833,36	0,0002	2,94481	-4,74E-20
23	0,0154	170253,56	0,0166	172808,55	0,0160	171330,85	-0,0025	2,83039	
21	0,0129	153902,50	0,0190	156135,02	0,0162	155077,42	-0,0055	2,72616	
19	0,0156	139980,54	0,0169	141965,57	0,0163	140812,04	-0,0103	2,56976	
17	0,0105	127303,04	0,0209	129089,95	0,0164	128137,28	-0,0153	2,44994	
15	0,0157	111861,96	0,0179	113353,39	0,0167	112518,45	-0,0229	2,27796	

## Noviembre 3 de 2011





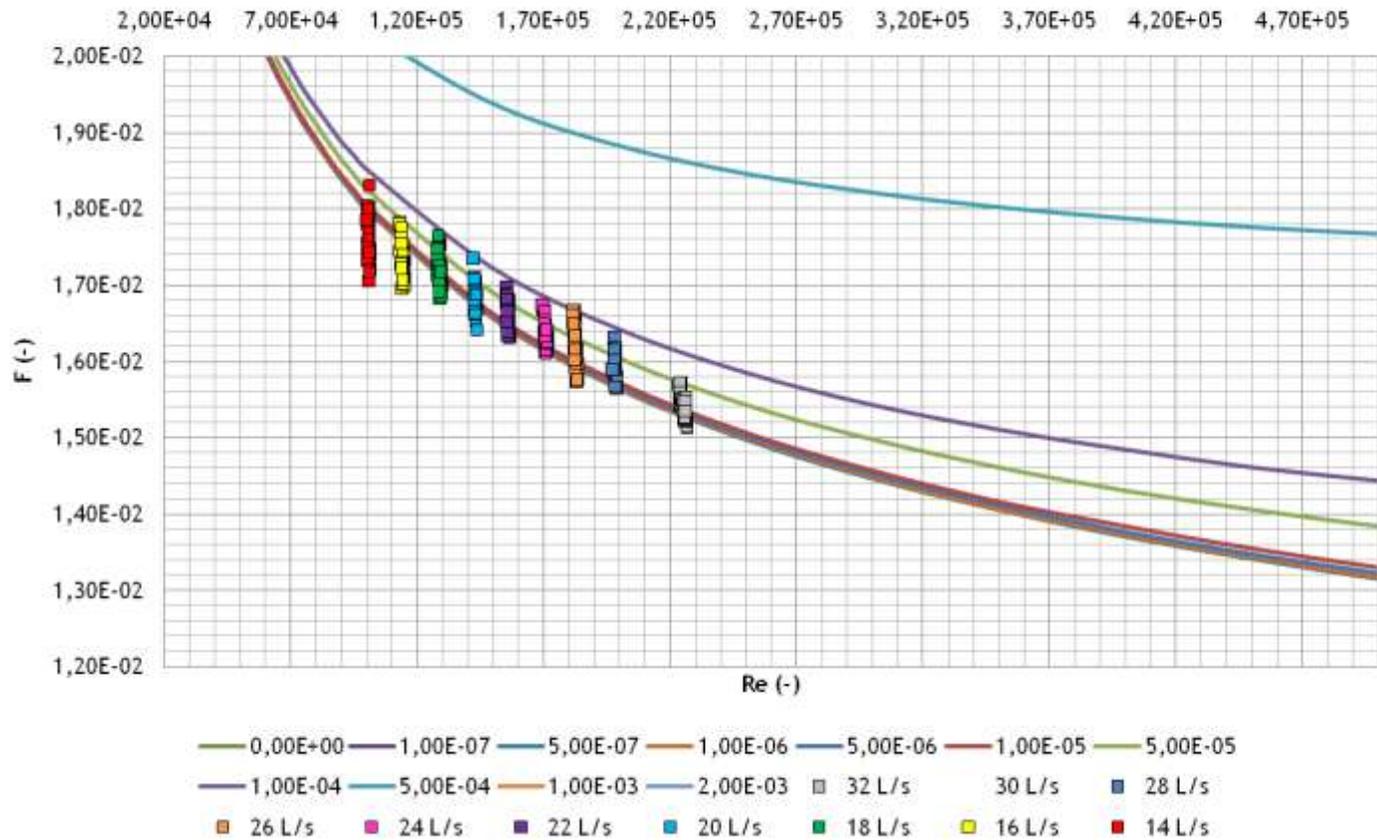


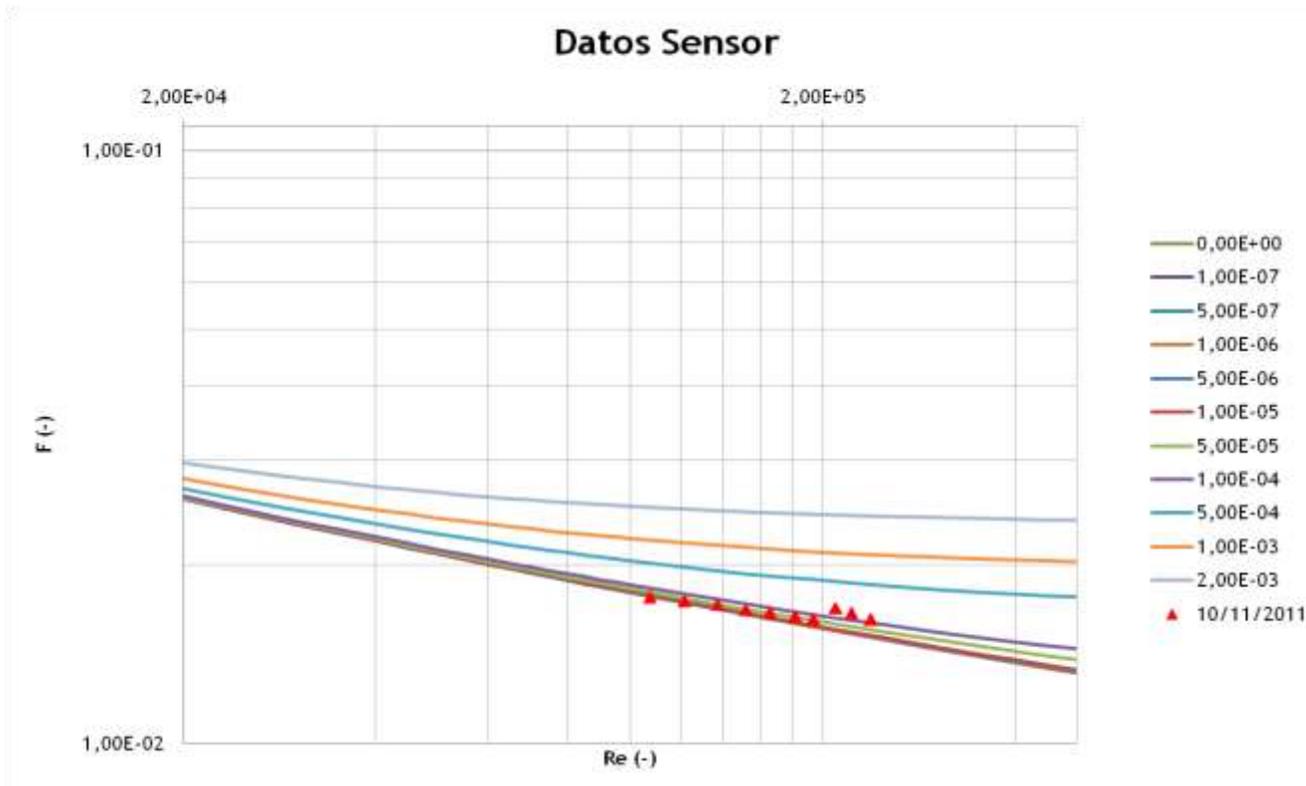


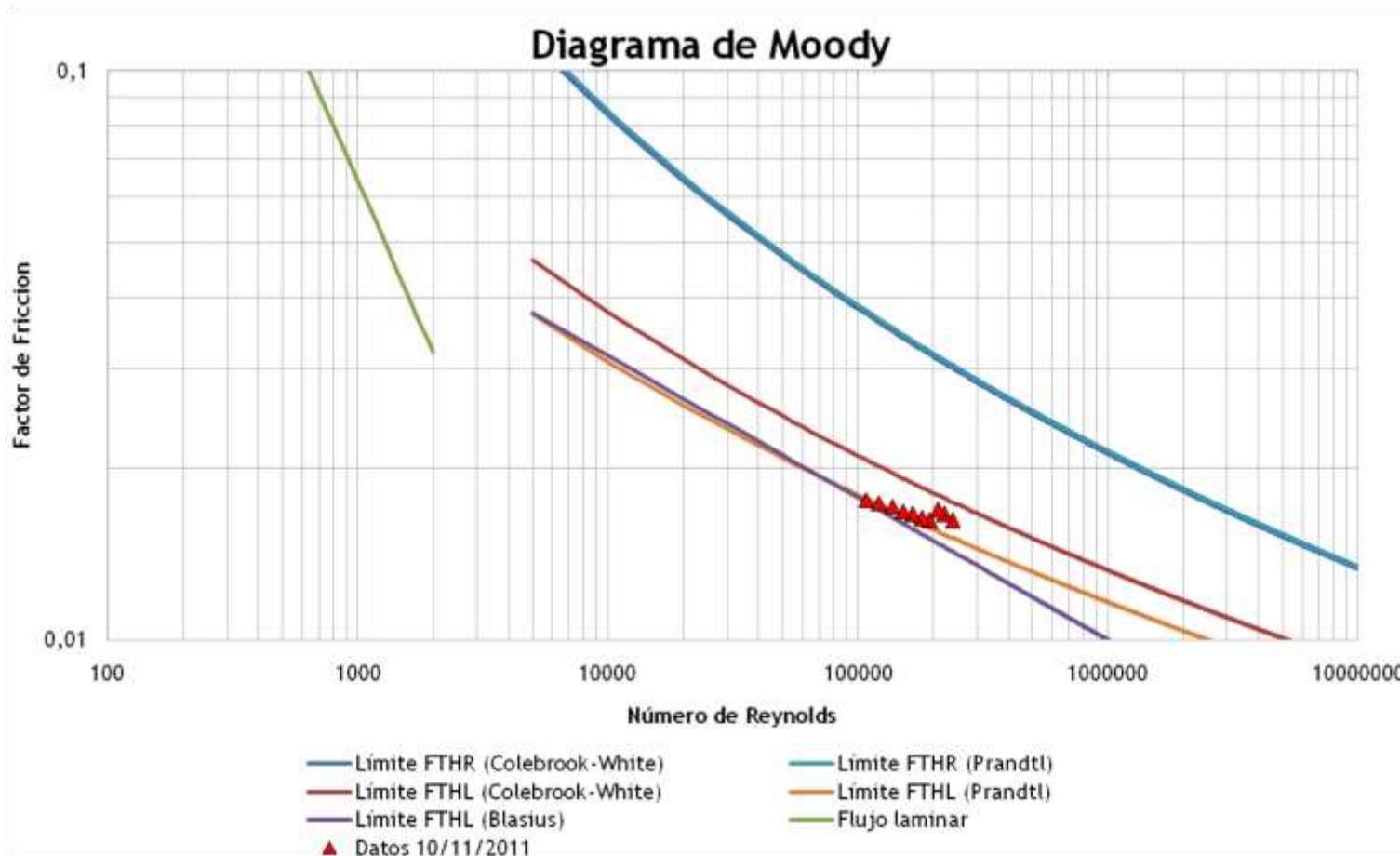
**Semana 8: Noviembre 10 de 2011**

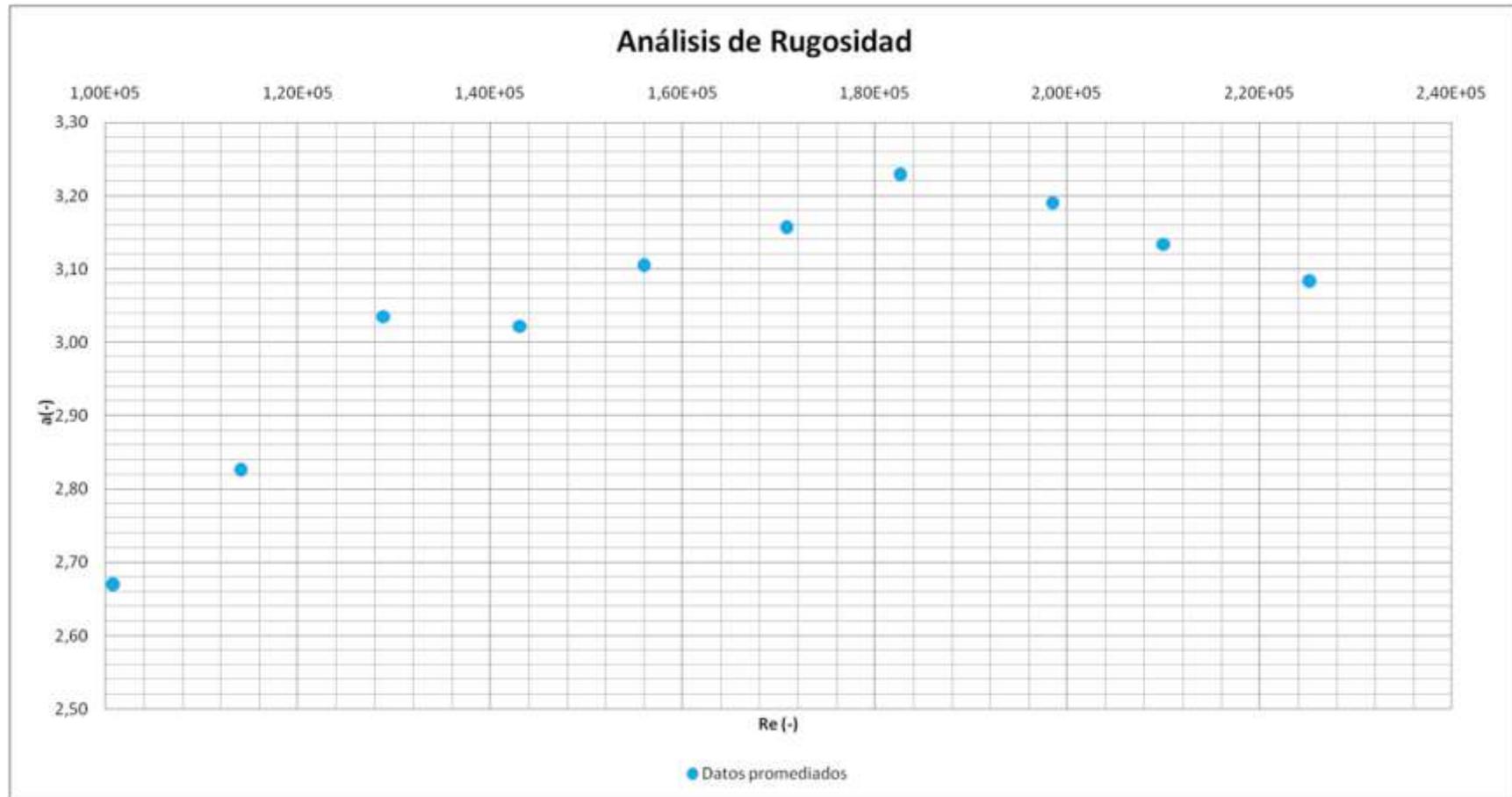
Noviembre 10 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
32	0,0151	223772,22	0,0157	226644,54	0,0154	225239,29	0,0025	3,08276	-3,23E-19
30	0,0154	211353,86	0,0160	211353,86	0,0157	210040,92	0,0029	3,13393	-1,61E-19
28	0,0156	197328,32	0,0163	199105,07	0,0159	198460,89	0,0052	3,19059	1,61E-19
26	0,0157	181883,30	0,0167	183700,74	0,0162	182615,59	0,0065	3,22877	-1,61E-19
24	0,0161	169782,97	0,0167	171758,97	0,0164	170811,46	0,0044	3,15632	0,00E+00
22	0,0163	155337,91	0,0170	156718,22	0,0166	155998,88	0,0045	3,10460	0,00E+00
20	0,0164	142473,26	0,0173	143531,44	0,0168	143125,80	0,0023	3,02222	0,00E+00
18	0,0168	128240,66	0,0177	129946,64	0,0172	128959,44	0,0035	3,03540	0,00E+00
16	0,0169	113320,45	0,0178	115147,17	0,0174	114055,42	-0,0031	2,82594	
14	0,0171	100183,13	0,0183	101535,64	0,0176	100857,61	-0,0094	2,66961	

