

**ESTIMACION DEL COEFICIENTE f DE DARCY-WEISBACH PARA
TUBERIAS DE POLIETILENO EXTRUIDO BAJO REGIMEN DE FLUJO
TURBULENTO**

**CESAR LEONARDO CRUZ PEREZ
SANDRA MILENA PARRA MOLANO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

**ESTIMACION DEL COEFICIENTE f DE DARCY-WEISBACH PARA
TUBERIAS DE POLIETILENO EXTRUIDO BAJO REGIMEN DE FLUJO
TURBULENTO**

**CESAR LEONARDO CRUZ PEREZ
SANDRA MILENA PARRA MOLANO**

Pasantía en investigación

GPH - EXTRUCOL S.A.

Directores

Leonardo David Donado Garzón
Profesor Universidad Nacional de Colombia

David Alonso Barajas
Profesor Universidad Industrial de Santander

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2008**

AGRADECIMIENTOS

A DIOS como fuente de motivación y ayuda en cada uno de los momentos vividos como estudiante, porque en el depósito toda mi fe y confianza y fue retribuida con creces.

A mis padres porque seguramente sin su constante apoyo y motivación nada de esto se hubiera logrado.

A mis hermanos porque fueron para mí un modelo a seguir y su guía permitió mantenerme en el objetivo de sacar esta carrera adelante.

A mis profesores y compañeros Sergio, Andrés y Sandra, a Malory que con su cariño me brindó la fortaleza necesaria para culminar esta etapa final de mis estudios, y a todos los que de una manera u otra formaron en mí un profesional con carácter de servicio y compañerismo

CESAR LEONARDO CRUZ PEREZ

A DIOS por ser mi guía y soporte en todos los buenos y malos momentos, y por haberme dado la mejor Mama del mundo.

A ti mamita por amarme como lo haces, por corregirme y entenderme y porque lo has dado todo por mí, a Paolita mi hermanita, a mis tías Maribel y Cecilia y a mi abuelita Merceditas de Molano, por todo el cariño que siempre me han demostrado y porque siempre creyeron en mí.

A mis queridos amigos, a Andrés; que fueron mi familia en estos años lejos de mi casa de los que siempre recibí afecto y ayuda.

SANDRA MILENA PARRA MOLANO

AGRADECIMIENTOS CONJUNTOS

Al profesor Darío Yesid Peña (CORPOCORROSION) por su incondicional y amable colaboración a esta investigación

Al área técnica EXTRUCOL S.A. por facilitarnos todos los materiales necesarios para llevar a cabo este estudio

Y por supuesto a la mejor universidad de Colombia por darnos la oportunidad de formarnos en sus aulas.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| 1. PRESENTACION | 1 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 3 |
| 1.2.1 Objetivo General | 3 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS | 3 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL | 4 |
| 2.1 DESCRIPCION HIDRAULICA | 4 |
| 2.2. CARACTERIZACION DEL MATERIAL | 9 |
| 3. METODOLOGÍA | 12 |
| 3.1. SISTEMA DE MUESTREO | 13 |
| 3.2 METODOLOGIA DE RECOLECCION DE DATOS | 14 |
| 4. ANALISIS Y RESULTADOS | 19 |
| 4.1 DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS DE RUGOSIDAD | 19 |
| 4.2 TRATAMIENTO ESTADISTICO | 20 |
| 4.2.1 Media Aritmética: | 20 |
| 4.2.2 Varianza: | 21 |
| 4.2.3 Sesgo: | 21 |
| 4.2.4 Curtosis: | 21 |
| 4.2.5 Mediana: | 21 |
| 4.2.6 Moda: | 21 |
| 4.2.7 Media Armónica: | 21 |
| 4.2.8 Media Geométrica: | 22 |
| 4.3 DATOS ESTADISTICOS Y GRAFICOS | 23 |
| 4.4 DETERMINACION DE LOS FACTORES DE RESISTENCIA HIDRAULICA | 41 |
| 4.4.1 FACTOR DE FRICCION f | 41 |
| 4.4.2 COEFICIENTES C DE CHEZY y n DE MANNING | 41 |
| CONCLUSIONES | 56 |

| | |
|----------------------------|----|
| RECOMENDACIONES | 57 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 58 |
| ANEXO | 59 |

LISTADO DE TABLAS

| | Pag. |
|----------------------------------|-------------|
| Tabla 4.3.1 DIAMETRO 315 mm | 23 |
| Tabla 4.3.2 DIAMETRO 250 mm | 25 |
| Tabla 4.3.3 DIAMETRO 200mm | 27 |
| Tabla 4.3.4 DIAMETRO 160 mm | 29 |
| Tabla 4.3.5 DIAMETRO 90 mm | 31 |
| Tabla 4.3.6 DIAMETRO 75 mm | 32 |
| Tabla 4.3.7 DIAMETRO 63mm | 33 |
| Tabla 4.3.8 DIAMETRO 50 mm | 34 |
| Tabla 4.3.9 DIAMETRO 32 mm PE80 | 35 |
| Tabla 4.3.10 DIAMETRO 32 mm PE40 | 36 |
| Tabla 4.3.11 DIAMETRO 25 mm | 37 |
| Tabla 4.3.12 DIAMETRO 20mm PE80 | 38 |
| Tabla 4.3.13 DIAMETRO 20mm PE40 | 39 |
| Tabla 4.3.14 DIAMETRO 16 mm | 40 |

ANEXOS

| | Pag. |
|--|-------------|
| ANEXO A RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES | 59 |
| ANEXO B Compilado de resultados | 65 |
| ANEXO C REGISTRO FOTOGRÁFICO | 66 |

RESUMEN

TITULO*:

ESTIMACION DEL COEFICIENTE f DE DARCY-WEISBACH PARA TUBERIAS DE POLIETILENO EXTRUIDO BAJO REGIMEN DE FLUJO TURBULENTO.*

AUTORES** : CESAR LEONARDO CRUZ PEREZ; SANDRA MILENA PARRA MOLANO

PALABRAS CLAVES: Manning, Chezy, Resistencia Hidráulica, Flujo Turbulento.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO:

Para el diseño de estructuras hidráulicas han sido usadas por muchos años ecuaciones de flujo uniforme. Estas ecuaciones son generalmente de fácil implementación e intentan relacionar la velocidad de flujo con otras variables geométricas e Hidráulicas.

Dentro de esas variables, es frecuente encontrar una que tiene en cuenta el llamado "coeficiente de resistencia". Las ecuaciones que son comúnmente usadas involucran coeficientes como el de Manning (n), el de Chezy (C) o la rugosidad absoluta (K_s). Para calcular estos coeficientes es necesario conocer las propiedades superficiales de las tuberías, entre estas tiene una incidencia especial la rugosidad, debido a que este es un parámetro fundamental en el objetivo de determinar los coeficientes anteriormente nombrados.

A partir del estudio y caracterización física de la superficie interna de las estructuras hidráulicas, en este caso tuberías de polietileno extruido con la ayuda de herramientas mecánicas de medición como el rugosímetro HommelWerke T500 y herramientas matemáticas como el análisis estadístico además mediante la manipulación básica de ecuaciones de flujo se desarrolló e implementó un estudio para el tratamiento de los datos registrados con el equipo en las mediciones realizadas a las muestras de tuberías; y se planteó una metodología para llegar a una estimación precisa de los coeficientes de resistencia hidráulica.

* Proyecto de Grado

** Facultad Fisicomecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director Leonardo David Donado G. Ing. Civil
MsC

SUMMARY

TITLE*:

ESTIMATION OF COEFFICIENT f OF DARCY – WEISBACH FOR EXTRUDE POLYETHYLENE PIPES UNDER TURBULENT FLOW REGIME

AUTHOR** : CESAR LEONARDO CRUZ PEREZ; SANDRA MILENA PARRA

KEYWORDS: Manning, Chezy, Hydraulics resistance, Turbulent flow.

CONTENT DESCRIPTION

To design hydraulics structures has been used for many years uniform flow equation, these equations are generally easy to implement and they try to relation the speed of flow with other geometric e hydraulic variables.

Inside these variables, is frequent to find one that has been called "coefficient of resistance". The equations that are commonly used involve coefficients as that of Manning (n), that of Chezy (C) or the absolute roughness (Ks). To calculate these coefficients is necessary to know the superficial properties of the pipelines, between these a special incident has the roughness, due to the fact that this one is a fundamental parameter in the aim to determine the previous named coefficient.

From the study and physical characterization of the internal surface of the hydraulic structures, in this case extrude polyethylene pipes with the help of power tools of measurement like the roughmeter HommelWerke T500 and mathematical tools like the statistical analysis in addition by means of the basic manipulation of equations of flow was developed and implemented a study for the treatment of the information registered with the equipment in the measurements realized to the samples of pipes; and a methodology appeared to come to a precise estimation of the coefficients of hydraulic resistance.

* Degree Project.

** Faculty of Fisicomecanicas Engineerings. Civil Engineer Department. Director: Leonardo David Donado G. M. s C.

1. PRESENTACION

1.1 INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo de la sociedad moderna, históricamente ha demandado el entendimiento de la hidráulica para la conducción de fluidos con fines industriales y de bienestar para la sociedad, como abastecimiento de agua potable, conducción de aguas residuales y excesos de lluvia, así como de fluidos industriales como el petróleo, entre otros.

La hidrodinámica de los flujos internos o conducidos es compleja matemáticamente hablando, ya que las ecuaciones que la modelan presentan gran cantidad de variables involucradas, y la relación entre éstas es altamente no lineal.

Para poder dar soluciones a las diferentes necesidades y conducir los diferentes fluidos, la ingeniería ha recurrido recursivamente a la experimentación. En consecuencia, la hidráulica tradicional ha empleado para el diseño y el dimensionamiento de estructuras hidráulicas, ecuaciones semiempíricas que en su mayoría fueron planteadas a finales del siglo XIX, cuando los cálculos no poseían los desarrollos actuales (e.g., Duarte, 2005).

Dentro de los modelos usualmente usados, se destacan la ecuación de Antoine Chezy (francés, 1769), la de Robert Manning (irlandés, 1889) o la Hazen-Williams (1906). Estas ecuaciones son en su mayoría dimensionalmente no homogéneas, y describen las diferentes fenomenologías de los flujos reales con coeficientes propios de cada material, y se basan en la suposición de que los flujos están en equilibrio, es decir, sus propiedades no presentan variaciones temporales (estado estacionario) ni variaciones espaciales (estado permanente), usualmente conocido como Flujo Uniforme.

La realidad presente en los hidrosistemas como redes de tuberías o canales, es determinada por la alta influencia de las variables espacio y tiempo, lo que hace que la suposición de equilibrio, sub o sobredimensione estructuras hidráulicas, provocando fallas en los sistemas o sobrecostos en su construcción. Para una mejor comprensión de la mecánica de los fluidos en los diferentes hidrosistemas de conducción de fluidos internos, debe comprenderse la hidrodinámica. Ésta es basada en la mecánica del medio continuo, que plantea que el movimiento de los fluidos debe cumplir con cuatro ecuaciones de conservación-balance (masa, cantidad de movimiento, momento de la cantidad de movimiento y energía) y una restricción (segunda ley de la termodinámica), y además posee diferentes leyes constitutivas de acuerdo a la variación de sus propiedades físicas. Todo esto es resumido por las ecuaciones de Navier-Stokes.

Uno de los principales fenómenos asociados, es la distribución del esfuerzo cortante en profundidad. Esta distribución puede ser lineal (fluidos newtonianos) o no lineal (fluidos stokesianos). A pesar de que el agua se

comporta como un fluido newtoniano, además debe analizarse el régimen de flujo que se presente, es decir, si es laminar o turbulento. El segundo es el régimen de mayor presencia en los fluidos reales internos, es decir, las fuerzas inerciales superan en varios órdenes de magnitud a las fuerzas viscosas, provocando que la distribución de velocidades sea compleja y por lo tanto la estimación de la velocidad media, parámetro involucrado en todas las leyes de conservación también lo sea.

Los métodos semiempíricos ampliamente utilizados y aceptados por los gremios y las normas locales (RAS-2000), utilizan coeficientes empíricos, para resumir los efectos en el flujo causados por la turbulencia y la viscosidad del fluido. Con base en un análisis de similitud dinámica del problema, la ecuación de Darcy-Weisbach se perfila como la mejor alternativa para representar la entropía propia de los sistemas de conducción de fluidos (e.g., Crespo, 2006). Esta ecuación tiene la ventaja de que es aplicable en todos los regímenes de flujo y es dimensionalmente homogénea. Por esta razón, el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach es el que mejor representa los fenómenos antes descritos en los flujos internos. En flujos turbulentos (es decir dominados por la velocidad del flujo), las pérdidas de energía son proporcionales al cuadrado de la velocidad media, y en consecuencia el factor de fricción sólo depende de la rugosidad del conducto (e.g. Saldarriaga, 2007).

Consientes de las falencias que poseen estas expresiones, el mundo científico ha concentrado sus esfuerzos en la investigación de los procesos hidrodinámicos, y con la ayuda de herramientas computacionales, plantear formulaciones más acercadas a la realidad, y es la etapa que se espera desarrollar a partir del acercamiento entre la Industria y la Universidad.

Dentro del contexto regional, la Empresa Colombiana de Extrusión EXTRUCOL DE COLOMBIA introdujo al mercado tuberías en polietileno extruido cuyo uso se ha ido masificando. Uno de los propósitos de EXTRUCOL como empresa es poder brindar a sus usuarios un conocimiento más acertado de resistencia hidráulica de sus materiales.

El principal objetivo de la presente pasantía fue estimar el coeficiente de fricción f de Darcy-Weisbach en tuberías de polietileno extruido bajo régimen de flujo turbulento. Para conseguirlo fue necesario: (i) Determinar la rugosidad K_s , por métodos mecánicos, (ii) establecer el programa de muestreo de la rugosidad en tuberías de polietileno extruido y, (iii) determinar indirectamente los coeficientes de rugosidad para flujo a superficie libre.

A continuación se presenta en este documento, una ampliación del marco conceptual sobre las pérdidas de energía en tubosistemas. En la siguiente sección se realizará una presentación de todo el proceso experimental en secciones de tubería de polietileno extruido. Este análisis incluye un análisis estadístico para determinar los valores de los diferentes coeficientes de pérdidas en las tuberías.

Este proyecto es la semilla de un gran proyecto, del cual se esperan grandes aportes y resultados a la ingeniería colombiana. La siguiente etapa corresponde a la experimentación y ampliación del marco de validez de los parámetros acá consignados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- ☉ Estimar el coeficiente de fricción f de *DARCY- WEISBACH* en tuberías de polietileno extruido bajo régimen de flujo turbulento

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ☉ Determinar la rugosidad K_s , por métodos mecánicos.
- ☉ Establecer el programa de muestreo de la rugosidad en tuberías de polietileno extruido
- ☉ Determinar indirectamente los coeficientes de rugosidad para flujo a superficie libre.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 DESCRIPCION HIDRAULICA

El Coeficiente Adimensional de Pérdidas

En el Análisis y Diseño de las instalaciones hidráulicas es necesario conocer las expresiones que relacionan el aumento o disminución de energía hidráulica que sufre el fluido al atravesar el elemento o componente con el caudal.

Es muy habitual designar a las pérdidas de energía hidráulica que sufre el fluido como *Pérdidas de Carga*, siendo éstas debidas a la *fricción* entre fluido y las paredes sólidas o también por la fuerte disipación de energía hidráulica que se produce cuando el flujo se ve perturbado por un cambio en su dirección, sentido o área de paso debido a la presencia de componentes tales como adaptadores, codos y curvas, válvulas u otros accesorios.

La pérdida de carga que sufre el fluido al atravesar un elemento es generalmente una función del caudal o velocidad media (v), de las características del fluido (ρ y μ), de parámetros geométricos característicos del elemento y de la rugosidad de los materiales. En la mayoría de las ocasiones el flujo en tuberías se encuentra bajo régimen de flujo turbulento, y bajo estas condiciones el coeficiente de fricción solo depende de la rugosidad relativa, es decir de la relación existente entre K_s (*rugosidad absoluta*) y el diámetro D , por este motivo toma vital importancia dentro del estudio de las características hidráulicas de las tuberías el conocimiento de los materiales en los que están fabricadas, para este caso en particular el polietileno.

Las pérdidas por unidad de longitud se comportan de modo diferente para flujo laminar y para flujo turbulento conclusión a la que llegó Reynolds en su segundo experimento, en el cual observó como el aumento en las pendientes, representa una relación potencial entre pérdidas de energía y la velocidad del flujo. (Ver **figura 2.1**)

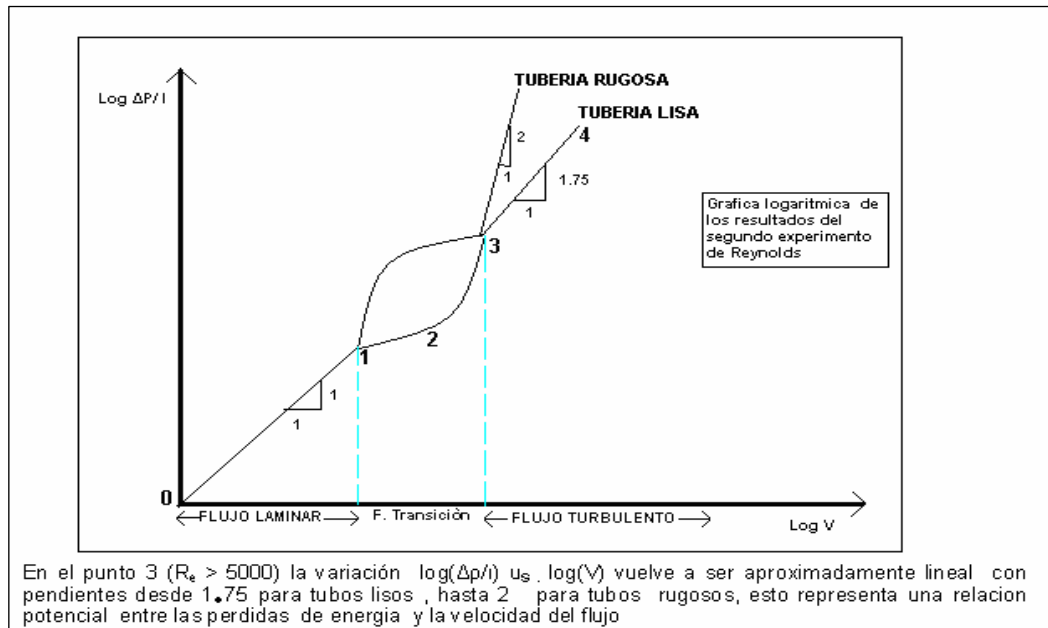


Figura 2.1 Log p/l vs Log v

Siempre que un fluido en movimiento interactúa con una pared sólida, el esfuerzo cortante que se genera afecta principalmente la zona del flujo; esta zona recibe el nombre de capa límite, la cual puede ser laminar o turbulenta. Para el caso de flujo turbulento, la superficie sólida impide que cerca de ella ocurran las variaciones de velocidad en forma libre, generándose una zona de flujo laminar dentro de la capa límite. Ésta capa se conoce con el nombre de subcapa laminar viscosa y siempre se presenta en flujo turbulento.