### Noviembre 10 de 2011





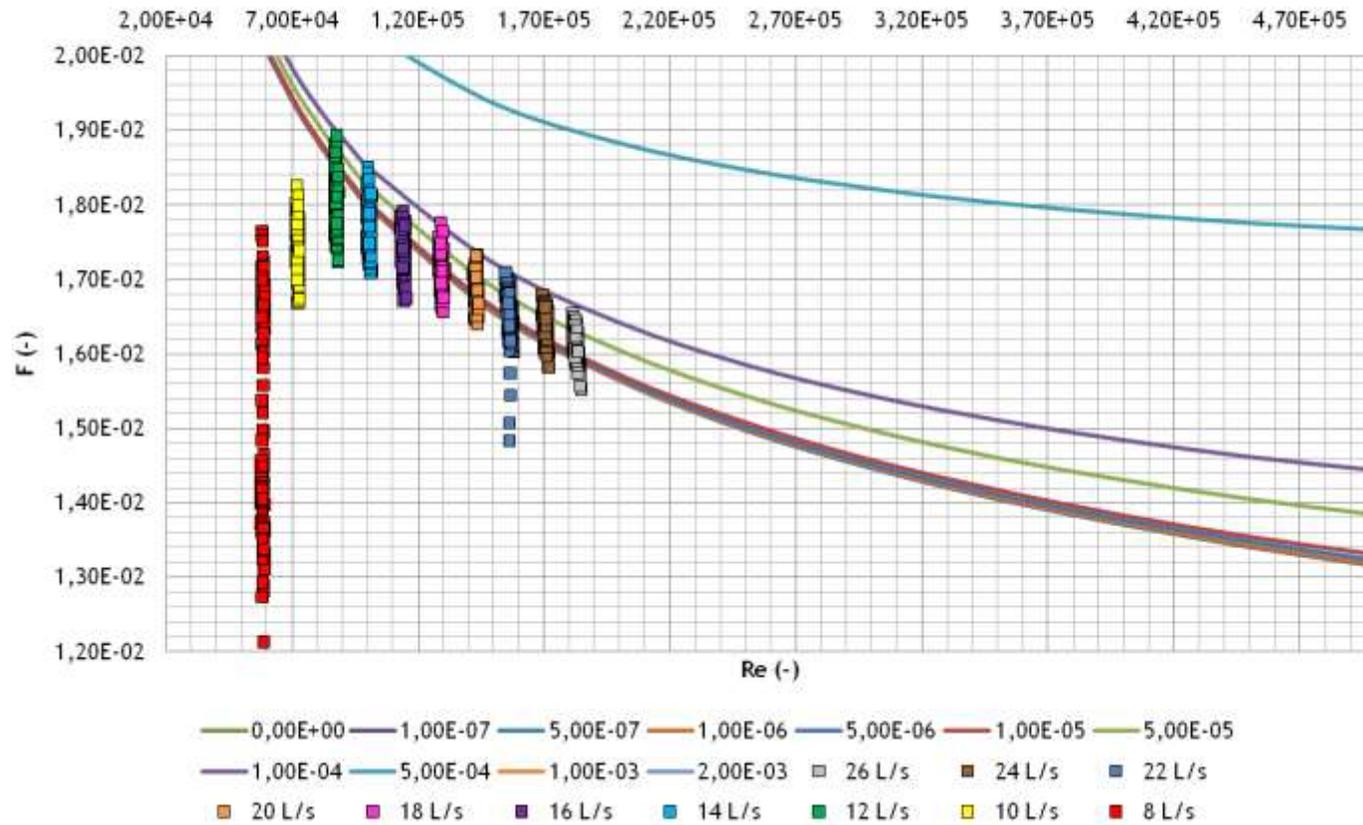


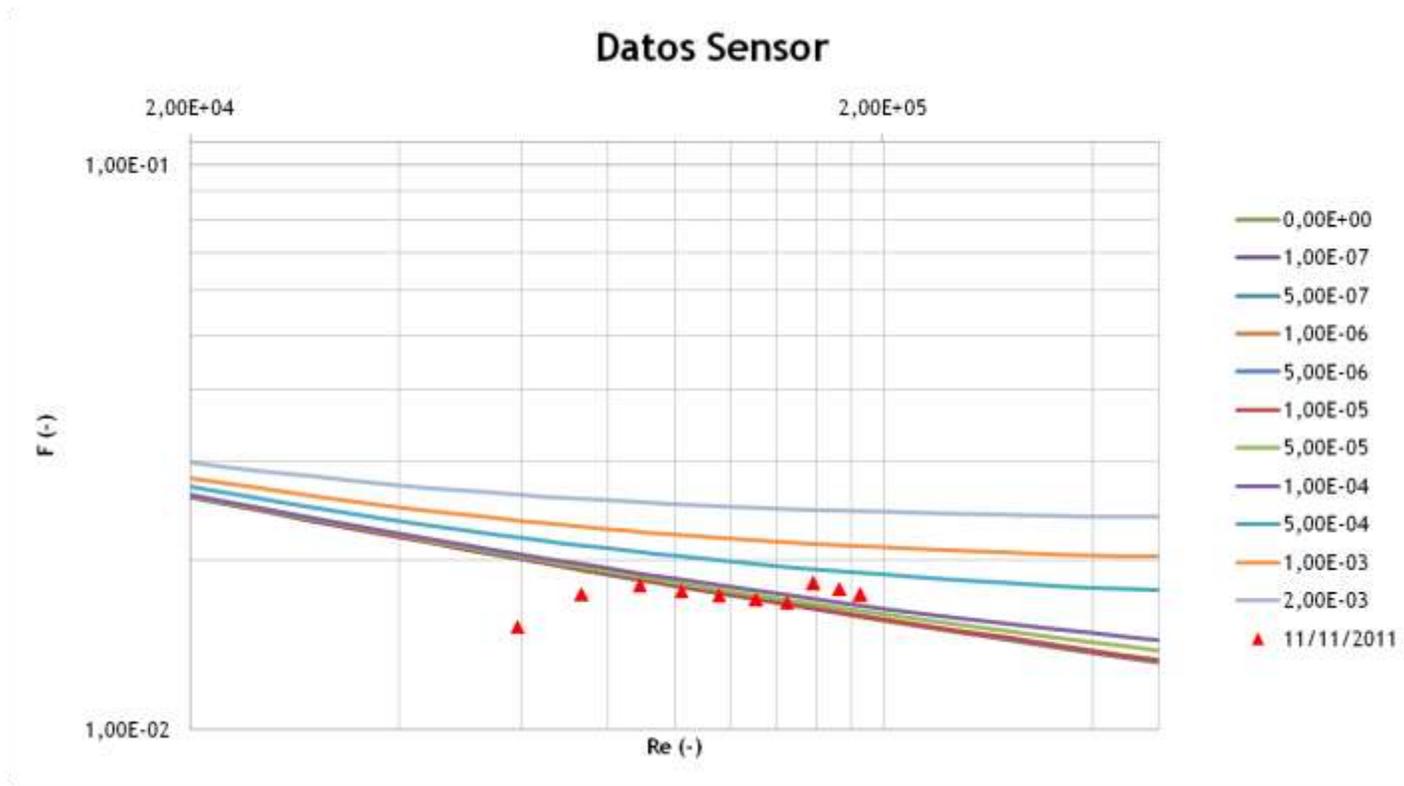


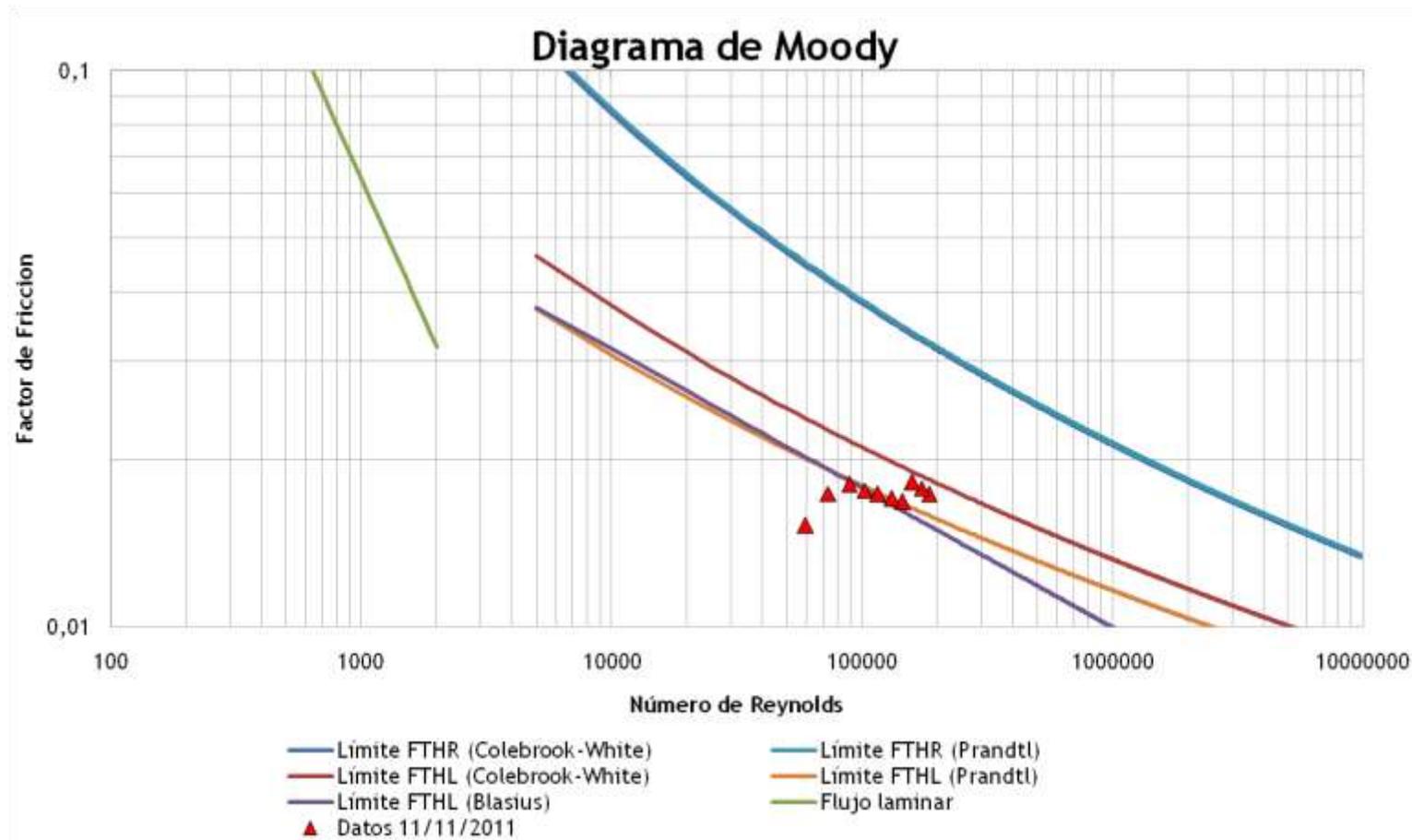
**Semana 8: Noviembre 11 de 2011**

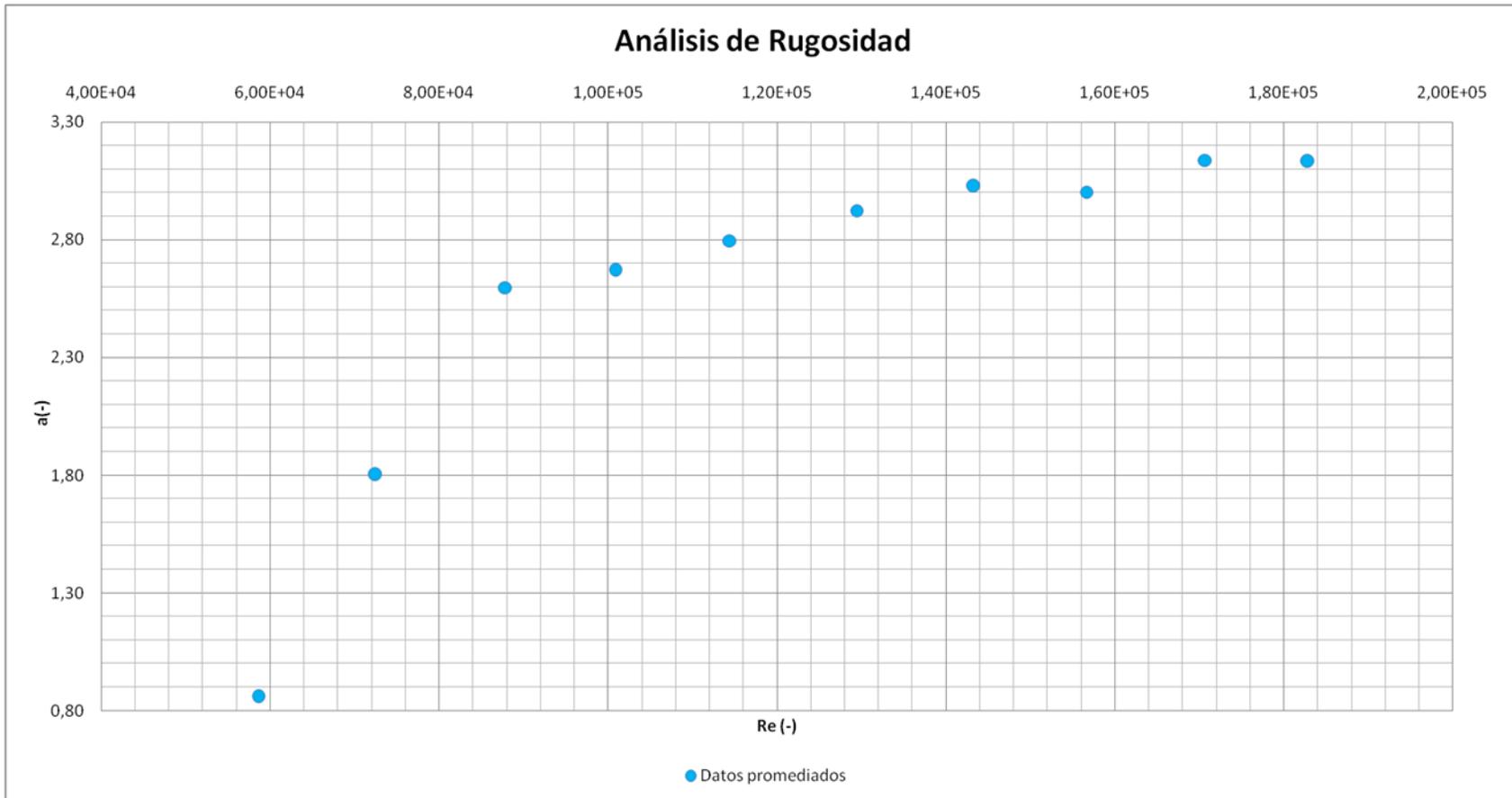
Noviembre 11 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
26	0,0155	181551,71	0,0165	184687,35	0,0161	182807,76	0,0044	3,13339	-4,74E-20
24	0,0158	172209,07	0,0168	172209,07	0,0164	170697,30	0,0048	3,13823	0,00E+00
22	0,0148	154893,36	0,0171	158191,23	0,0165	156627,74	0,0019	3,00307	0,00E+00
20	0,0164	142412,72	0,0173	144100,28	0,0168	143290,25	0,0028	3,02708	0,00E+00
18	0,0166	128471,40	0,0177	130837,65	0,0171	129397,89	0,0001	2,92406	0,00E+00
16	0,0167	113406,60	0,0179	115264,06	0,0173	114375,05	-0,0042	2,79604	
14	0,0171	99862,87	0,0185	101783,65	0,0176	100862,41	-0,0094	2,66998	
12	0,0172	87268,43	0,0189	88585,77	0,0180	87800,45	-0,0137	2,59670	
10	0,0167	71924,12	0,0182	73049,41	0,0174	72463,68	-0,0598	1,80274	
8	0,0121	57703,79	0,0176	59362,44	0,0154	58571,76	-0,1474	0,86063	