El espesor de la subcapa laminar es mucho menor que el de la capa límite ($\delta' \ll \delta$). La relación existente entre δ' y el tamaño medio de la rugosidad de las paredes establece la diferencia entre los flujos hidráulicamente lisos y los hidráulicamente rugosos. (ver **figura 2.2**) Cuando el espesor de la subcapa laminar viscosa es mayor que el tamaño medio de la rugosidad, el flujo se comporta como si la rugosidad de la tubería no existiera, es decir, como flujo hidráulicamente liso. En el caso contrario el flujo será hidráulicamente rugoso.

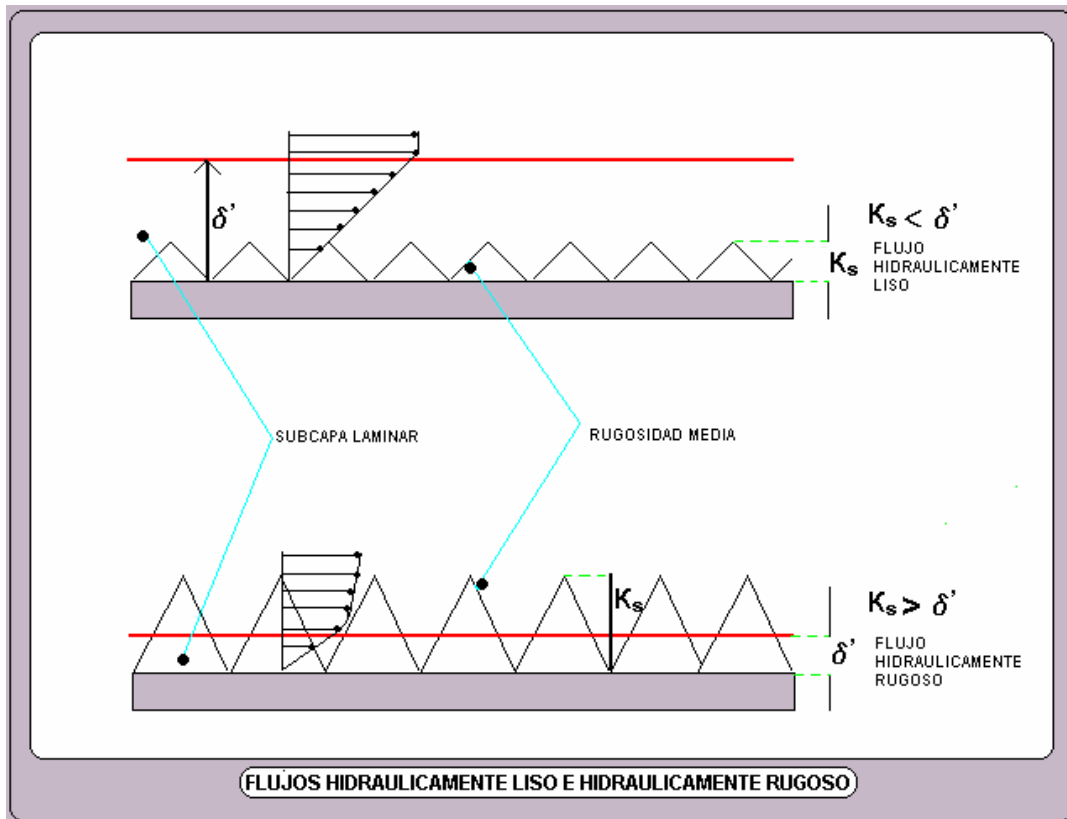


Figura 2.2 Flujos hidráulicamente liso e hidráulicamente rugoso

Flujo hidráulicamente liso (tubería hidráulicamente lisa): La rugosidad (K_s) queda cubierta por la subcapa laminar (δ'). La rugosidad, por tanto, no influye en el valor de f puesto que ningún punto de la pared queda afectado por las turbulencias que producirían las rugosidades internas, comportándose la tubería como un material liso.

Flujo hidráulicamente semirrugoso o zona de transición: El espesor de la subcapa laminar (δ') se aproxima al valor medio de rugosidad (K_s), de manera que la rugosidad emerge de la subcapa laminar en unos puntos y en otros no, quedando sólo las rugosidades que emergen afectadas por la turbulencia. Es el caso más frecuente, y aquí el coeficiente de fricción depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa.

Flujo hidráulicamente rugoso (tubería hidráulicamente rugosa): Si el espesor de la capa límite (δ') es menor que la rugosidad absoluta (K_s), las irregularidades internas de la conducción rebasan la subcapa laminar, produciendo turbulencia completa. Cuanto mayor sea el número de Reynolds, más delgada será la subcapa laminar y más puntos de la pared sobresaldrán de ella. En este caso, las fuerzas de inercia son muy importantes y apenas influyen las fuerzas viscosas, por lo que el factor de fricción sólo depende de la rugosidad relativa y el número de Reynolds no tiene importancia en su determinación.

El diseño de la hidráulica requeriría una ecuación que predijera las pérdidas por fricción como función del fluido la velocidad, el diámetro de la tubería y el

tipo de material. Weisbach propuso la ecuación que se utiliza hoy en día. Esta ecuación solo cubre y predice las pérdidas debidas a la fricción fluida sobre las paredes de la tubería y a los efectos de la viscosidad del fluido y no incluye las pérdidas menores en entradas codos y otros accesorios.

El factor de fricción es una función compleja de la velocidad del flujo, de la densidad y la viscosidad, del diámetro y la rugosidad de la tubería. Cuando se trata de conductos cerrados simples, el único tipo de energía que puede perderse por razón del movimiento del fluido es la energía de presión, ya que la energía cinética debe permanecer constante si el área es constante, la energía potencial solo depende de la posición y la energía de presión, expresada como energía por unidad de peso del fluido tiene unidades de altura (h).

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

h_f = Energía por unidad de peso perdida 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 media

Para nuestro caso particular el factor de fricción es una función compleja del la rugosidad relativa

$$f = F \left(\frac{k_s}{d} \right) \quad (2)$$

DIAGRAMA DE MOODY

Moody observó que el factor de fricción f solo era función de la rugosidad relativa $\left(\frac{k_s}{d}\right)$ para flujos hidráulicamente rugosos, y produjo una curva del factor de fricción para flujo hidráulicamente rugoso. Luego tomó tuberías comerciales de diferentes materiales y diámetros, las llevó al laboratorio y midió pérdidas por fricción y calculó el factor de fricción. Con estos resultados finalmente calculó la rugosidad relativa usando la curva y con esta rugosidad y el diámetro calculó la rugosidad absoluta K_s

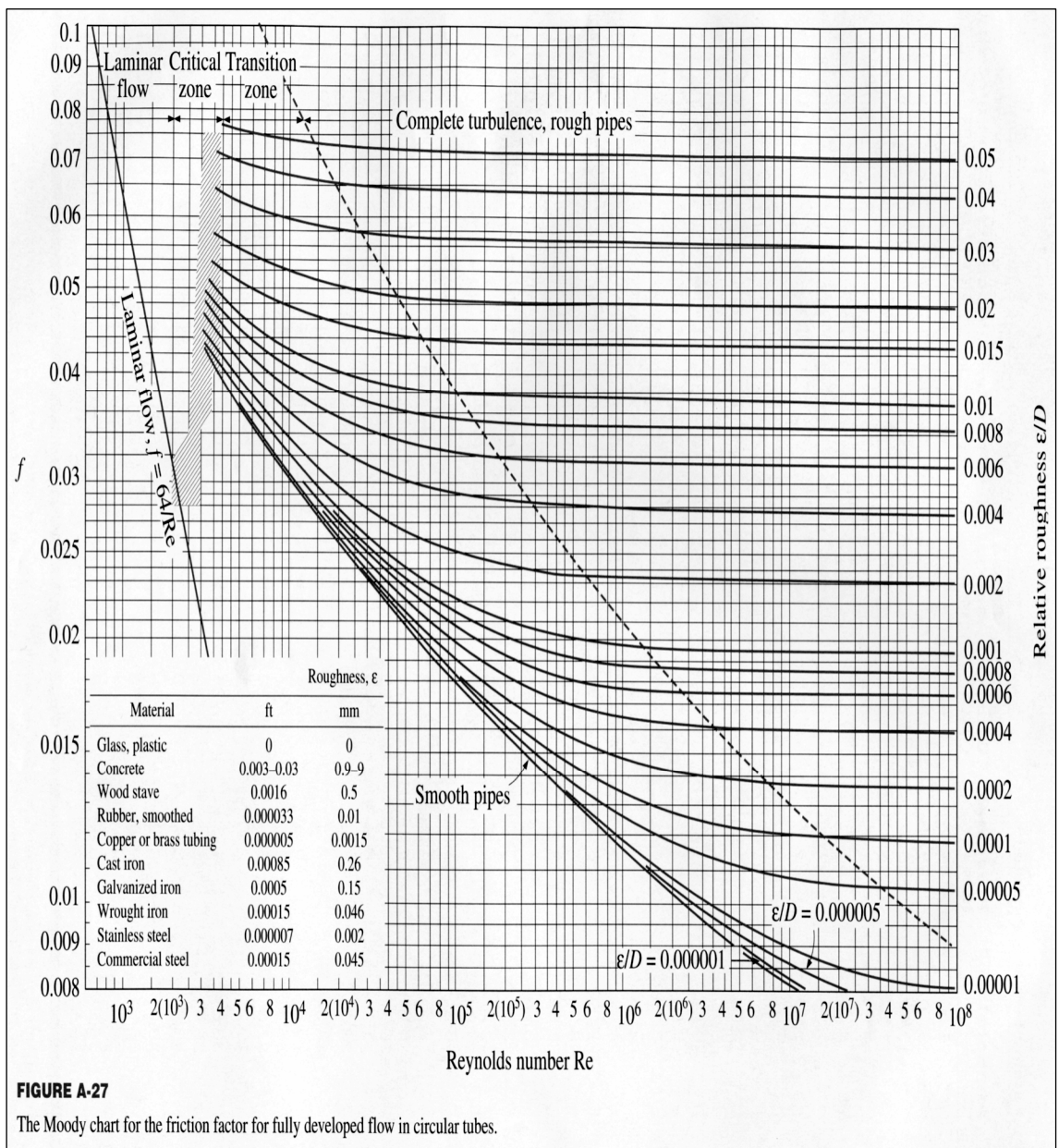


Figura 2.3 Diagrama De Moody

En la estimación del coeficiente de resistencia, surge la hipótesis en la que el n de **Manning** (Ecuación 6) y C de **Chezy** (Ecuación 5) se comportara de manera análoga con el factor de fricción f de Darcy-weisbach

$$S_f = \frac{h_f}{l} \quad (3)$$

$$V = F(S_f)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

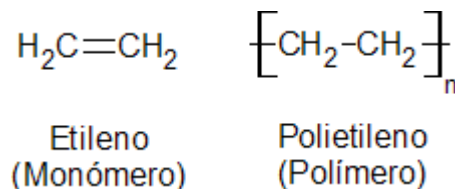
$$\text{Chezy} \rightarrow V = C\sqrt{RS_f} \quad (5)$$

$$\text{Manning} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f} \quad (6)$$

2.2. CARACTERIZACION DEL MATERIAL

El polietileno (PE) es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n$, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado. Este tipo de polímero se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película y para envases.