### Noviembre 11 de 2011





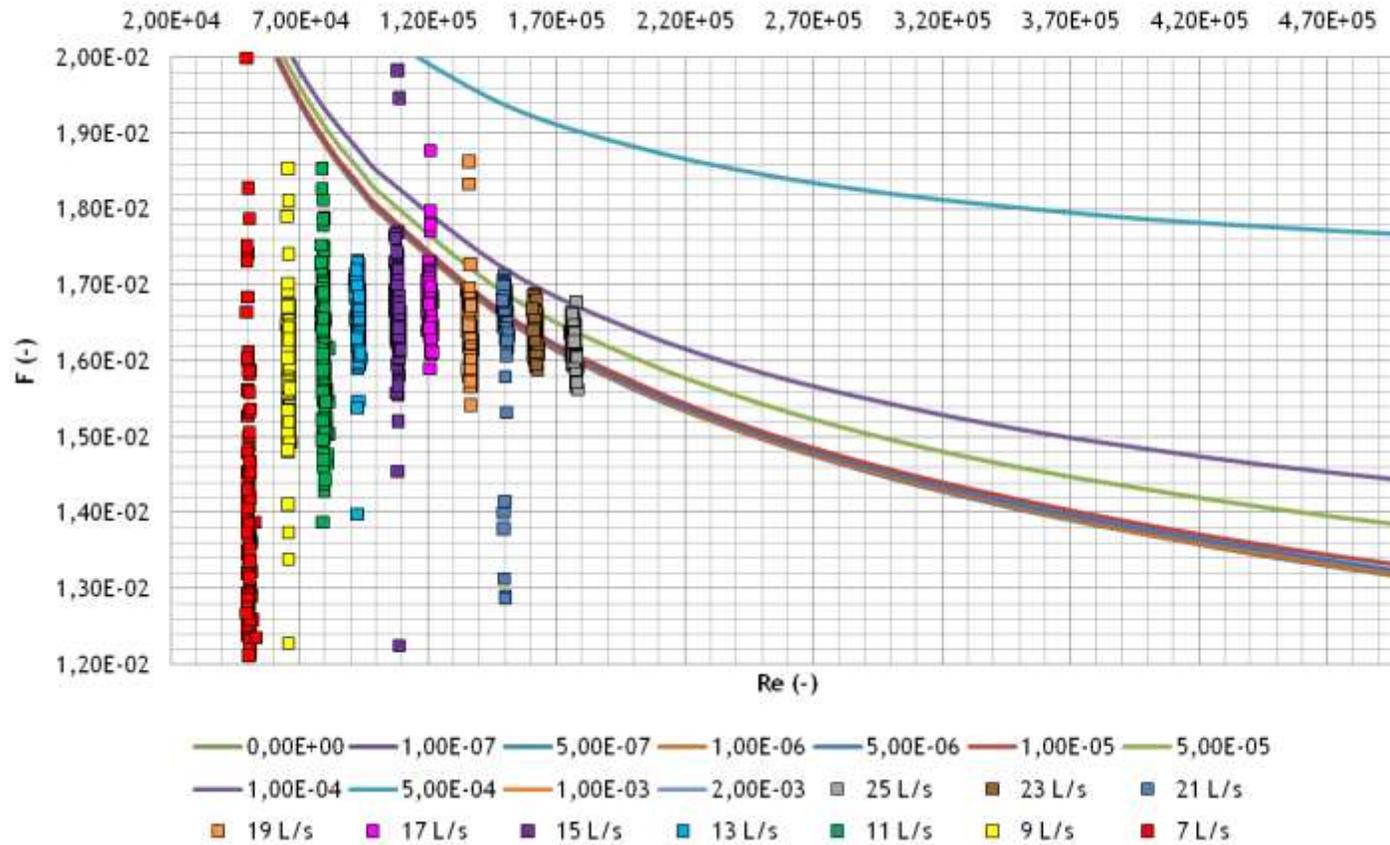


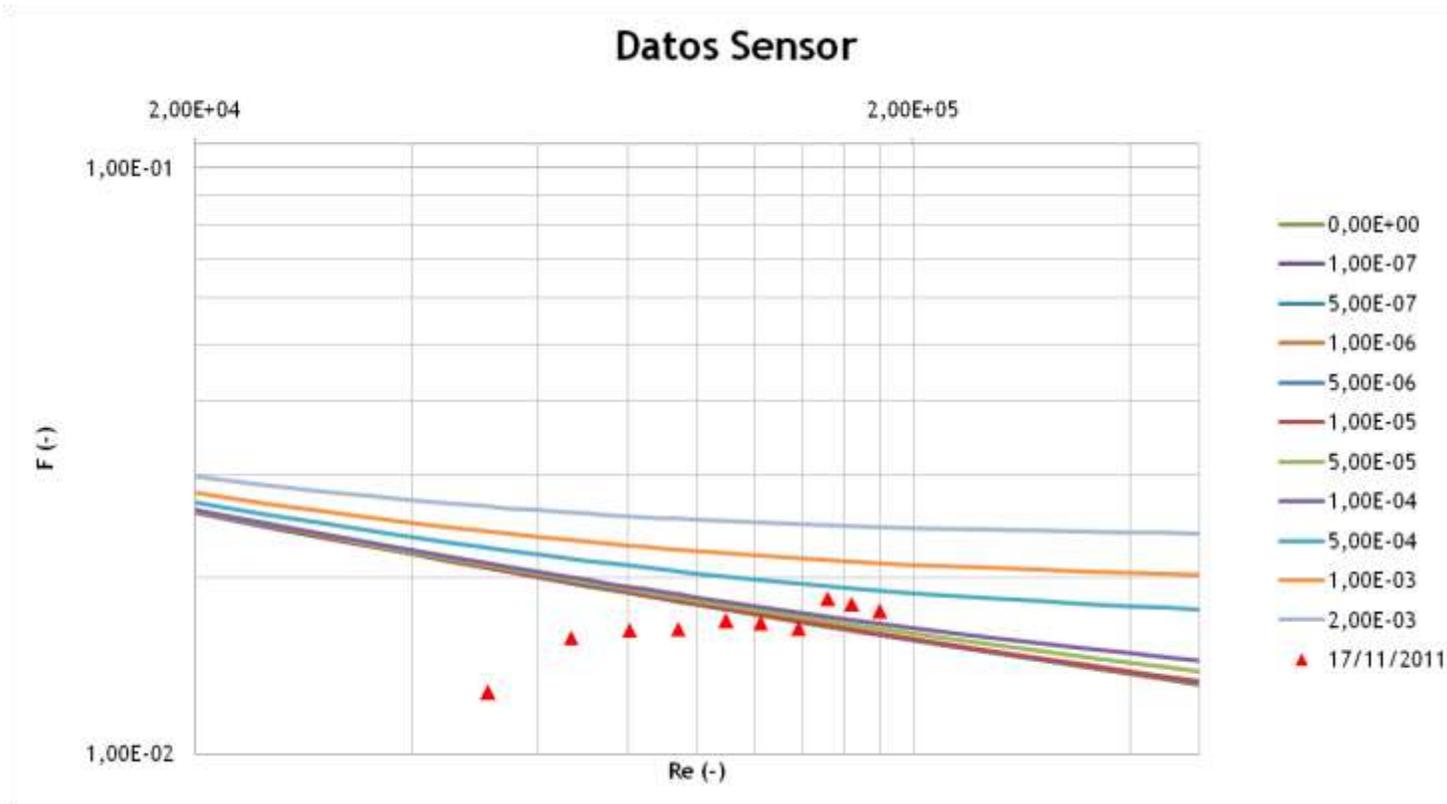


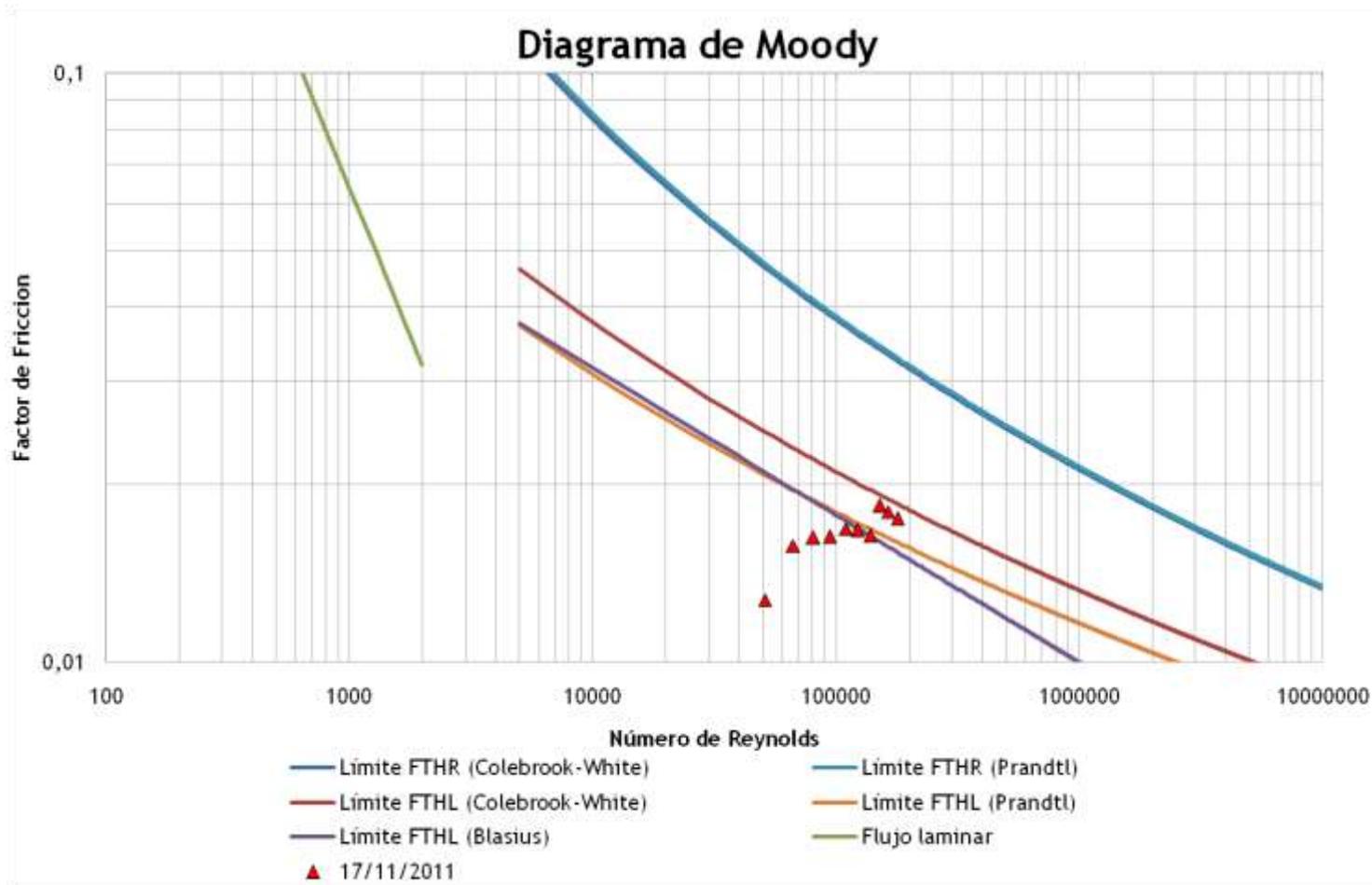
**Semana 9: Noviembre 17 de 2011**

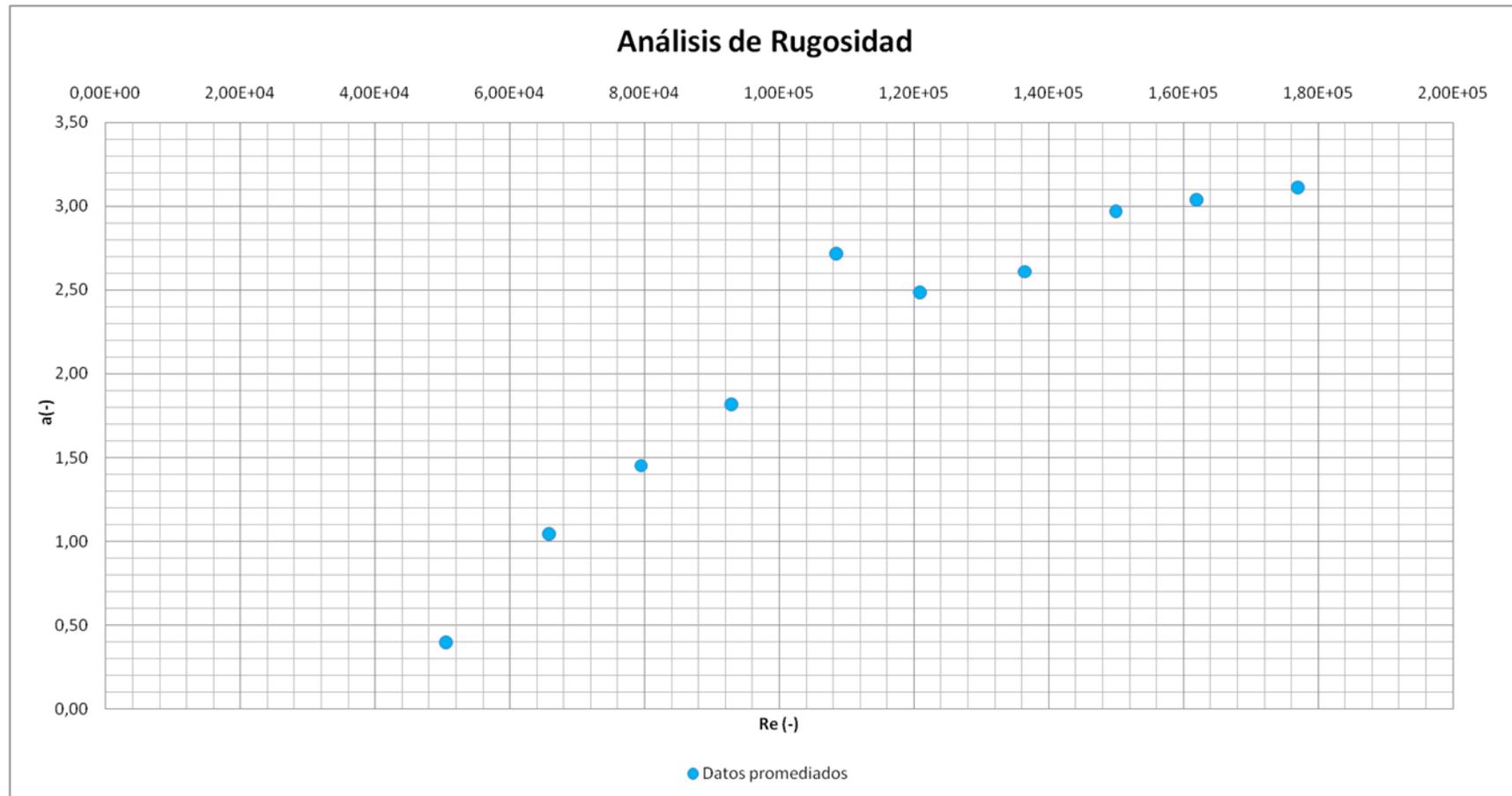
Noviembre 17 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
25	0,0156	175474,25	0,0168	178197,81	0,0162	177059,69	0,0040	3,11179	4,74E-20
23	0,0159	162893,77	0,0169	162893,77	0,0164	161964,50	0,0026	3,03576	0,00E+00
21	0,0120	149298,75	0,0171	151275,08	0,0166	150030,57	0,0008	2,96834	0,00E+00
19	0,0091	135456,10	0,0217	137419,24	0,0164	136459,48	-0,0099	2,60939	
17	0,0159	120055,27	0,0188	121983,46	0,0167	120902,67	-0,0144	2,48610	
15	0,0122	107411,31	0,0340	109415,82	0,0169	108448,77	-0,0128	2,71633	
13	0,0027	91799,26	0,0173	93778,92	0,0163	92882,55	-0,0500	1,81820	
11	0,0139	78522,98	0,0185	81620,91	0,0163	79490,95	-0,0747	1,45359	
9	0,0096	65303,29	0,0185	66466,92	0,0158	65858,98	-0,1172	1,04404	
7	0,0058	49367,19	0,0250	53721,88	0,0127	50486,75	-0,2348	0,39810	

### Noviembre 17 de 2011





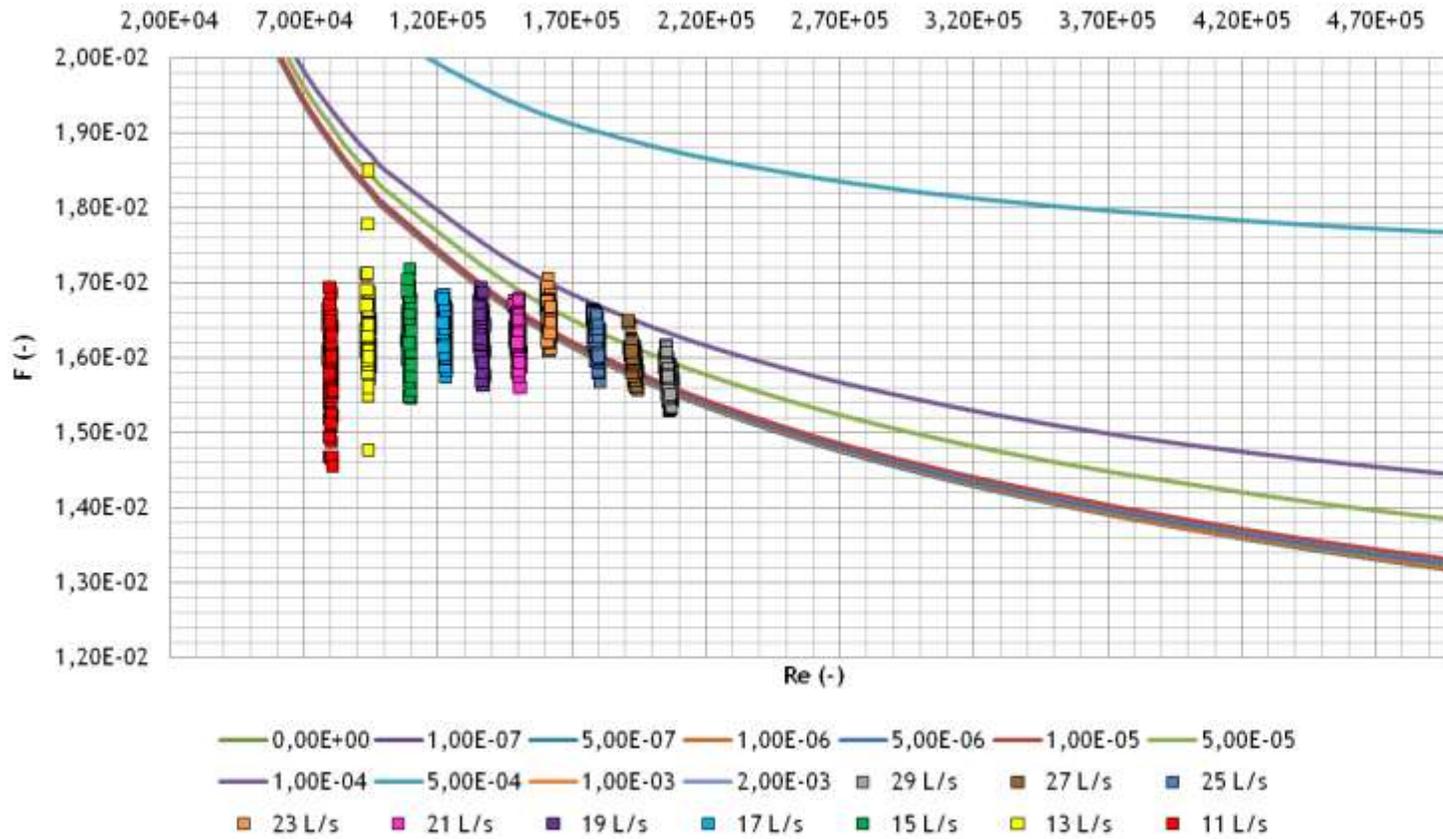


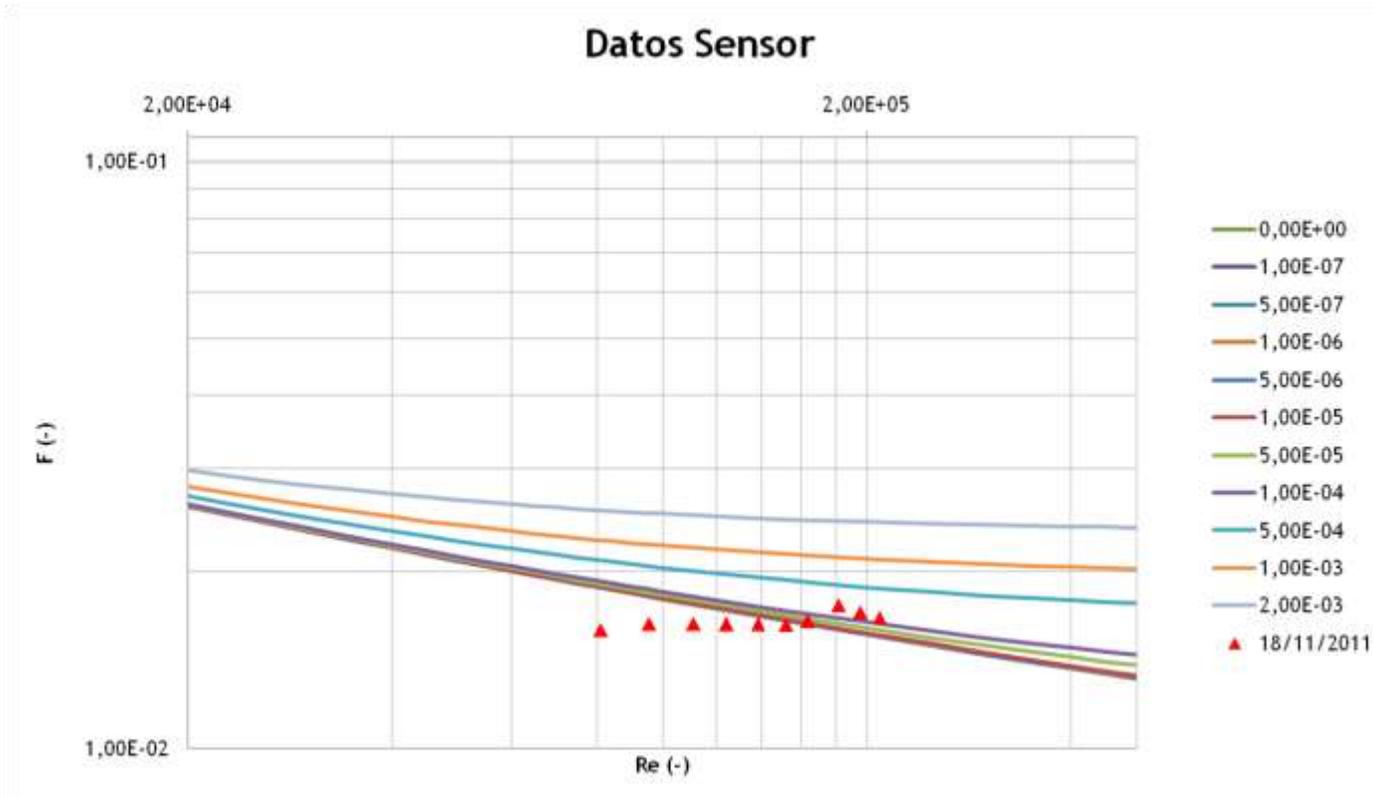


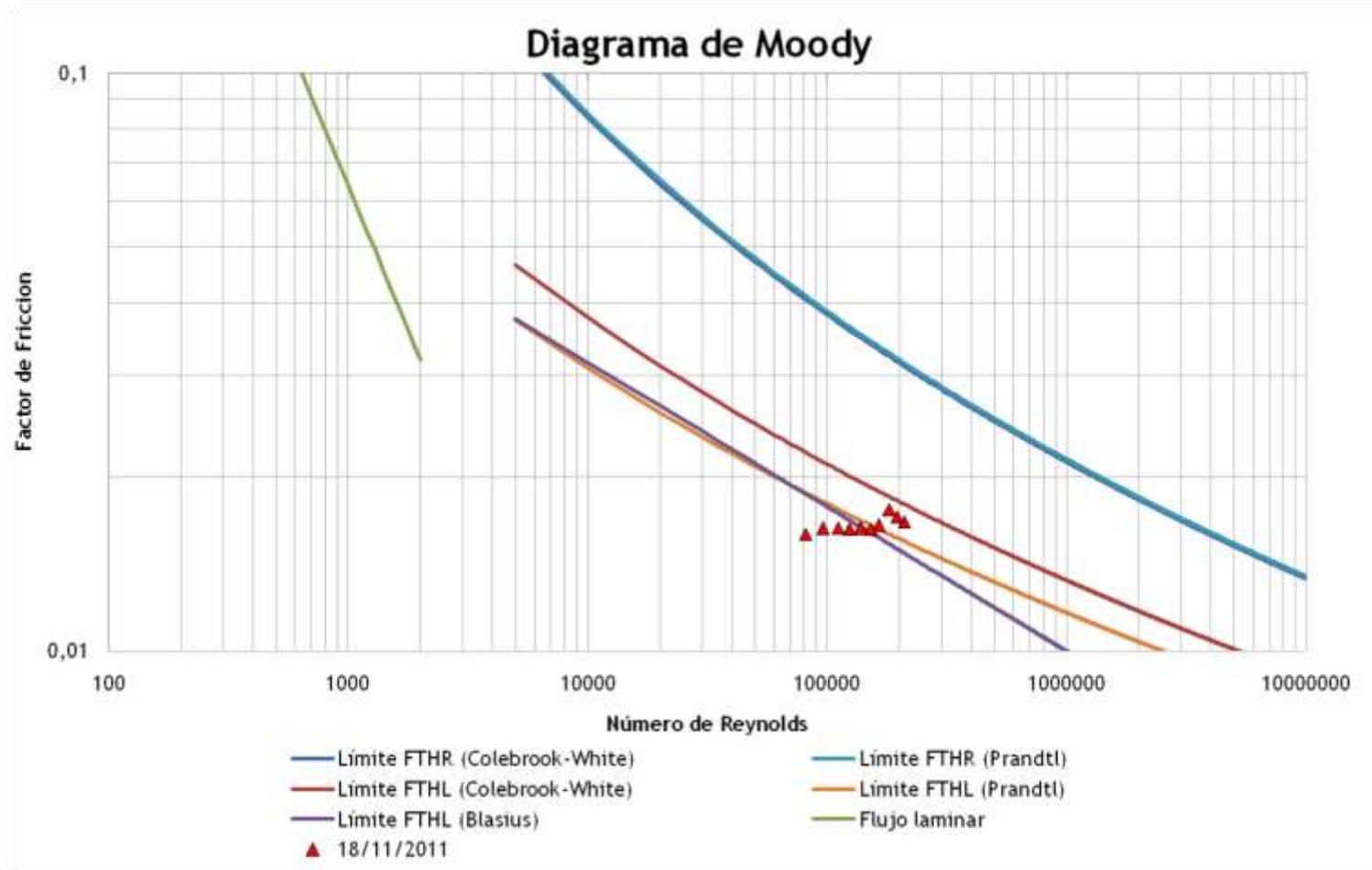
**Semana 9: Noviembre 18 de 2011**

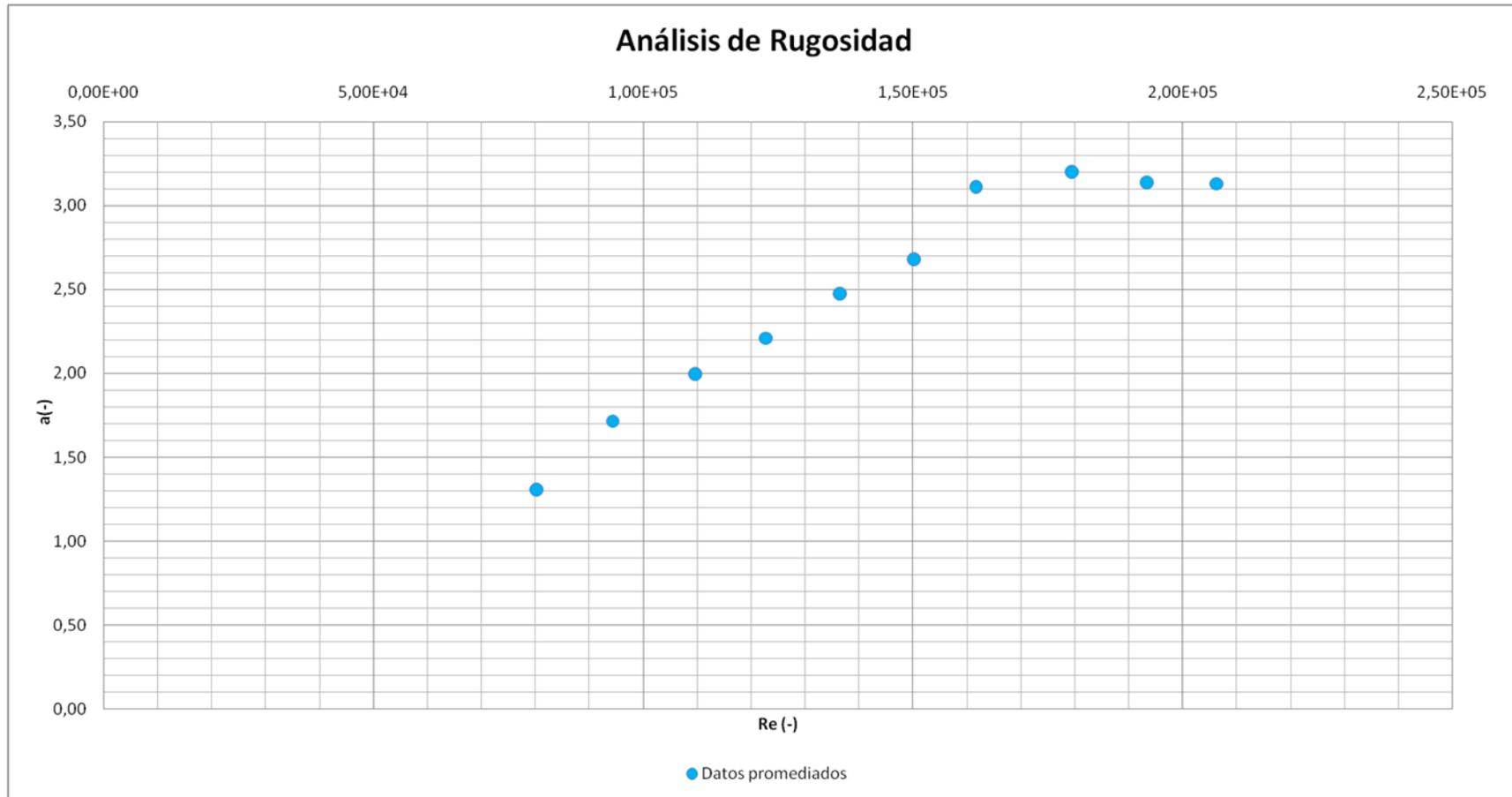
Noviembre 18 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
29	0,0153	204864,00	0,0162	207956,52	0,0157	206168,82	0,0037	3,12976	-3,32E-19
27	0,0156	194514,06	0,0165	194514,06	0,0159	193206,40	0,0042	3,13686	1,42E-19
25	0,0157	177743,74	0,0166	180645,88	0,0163	179337,48	0,0060	3,20104	0,00E+00
23	0,0161	160641,37	0,0170	162459,50	0,0165	161643,69	0,0044	3,10916	0,00E+00
21	0,0156	148690,61	0,0168	151270,97	0,0163	150065,17	-0,0068	2,67885	
19	0,0156	135600,03	0,0169	137454,33	0,0163	136413,85	-0,0134	2,47541	
17	0,0157	121656,47	0,0168	123505,60	0,0163	122688,67	-0,0235	2,21061	
15	0,0155	108909,43	0,0172	110104,05	0,0163	109573,42	-0,0341	1,99548	
13	0,0148	93602,63	0,0185	94973,58	0,0163	94298,51	-0,0515	1,71557	
11	0,0145	79368,22	0,0169	80832,17	0,0159	80136,50	-0,0820	1,30784	