Tipos de Polietileno

En general hay dos tipos de polietileno:

- De baja densidad (LDPE)
- De alta densidad (HDPE).

El de baja densidad tiene una estructura de cadena enramada, mientras que el polietileno de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena recta.

El polietileno de baja densidad fue producido comercialmente por primera vez en el Reino Unido en 1939 mediante reactores autoclave (o tubular) necesitando presiones de 14.500 psi (100 Mpa) y una temperatura de unos 300 °C. El polietileno de alta densidad fue producido comercialmente por primera vez en 1956-1959 mediante los procesos de Philips y Ziegler utilizando un catalizador especial. En estos procesos la presión y temperatura para la reacción de conversión del etileno en polietileno fueron considerablemente más bajas. Por ejemplo, el proceso Philips opera de 100 a 150 °C y 290 a 580 psi (2 a 4 MPa) de presión.

Sobre 1976 se desarrolló un nuevo proceso simplificado a baja presión para la producción de polietileno, el cual utiliza una presión de 100 a 300 psi (0,7 a 2 Mpa) y una temperatura de unos 100 °C. El polietileno producido puede describirse como un polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y tiene una estructura de cadena lineal con ramificaciones laterales cortas, inclinadas.

Consideraciones Generales

Los termoplásticos pueden ser ablandados mediante calor repetidas veces y endurecidos mediante enfriamiento. Las resinas de polietileno son termoplásticas.

Las propiedades de las resinas de polietileno se deben principalmente, sino exclusivamente a tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular. Estas propiedades básicas a su vez dependen del tamaño, estructura y uniformidad de la molécula de polietileno. Algunas de las propiedades que hacen del polietileno una materia prima tan conveniente para miles de artículos manufacturados son , entre otras poco peso, flexibilidad, tenacidad, alta resistencia química y propiedades eléctricas sobresalientes.

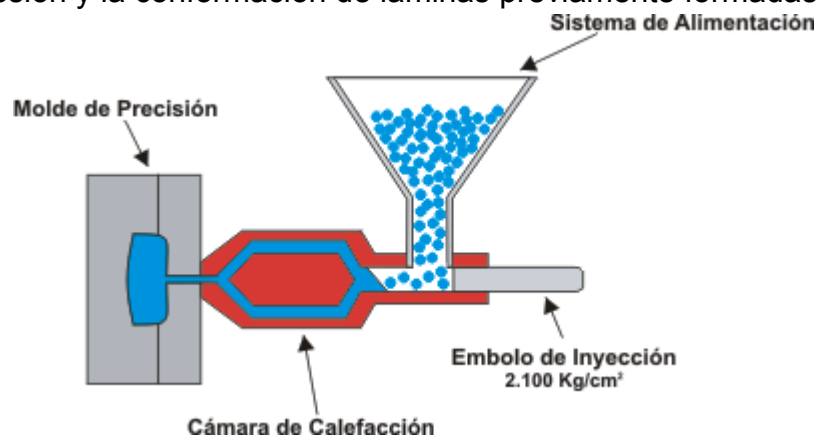
La enorme competencia en el mercado de polietileno ha traído consigo más trabajos acerca de la modificación de polietilenos con propiedades específicas para aplicaciones determinadas. Son de esperar mejoras en propiedades parejas con determinados usos, a medida que se comprenda mejor la estructura de los diversos polímeros de polietileno y su relación con las propiedades físicas y químicas.

Procesamiento del material

El polietileno se suministra generalmente en forma de gránulos de unos 3mm de diámetro, ya en su estado natural o con un antioxidante o un pigmento. La mayor parte de los artículos terminados hechos con polietileno se fabrican por extrusión. La extrusión se hace sobre alambres para la fabricación de cables, o en forma de tubos de pared gruesa para instalaciones de abastecimiento de agua o fábricas de productos químicos, en monofilamento para tejidos, en película, ya como lámina plana, ya como tubo ancho de pared delgada, ya como lámina plana sobre una hoja de papel. En general, se usan máquinas de extrusión del tipo de husillo y los gránulos se introducen en frío. La temperatura de extrusión varía considerablemente, según la naturaleza del artículo terminado, entre temperaturas próximas al punto de fusión para secciones

gruesas y temperaturas próximas a la temperatura de descomposición (300 °C) cuando el objeto es de acción delgada y puede enfriarse rápidamente sin que se deforme.

En el moldeo por inyección, pueden usarse velocidades elevadas de moldeo en virtud del elevado punto de solidificación del polietileno. El moldeo por extrusión del polímero fundido se hace en máquina de husillo y con un molde grande calentado provisto de orificios para la expulsión del aire, que se enfría progresivamente desde el extremo más alejado del extrusor mientras se mantiene la alimentación del molde; así se fabrican artículos que pesan 45 o más kilogramos. Para la fabricación de artículos huecos, como botellas, se usa un procedimiento parecido al de soplado del vidrio. Se usan también el moldeo por compresión y la conformación de láminas previamente formadas.



Moldeo de Polietileno por inyección

El polietileno en forma de láminas o tubos puede soldarse, usando una corriente de nitrógeno a 200 °C, y una barra de polietileno. Puede usarse metal perforado para reforzar una junta soldada.

Si es necesario incorporar un antioxidante o un pigmento antes de la fabricación, puede hacerse sobre rodillos abiertos, en mezcladores internos o en máquinas de extrusión del tipo de husillo. Si el extrusor usado para la fabricación del artículo final es apropiado, puede ser suficiente introducir una mezcla mecánica de gránulos de polietileno natural con gránulos compuestos de un concentrado del antioxidante o el pigmento, pues esto puede conducir a una dispersión adecuada en el artículo final.

3. METODOLOGÍA

La metodología que permitió realizar este trabajo se dividió en tres fases.

La primera fue plantear un programa de muestreo, en el que se tuvo en cuenta factores que tienen incidencia en los resultados de producción, de la mano del área técnica de EXTRUCOL S.A.

La segunda fase consistió en realizar las mediciones establecidas inicialmente por el diseño experimental, esta fase se desarrolló en los laboratorios de corrosión de la Universidad Industrial de Santander ubicados en la sede Guatiguara, para este fin fue usado un equipo de metrología denominado rugosímetro de marca Hommelwerke referencia T500 el cual obtiene picos de rugosidad, las mediciones se realizaron en la dirección paralela al flujo circulante dentro de las tuberías para esto se debieron fraccionar las muestras, además de esto, la sustentación de tal seccionamiento radica, aparte de la facilidad en el proceso de recolección de datos, en el interés del fabricante de conocer de primera mano la homogeneidad del proceso de extrusión de sus tuberías de polietileno, esto les permite optimizar sus procesos de fabricación implementando medidas que pretendan homogenizar las secciones más críticas de cada diámetro, al realizar una simple inspección visual al tubo en su parte interior se puede apreciar unas franjas a lo largo de este, estas se presentan al momento de la extrusión y se deben a distintos factores, como presencia de humedad en las muestras, imperfecciones en el dado extrusor o otros factores desconocidos que esperan ser aclarados con ayuda de este estudio.

Dentro de la tercera fase del proyecto se llevó a cabo la interpretación de los resultados y los cálculos de los coeficientes de resistencia hidráulica (Manning, Chezy, Ks).

3.1. SISTEMA DE MUESTREO

La relación entre la investigación y la producción consta de ciertos factores que deben tenerse en cuenta para lograr un resultado aceptable que permita establecer los parámetros en los cuales hacer un énfasis orientado a una confiabilidad estadística que nos brinde una aleatoriedad de las muestras analizadas.

Basados en lo anterior se decidió implantar un sistema de muestreo que albergue, en lo posible, todas las variables que inciden en la producción de los tubos de los cuales se extraerán las muestras que serán la base del estudio.

Innumerable es la cantidad de factores que inciden en la producción, para la identificación de estos se conto con el acompañamiento del área técnica de EXTRUCOL S.A. de los cuales se recibió una capacitación acerca del proceso de extrusión del polietileno, el tratamiento de extracción de humedad, condiciones en la línea extrusora, controles de temperatura y velocidad de extrusión, además de esto una completa instrucción sobre los procesos de fusión de tubos y accesorios.

Es de vital importancia resaltar que no todos los factores de producción afectan de manera directa o indirecta la rugosidad de la tubería, debido a la complejidad de la producción se deben conocer plenamente cuales y de qué manera lo hacen, por esto el personal de laboratorio de EXTRUCOL S.A. brindo información precisa sobre variables incidentes como lo es la presencia de humedad en la materia prima, densidad del polietileno, relación diámetro espesor, estado del dado extrusor y factores de mantenimiento, entre otros, debido a esto, modelar un sistema que garantice una homogeneidad de muestras es muy complejo ya que se tendrían que acceder a bases de datos con las que no se cuentan, además se tendría que disponer del tiempo necesario para que todos los diámetros tengan todas las variables consideradas y esto en términos de producción estaría atado a asuntos comerciales que se salen del alcance del estudio.