### Noviembre 18 de 2011



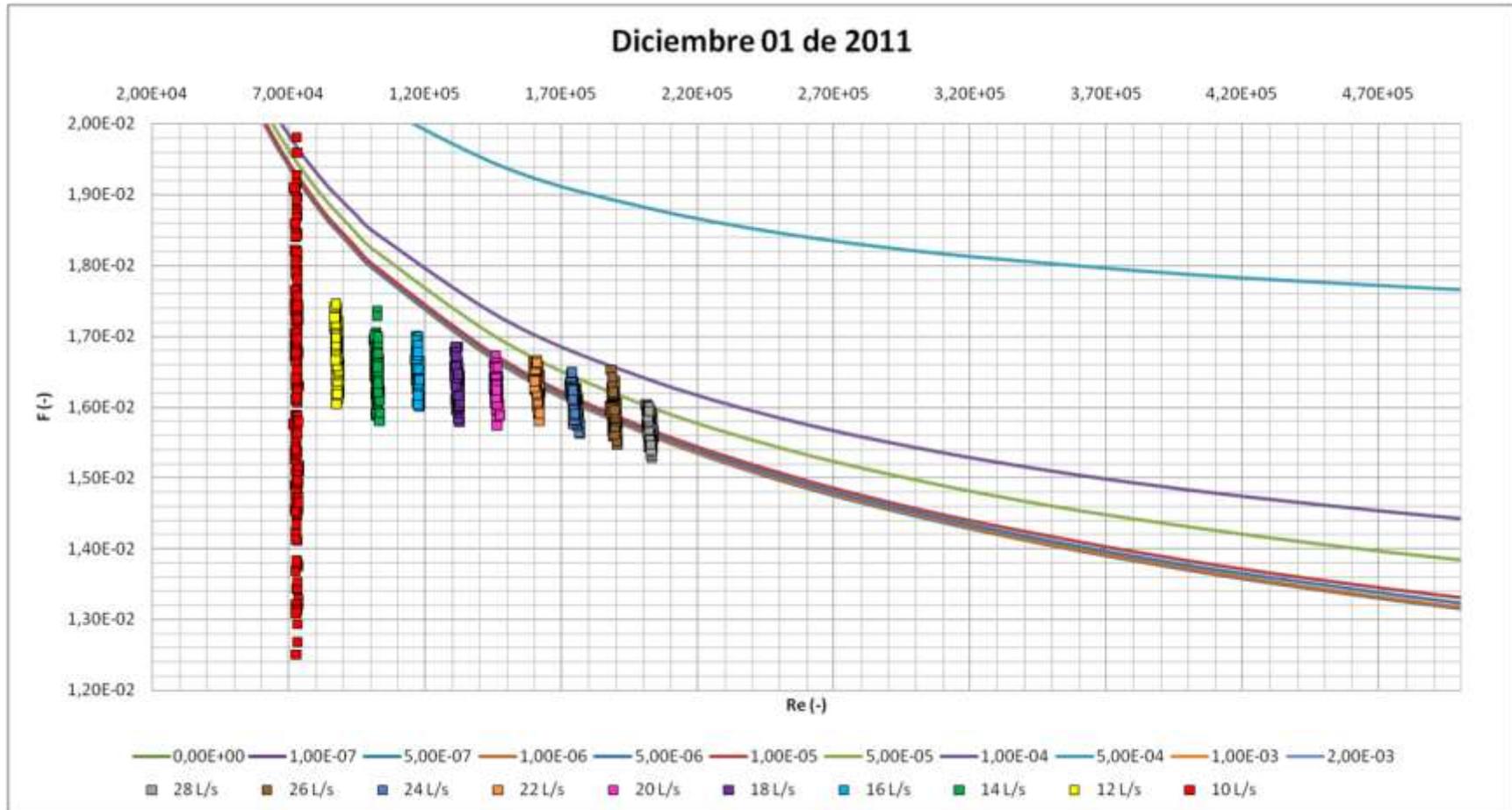


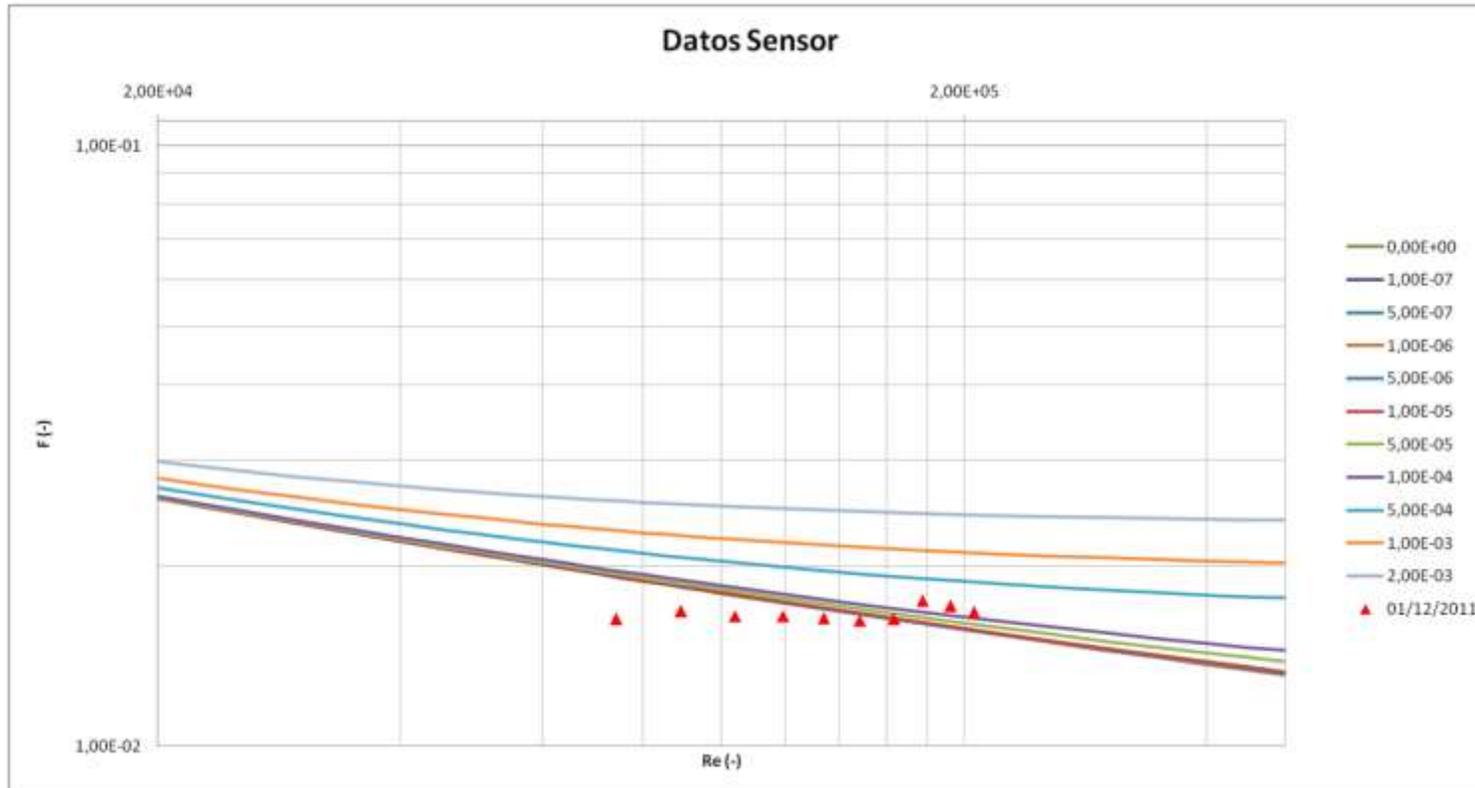


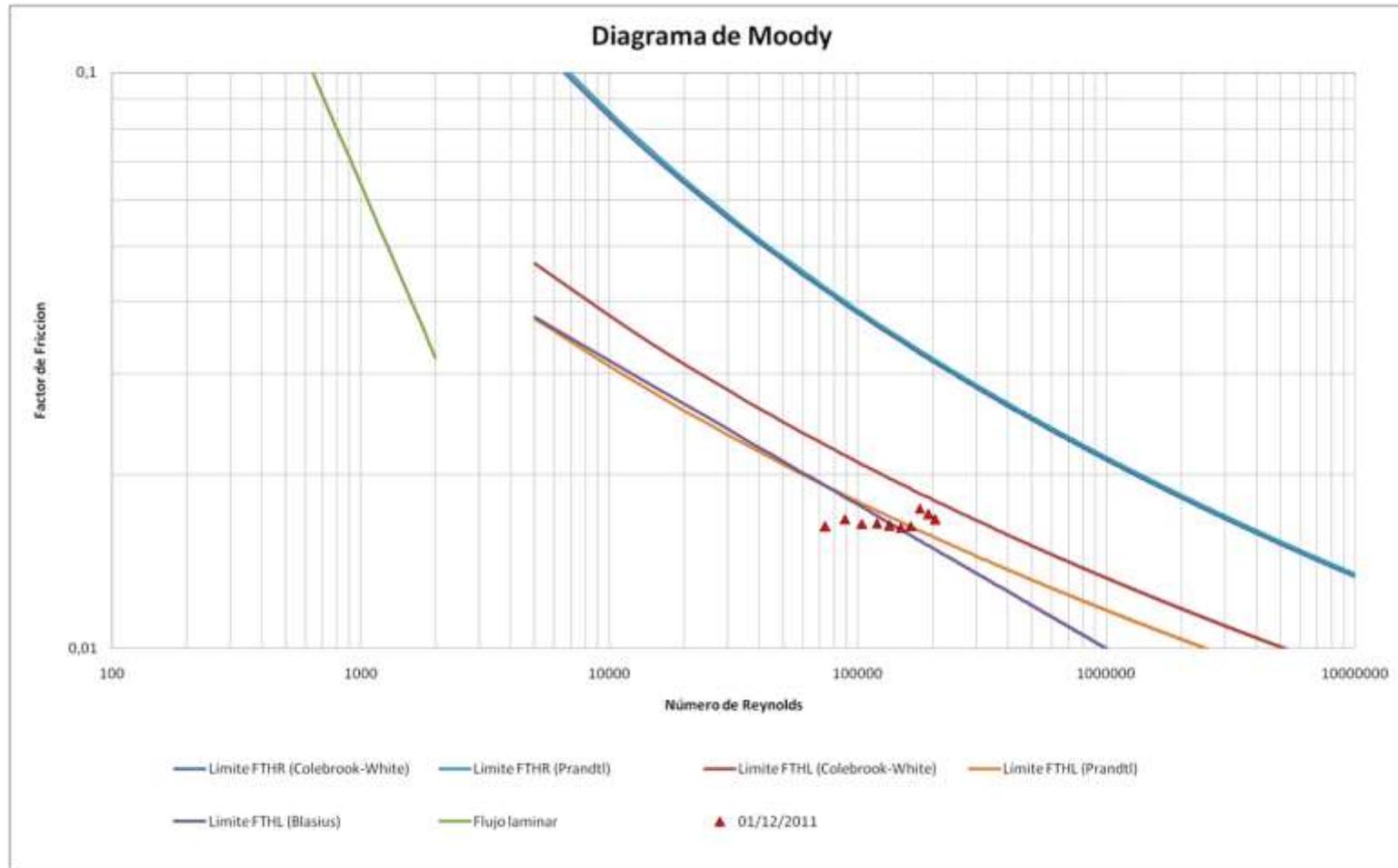


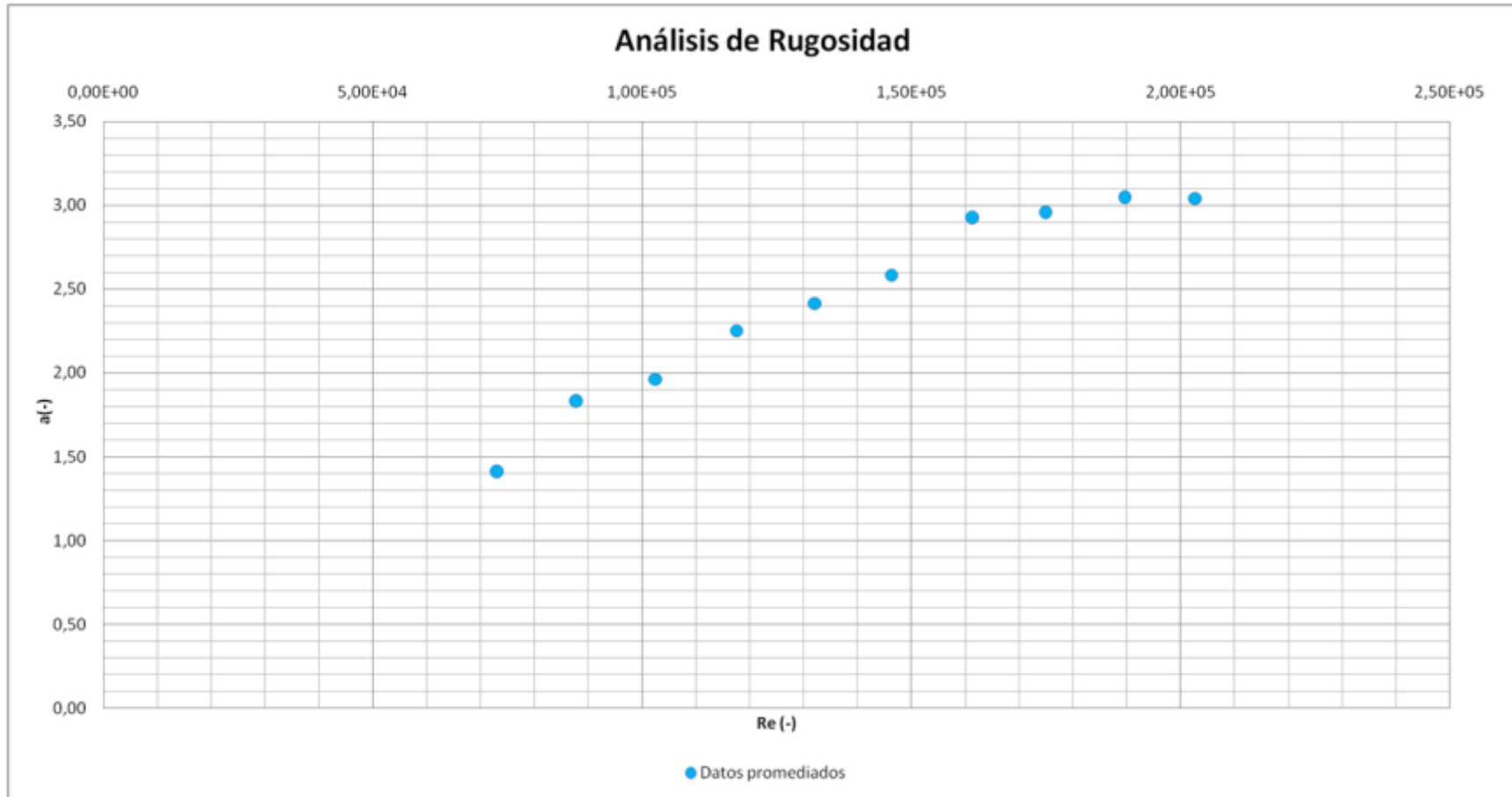
**Semana 11: Diciembre 1 de 2011**

Diciembre 01 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
28	0,0153	201330,11	0,0160	204007,19	0,0157	202607,65	0,0020	3,03944	-3,80E-19
26	0,0155	190770,05	0,0165	190770,05	0,0159	189582,74	0,0024	3,04778	9,49E-20
24	0,0156	172791,07	0,0165	176823,47	0,0161	174898,71	0,0005	2,95598	0,00E+00
22	0,0158	160154,69	0,0166	162234,81	0,0163	161284,57	-0,0002	2,92465	
20	0,0157	145441,94	0,0167	147534,64	0,0162	146310,23	-0,0096	2,58140	
18	0,0158	130980,31	0,0169	132871,41	0,0163	132009,36	-0,0156	2,41370	
16	0,0160	116617,01	0,0170	118338,90	0,0165	117549,04	-0,0229	2,25092	
14	0,0158	101596,85	0,0173	103501,69	0,0165	102463,55	-0,0375	1,96346	
12	0,0160	86941,48	0,0174	88541,77	0,0168	87761,21	-0,0491	1,83328	
10	0,0125	72004,21	0,0198	73866,66	0,0163	72989,87	-0,0850	1,41274	