El área técnica de EXTRUCOL S.A. basados en la experiencia y su programa de control de calidad escogió dentro de unas muestras testigo las secciones de tubería que serán analizadas, estas muestras testigo son elementos de propiedades y condiciones de fabricación conocidas por la empresa y representan de alguna manera los valores extremos que se quieren estudiar.

3.2 METODOLOGIA DE RECOLECCION DE DATOS

A continuación se presentan los datos obtenidos con las pruebas realizadas con el rugosímetro Hommelwerke T500, con el fin de obtener una mejor lectura, los tubos fueron seccionados en forma ordenada, para así hacer un seguimiento más acertado del comportamiento de la superficie, para los diámetros pequeños de 63mm al 110mm se fraccionaron en 4 secciones (fig. 3.2.1) con el fin de facilitar su medición, además con una inspección visual se pudo establecer una mayor homogeneidad en esos diámetros, mientras que para los diámetros de 160mm a 315mm se fraccionaron en 8 secciones (fig. 3.2.1)

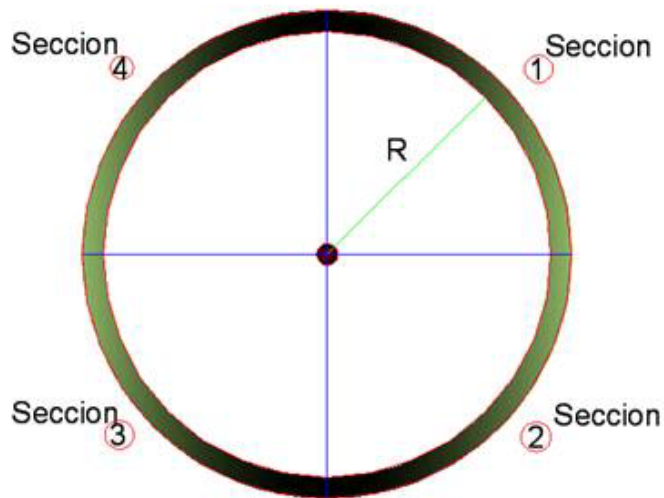


Figura 3.2.1 Seccionamiento de tuberías 16 mm a 90 mm

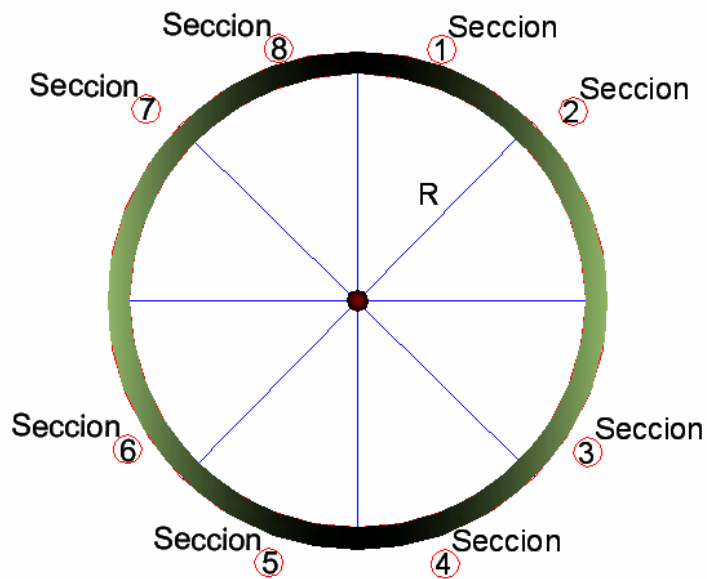


Figura 3.2.2 Seccionamiento de tuberías 160 mm a 315 mm

Teniendo en cuenta que anteriormente se justifico el seccionamiento de las muestras, ahora se procede a describir el sistema establecido en la medición de cada una de estas secciones, al analizar las muestras y de estas sus secciones es posible percibir que dentro de estas se presentan unas franjas con características superficiales distintas, debido a esto también era necesario implementar una metodología lógica para que la toma de datos dentro de cada una de estas tenga una justificación.

El mecanismo implementado para el muestreo es simple, se tomo el ancho de cada sección al cual se le denomino Longitud total (L_t). (fig. 3.2.3)



Figura 3.2.3 Sección Típica

Posteriormente se identificaron visualmente las franjas presentes en la sección a estudiar, y se procedió a medir su grosor con ayuda de un calibrador o pie de rey de alta precisión, se denomino a estas, longitudes de franjas (L_{f_i}) (fig. 3.2.4)

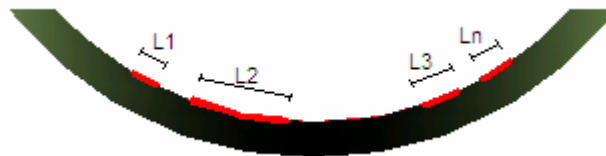


Figura 3.2.4 Sección Típica

La longitud de franja (L_f) se calcula como el promedio de las longitudes de franja de la siguiente manera:

$$L_f = \frac{\sum_{i=0}^n L_i}{n} \quad (7)$$

Teniendo los valores de L_f y L_t se determino el numero n de pasadas que se deberían realizar a la sección para poder analizarla en su totalidad, se estableció la relación:

$$n = \frac{L_t}{L_f} \quad (8)$$

La metodología se aplico de igual manera para todos los diámetros y los resultados de estas no se anexan en el informe debido a su extensión, pero en resumen arrojaron un valor n igual a 9.53 en promedio para todos los diámetros

por lo cual se estableció que el número de lecturas que se deben hacer a una sección es de 10, con esto se asegura el registro completo de la muestra.

El procedimiento de medición se realizó en su totalidad en la sede Guatiguara de la Universidad Industrial de Santander, en los laboratorios de Corrocción de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, se dispuso de un lugar en el laboratorio para que las mediciones se realizaran siempre en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones idóneas, que se basan en un lugar estable donde las muestras estén aisladas de cualquier tipo de alteración, en consecuencia de esto se podría llegar a resultados errados de medición dada la sensibilidad del equipo, se ubicaron entonces las muestras en un mesón de mármol anclado al sistema estructural del edificio asegurando que cualquier movimiento interno del personal en el laboratorio sería independiente del movimiento del sensor del equipo en la muestra. (imagen 3.2.5)



Imagen 3.2.5 Rugosímetro

El dispositivo de medición de rugosidad HommelWerke T500 cuenta con un sistema de apoyo retráctil en su parte posterior con el cual se regula la altura a la cual se realiza la medición, esto es de gran utilidad considerando los diferentes diámetros que se están analizando. (Imagen 3.2.6)



Imagen 3.2.6 Rugosímetro

Para garantizar la horizontalidad del equipo HommelWerke T500 este se encuentra equipado con un nivel electrónico en su interior que indica en el display del equipo la posición correcta en la que se debe hacer la lectura, esto con el fin de garantizar que el sensor se mueva de manera estrictamente horizontal y paralelo a la superficie de medición. (Imagen 3.2.7)



Imagen 3.2.6 Rugosímetro

El equipo cuenta en su parte anterior con un sensor que se ensambla al momento de iniciar la medición, este sensor está dispuesto en forma de bastón alargado y en su extremo cuenta con un micro sensor que es el encargado de registrar las características superficiales de la muestra.

Al momento de iniciar la medición el bastón se desplaza a lo largo de una distancia L_t este valor es preestablecido por el equipo en su configuración inicial en su primer uso y es la longitud que se estudia en la muestra, se desplaza inicialmente de manera lenta haciendo un barrido detallado de la superficie y posteriormente se devuelve a una velocidad mayor en un proceso de verificación de datos, posterior a esto proporciona unos valores R_a , R_z y

Rmax. que brindan una información suficiente para identificar las características de la superficie, estos parámetros se explicaran con mayor detalle en la siguiente fase del estudio.

Los resultados de estas mediciones se adjuntan en el ANEXO A

4. ANALISIS Y RESULTADOS

En la fase tres se disponen los datos de las mediciones obtenidas en la fase anterior, se analizaran los parámetros proporcionados por el equipo HommelWerke T500, y su relevancia para el objetivo principal del estudio.

La Metrología es definida como la ciencia de la medición, ésta envuelve tanto la teoría como la práctica. La medición tiene como objetivo determinar el valor de la cantidad.

En metrología es de gran importancia en el tratamiento que se le da a los datos recolectados debido a que la precisión depende tanto de factores prácticos (medición) como a factores teóricos (interpretación), esta última es la base científica de lo que se quiere mostrar, para esto la ilustración del mismo debe ser de forma clara y concisa, el entendimiento depende de la manera en que se manipulen y se transmitan los datos a un plano entendible y sujeto a unos parámetros establecidos.

4.1 DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS DE RUGOSIDAD

El equipo usado en la medición de la rugosidad interna de las tuberías, es el HommelWerke T500 de fabricación alemana, el cual proporciona los valores Ra, Rz y Rmax con un valor indicado mínimo de 0.01μ ($0.01 \times 10^{-6}m$).

Ra (Roughness Average) Valor medio de rugosidad ((Norma DIN 4777 ISO/JIS4287/1). *fig. 4.1.1*

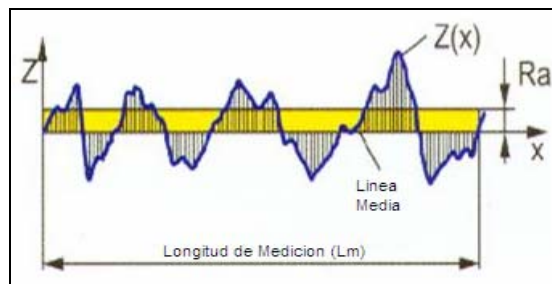


Figura 4.1.1 Ra

Medida aritmética de la discrepancia del perfil de rugosidad de la superficie filtrado de la línea media dentro del recorrido de medición (L_m) *Ecuación (3.1.1)*

$$Ra = \frac{1}{L_m} \int_{x=0}^{x=L_m} |Y| \cdot dx \quad (9)$$

Rz Profundidad media de rugosidad (Norma DIN 4777). *fig. 4.1.2*

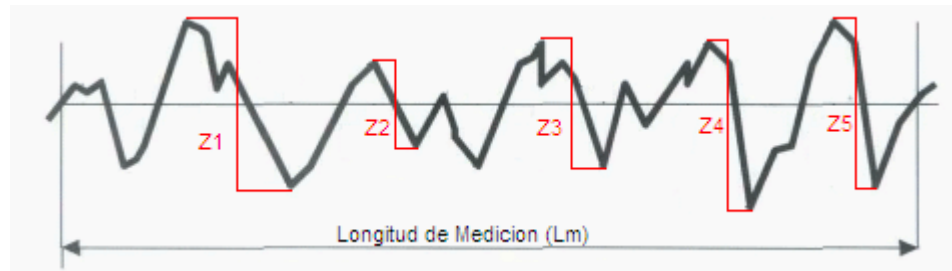


Figura 4.1.2 Rz

Media aritmética de las profundidades de rugosidad aisladas de Z_1 hasta Z_5 de cinco recorridos de medición sucesivos en el perfil de rugosidad filtrado. Es el valor de los cinco picos máximos consecutivos en el recorrido de medición, se realiza al finalizar el recorrido del sensor. *Ecuación (3.1.2)*

$$Rz = \frac{\sum_{i=0}^5 Zi}{5} \quad (10)$$

Rmax. Máxima Profundidad de Rugosidad (DIN 4777) *fig. 4.1.3*

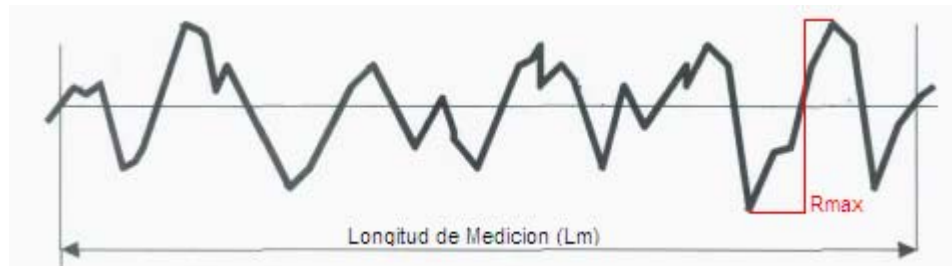


Figura 4.1.3 R max

Máxima profundidad individual constatada dentro del recorrido total de medición (L_m) en la elaboración de Rz . Es el valor desde el pico más alto y la hendidura mas profunda durante el recorrido de la longitud de medición, es el valor máximo de todos los parámetros anteriores es decir, se cumple que $Rz < R_{max}$ para todos los casos, además R_{max} también es siempre uno de los cinco valores que componen Rz .

4.2 TRATAMIENTO ESTADISTICO

Para la recolección de datos se le aplicaron unos estadísticos básicos que comprenden ocho parámetros que indicaran características propias de los datos dirigidas a orientar de manera precisa su comportamiento estadístico.

4.2.1 Media Aritmética:

La media aritmética o promedio, de una cantidad finita de números, es igual a la suma de todos ellos dividida entre el número de sumandos. Este constituye el principal estadístico muestral.

Expresada de forma más intuitiva, podemos decir que la media (aritmética) es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación.

4.2.2 Varianza:

Es una constante que representa una medida de dispersión media de una variable aleatoria X , respecto a su valor medio o esperado. Puede interpretarse como medida de "variabilidad" de la variable.

4.2.3 Sesgo:

Es un error que aparece en los resultados de un estudio debido a factores que dependen de la recolección, análisis, interpretación, publicación o revisión de los datos que pueden conducir a conclusiones que son sistemáticamente diferentes de la verdad o incorrectas acerca de los objetivos de una investigación, para ajustar este parámetro a los datos ya recolectados se calcula como coeficiente de asimetría. Esta función caracteriza el grado de asimetría de una distribución con respecto a su media. La asimetría positiva indica una distribución unilateral que se extiende hacia valores más positivos. La asimetría negativa indica una distribución unilateral que se extiende hacia valores más negativos.

4.2.4 Curtosis:

La curtosis caracteriza la elevación o el achatamiento relativo de una distribución, comparada con la distribución normal. Una curtosis positiva indica una distribución relativamente elevada, mientras que una curtosis negativa indica una distribución relativamente plana, en otras palabras, la curtosis es una medida de lo "picudo"(concentrada en torno a la media) de la distribución de probabilidad de una variable aleatoria de número real. Una mayor curtosis implica que la mayor parte de la varianza es debida a desviaciones infrecuentes en los extremos, que se oponen a desviaciones comunes de medidas menos pronunciadas.

4.2.5 Mediana:

La mediana es el número que se encuentra en medio de un conjunto de números, es el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después que él, una vez ordenados estos. De acuerdo con esta definición el conjunto de datos menores o iguales que la mediana representarán el 50% de los datos, y los que sean mayores que la mediana representarán el otro 50% del total de datos de la muestra.

4.2.6 Moda:

Es el valor que se repite con más frecuencia en una matriz o rango de datos.

4.2.7 Media Armónica:

La media armónica de una cantidad finita de números es igual al recíproco, o inverso, de la media aritmética de los recíprocos de dichos números, la media armónica resulta poco influenciada por la existencia de determinados valores mucho más grandes que el conjunto de los otros, siendo en cambio sensible a

valores mucho más pequeños que el conjunto, la media armónica no está definida en el caso de la existencia en el conjunto de valores nulos.

4.2.8 Media Geométrica:

Es la raíz n -ésima del producto de todos los números, sólo es válida si todos los números son positivos. Si uno de ellos es 0, entonces el resultado es 0. Si hay un número negativo (o una cantidad impar de ellos) entonces la media geométrica es, o bien negativa o bien inexistente en los números reales.

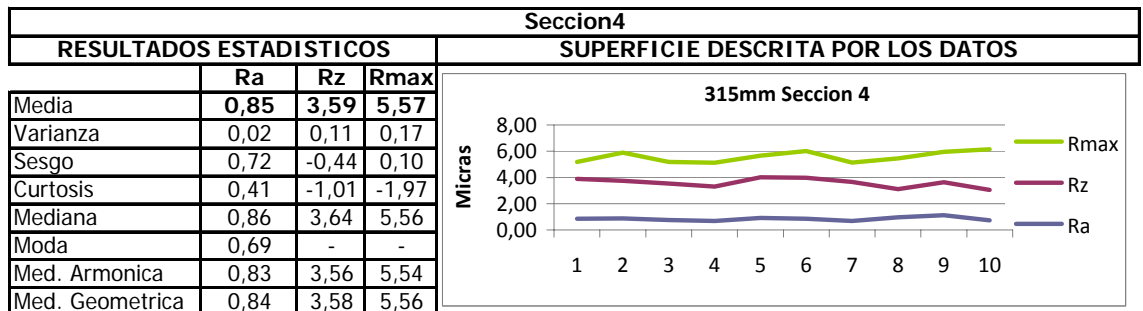
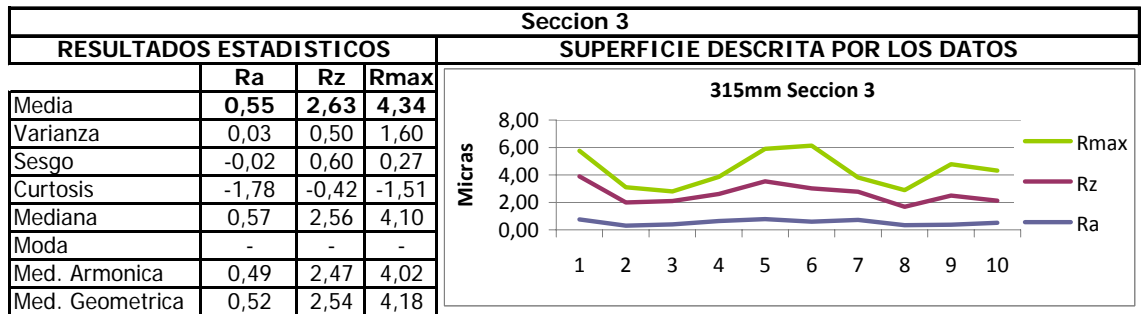
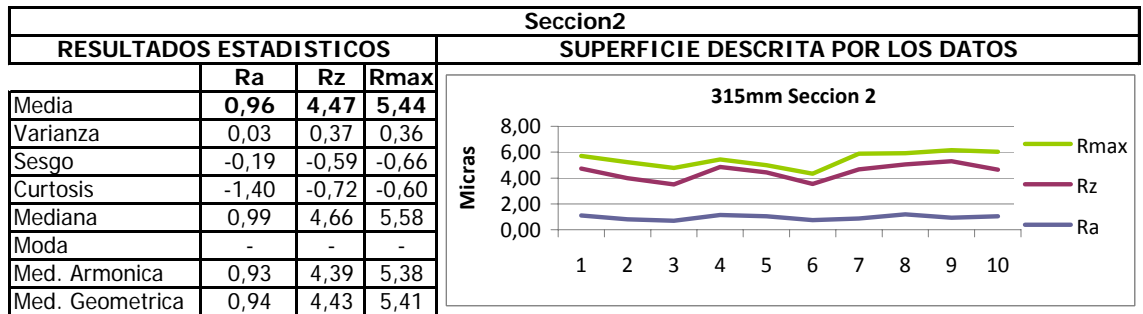
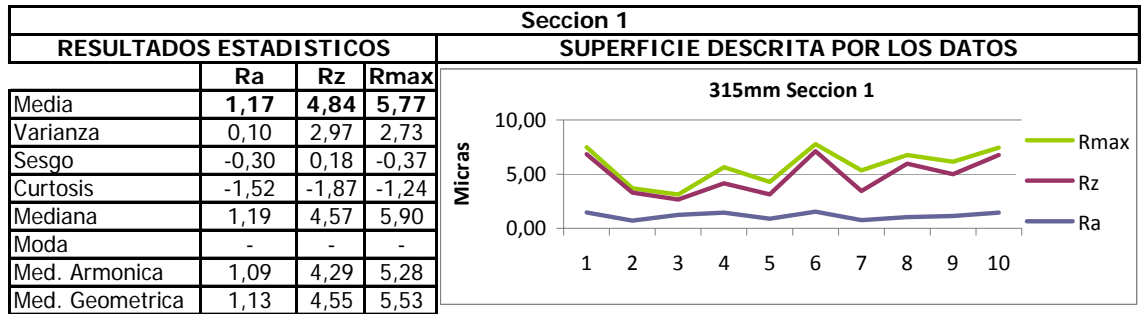
En muchas ocasiones se utiliza su transformación en el manejo estadístico de variables con distribución no normal, la media geométrica es relevante cuando varias cantidades son multiplicadas para producir un total.