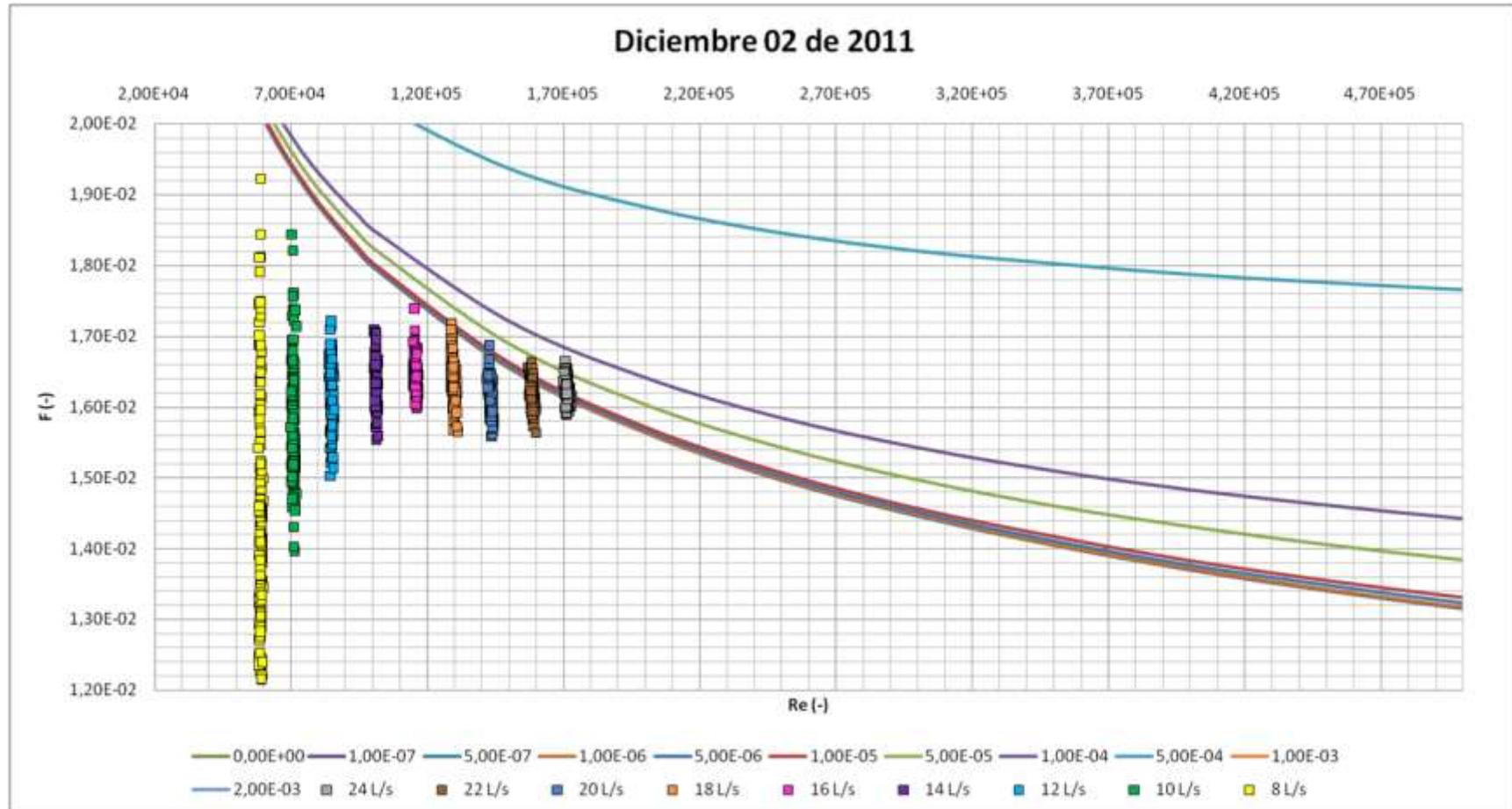


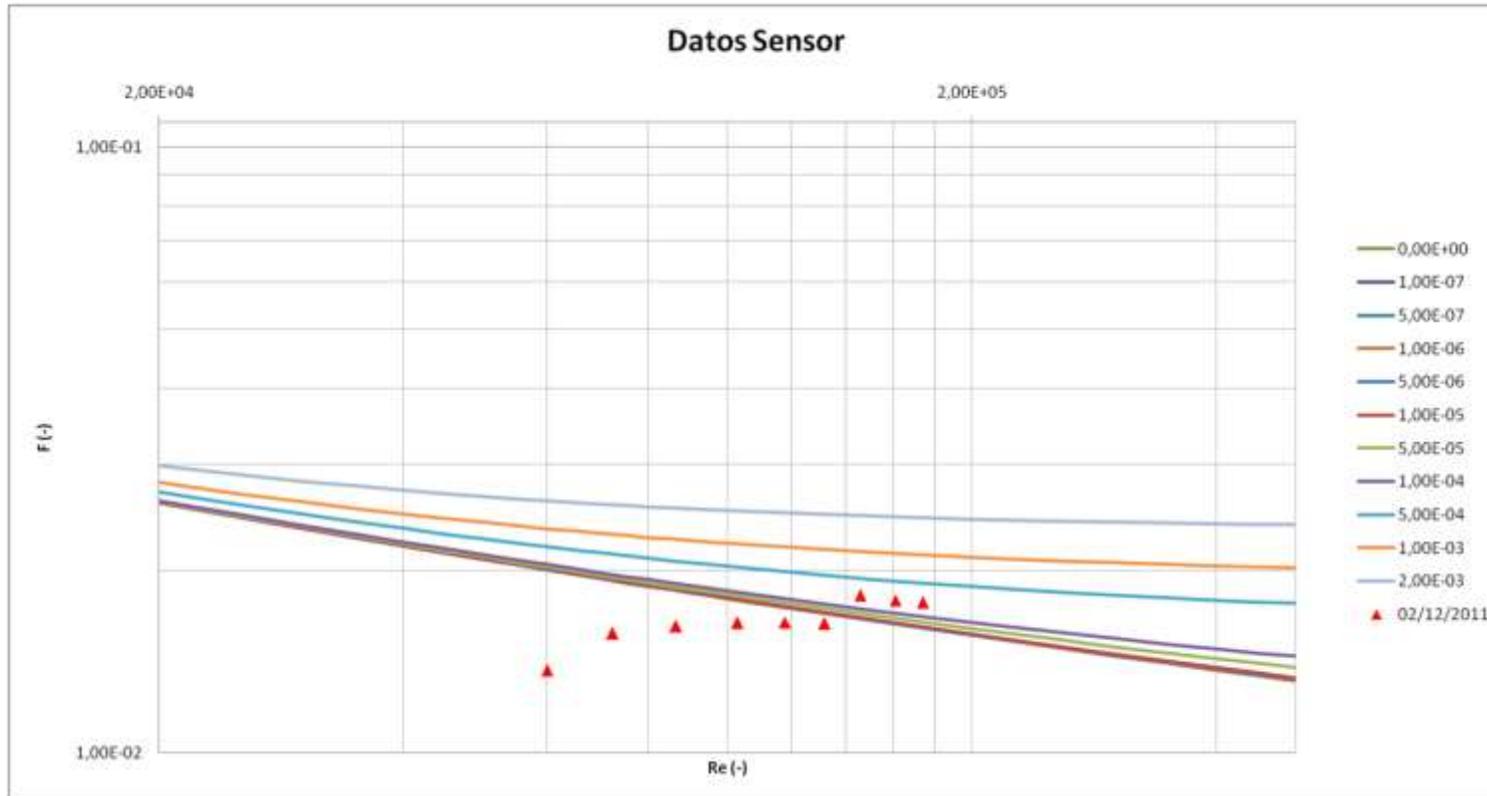


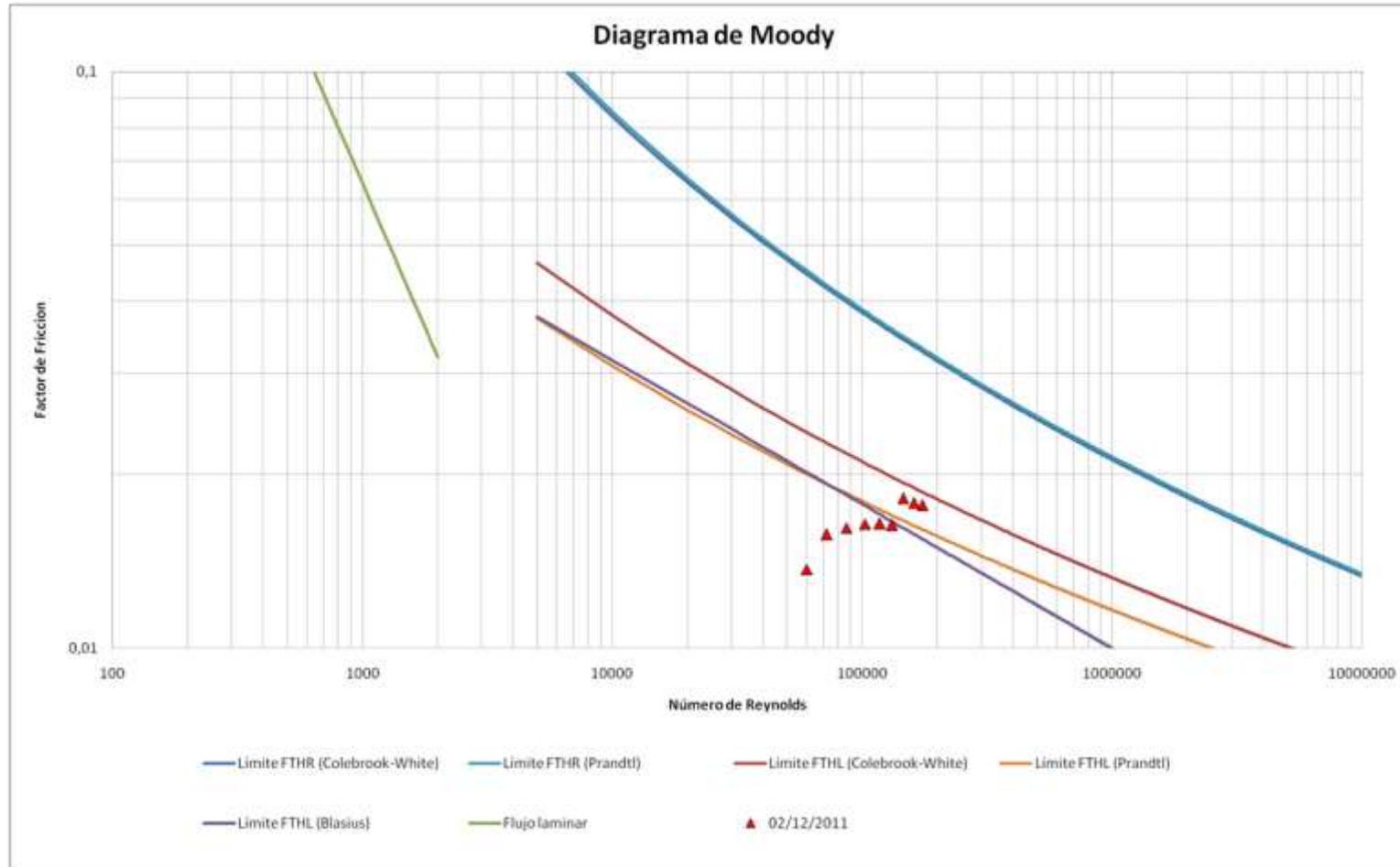


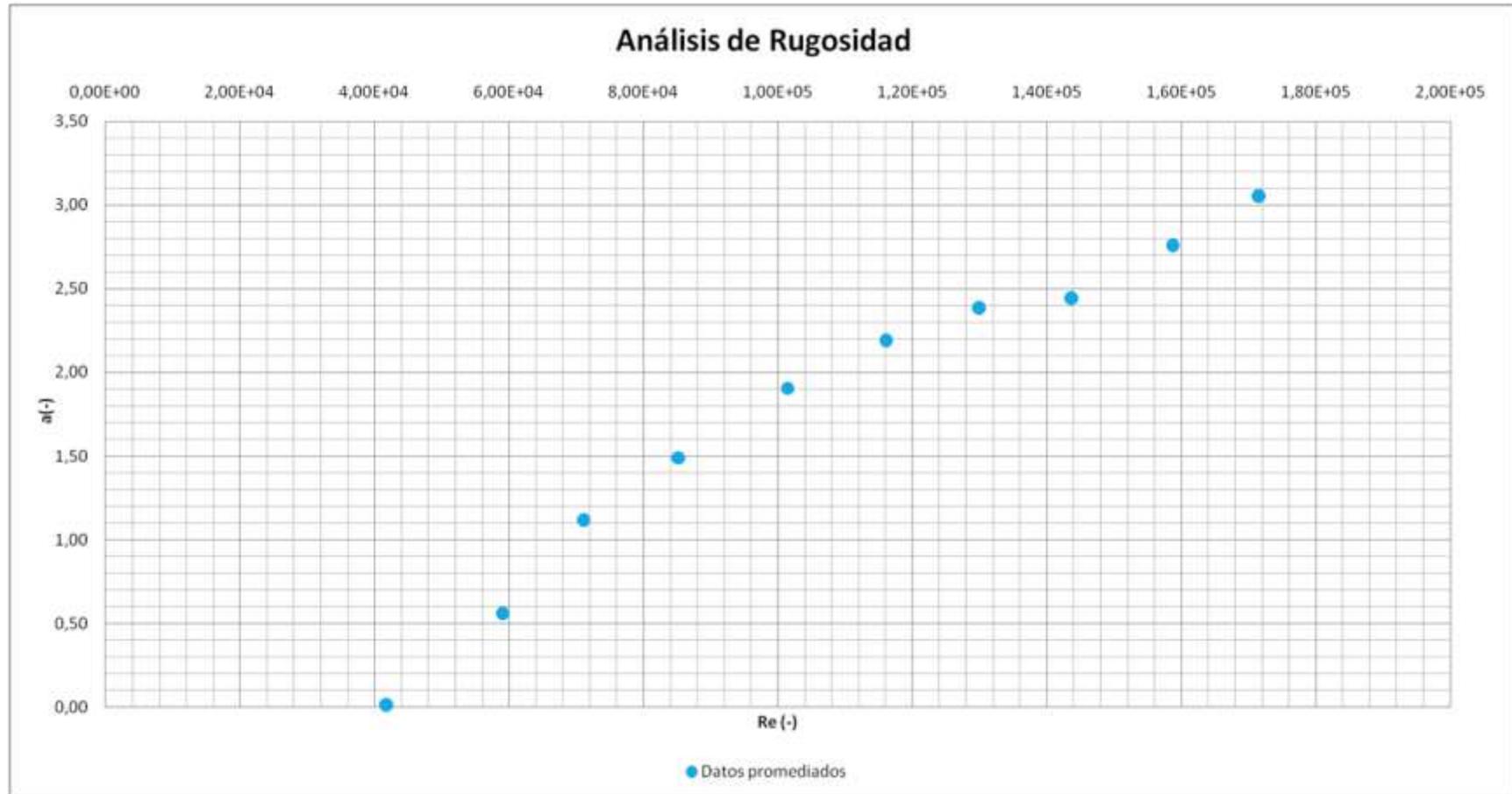
**Semana 11: Diciembre 2 de 2011**

Diciembre 02 de 2011									
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio				
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)	Ks' (mm)
24	0,0159	170330,84	0,0166	173334,87	0,0162	171469,43	0,0028	3,05358	0,00E+00
22	0,0156	159939,79	0,0166	159939,79	0,0162	158704,36	-0,0044	2,75939	
20	0,0156	142128,15	0,0169	144643,57	0,0161	143628,49	-0,0137	2,44370	
18	0,0157	129000,01	0,0172	131327,86	0,0163	129865,48	-0,0168	2,38368	
16	0,0160	114963,83	0,0174	117082,35	0,0164	116085,93	-0,0253	2,19025	
14	0,0155	100796,87	0,0171	102046,26	0,0164	101432,79	-0,0404	1,90252	
12	0,0150	84379,27	0,0172	85901,99	0,0162	85136,96	-0,0681	1,48691	
10	0,0140	70320,03	0,0184	72068,61	0,0158	71137,97	-0,1042	1,11500	
8	0,0084	58421,77	0,0192	59935,56	0,0138	59096,17	-0,1782	0,55766	