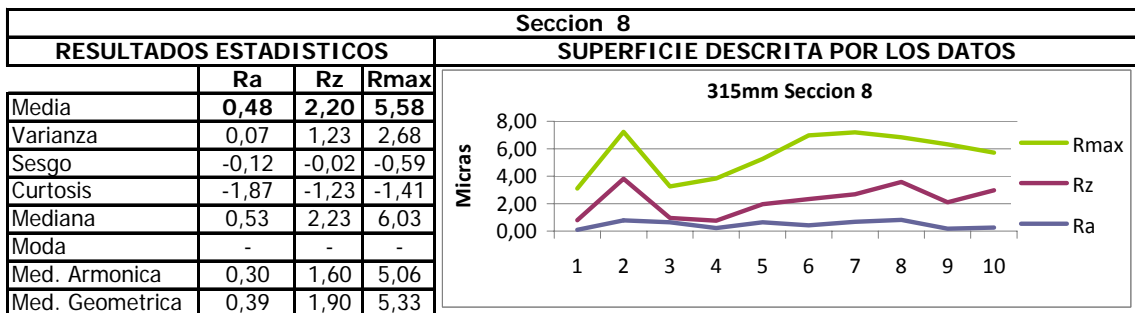
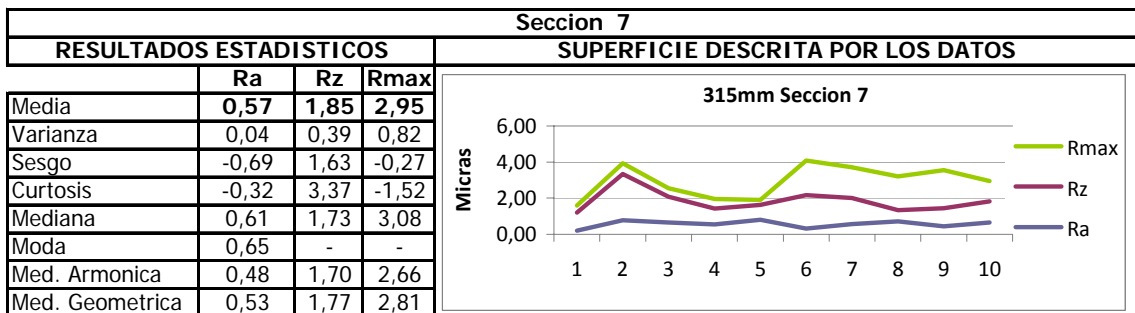
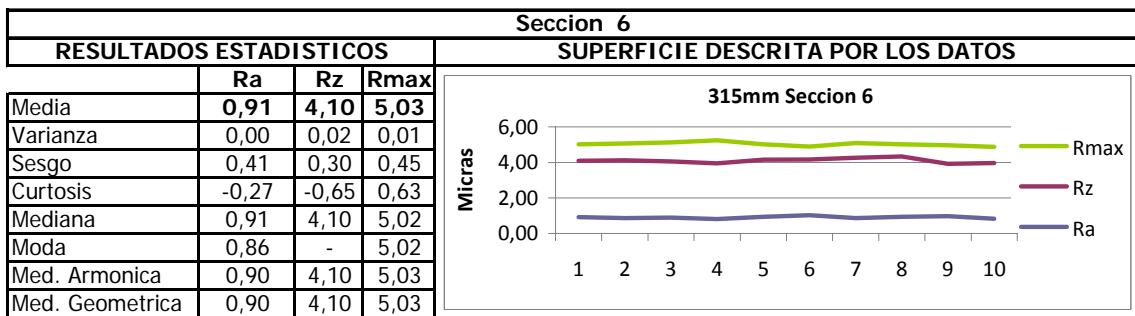
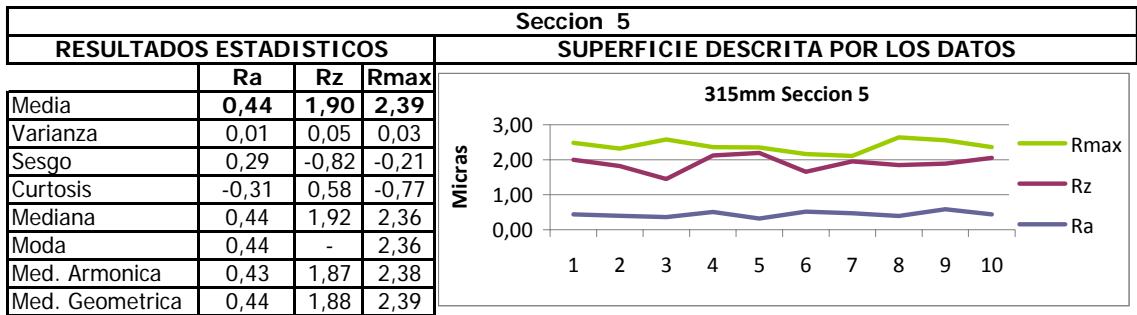
Estos son los estadísticos utilizados en la interpretación de datos, de los cuales se implementara la media aritmética o promedio como parámetro principal para la estimación del K_s debido a que es el valor que interpreta de manera más precisa y menos procesada los valores leídos por el instrumento, los indicadores como varianza, y en menor medida la curtosis pueden ser de gran utilidad indicando la irregularidad de una sección, proporcionando así información acerca de su heterogeneidad, o dando en evidencia que la muestra cuenta con franjas de rugosidad variada en su superficie, así entonces mostrara unos valores de graficas específicos de la función, estos valores y sus respectivas ilustraciones se describirán más adelante en la fase de interpretación de datos.

4.3 DATOS ESTADISTICOS Y GRAFICOS

Las graficas corresponden a los valores de lectura del equipo en el laboratorio

Tabla 4.3.1 DIAMETRO 315 mm

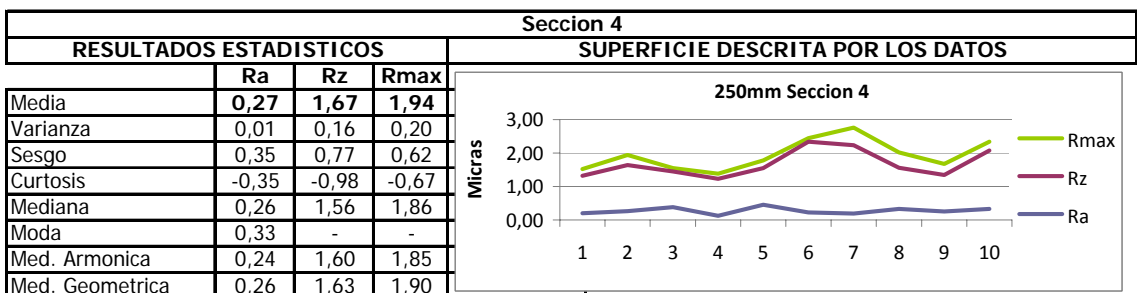
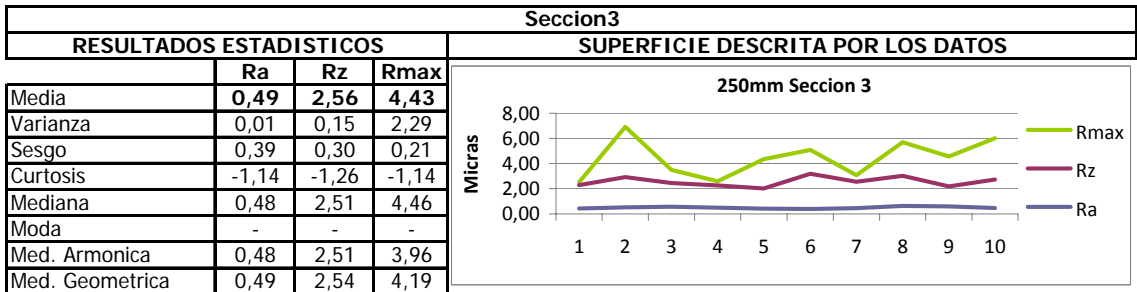
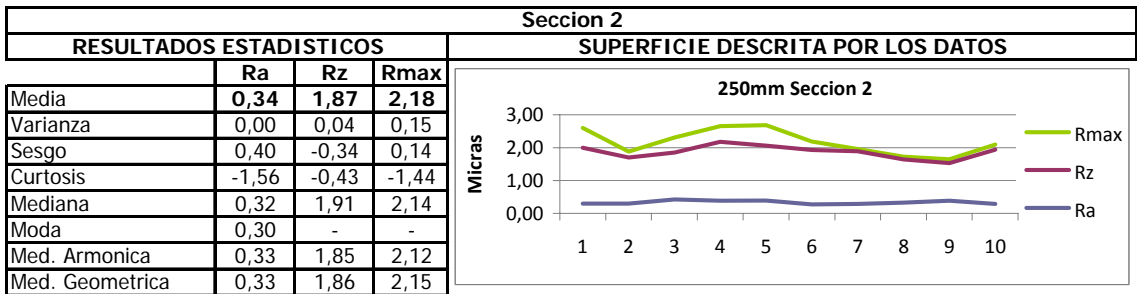
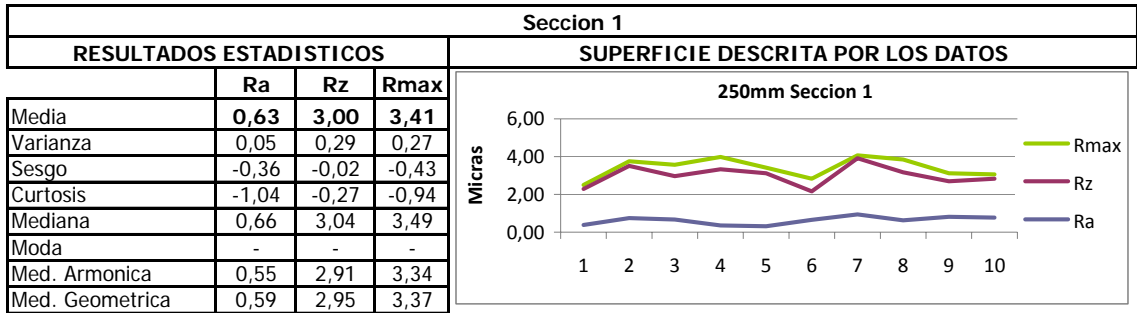