6	0,0007	41162,90	0,0142	42306,79	0,0053	41749,06	-0,5360	0,01062	









**Semana 12: Diciembre 7 de 2011**

Diciembre 07 de 2011								
Q (L/s)	Mín		Máx		Promedio			
	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	f (-)	Re (-)	Ks (mm)	a (-)
24	0,0156	173517,30	0,0163	176385,27	0,0159	175066,16	-0,0022	2,84190
22	0,0156	162725,34	0,0166	162725,34	0,0161	161056,21	-0,0040	2,77209
20	0,0157	145908,84	0,0169	148263,04	0,0164	147094,65	-0,0062	2,70297
18	0,0156	131888,45	0,0171	134015,20	0,0164	132905,33	-0,0138	2,47181
16	0,0159	117228,97	0,0172	118863,87	0,0165	118138,48	-0,0217	2,28437
14	0,0156	102903,82	0,0174	104504,51	0,0164	103613,42	-0,0374	1,95679
12	0,0154	87379,38	0,0172	88718,69	0,0162	87945,39	-0,0625	1,56031
10	0,0142	72939,06	0,0186	74360,28	0,0157	73851,76	-0,0992	1,14272
8	0,0070	59552,21	0,0196	60902,93	0,0135	60167,97	-0,1801	0,51938
6	0,0028	43518,83	0,0139	44547,40	0,0069	44067,56	-0,4211	0,01510