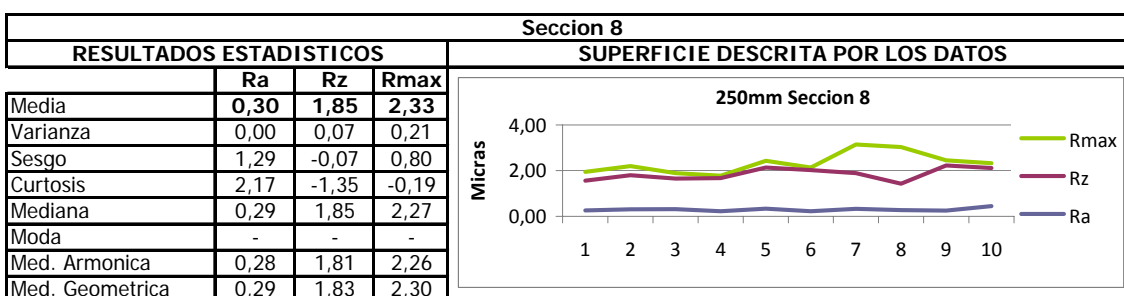
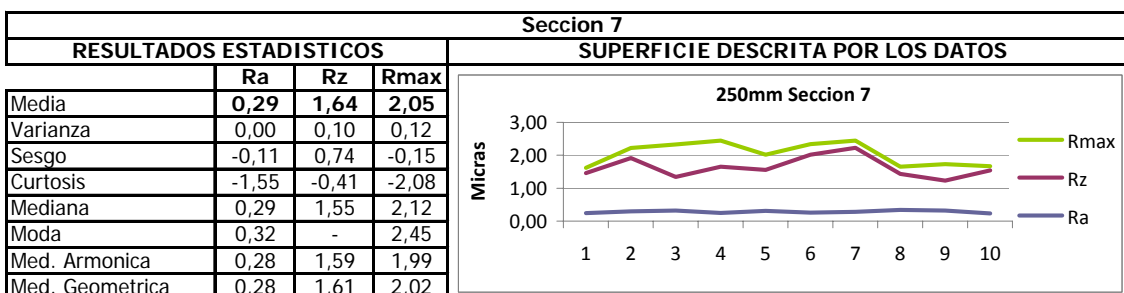
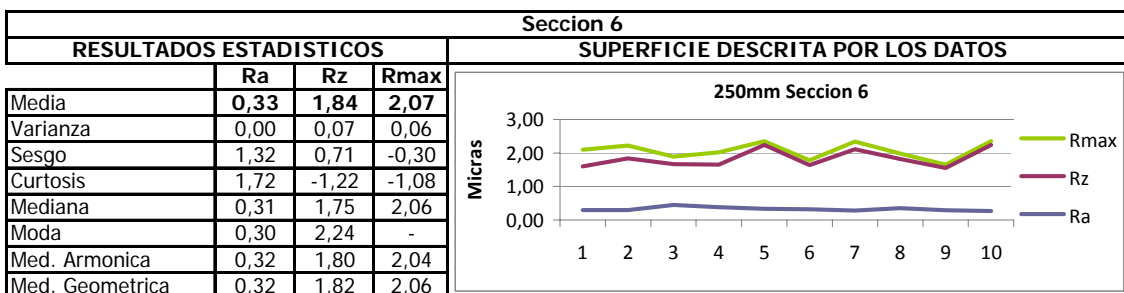
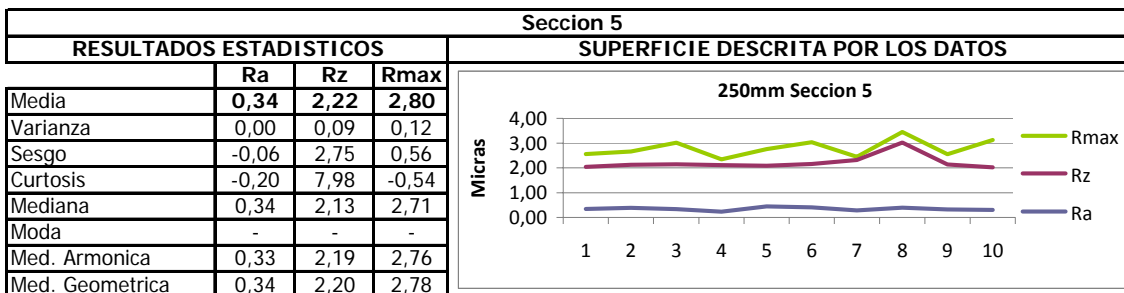


Ks= PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

Ks= 0,74 um

Tabla 4.3.2 DIAMETRO 250 mm

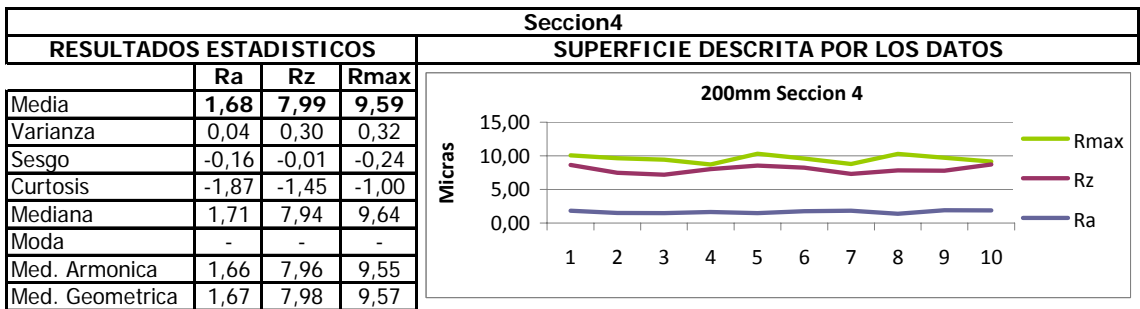
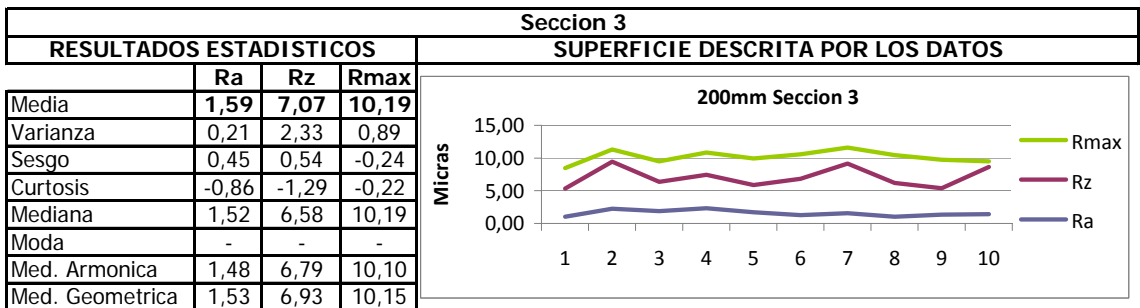
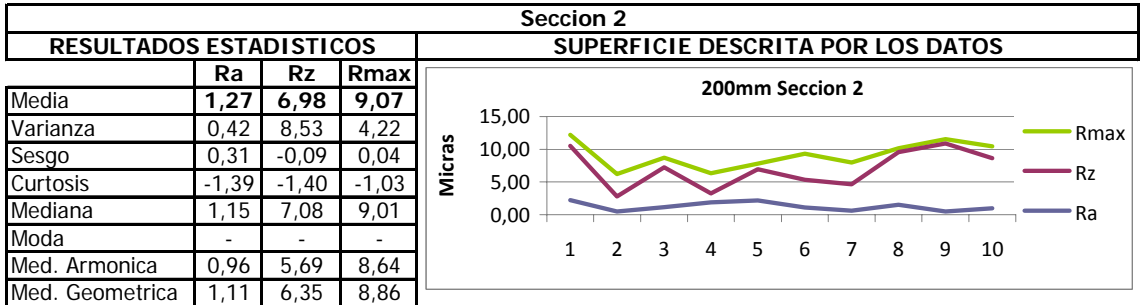
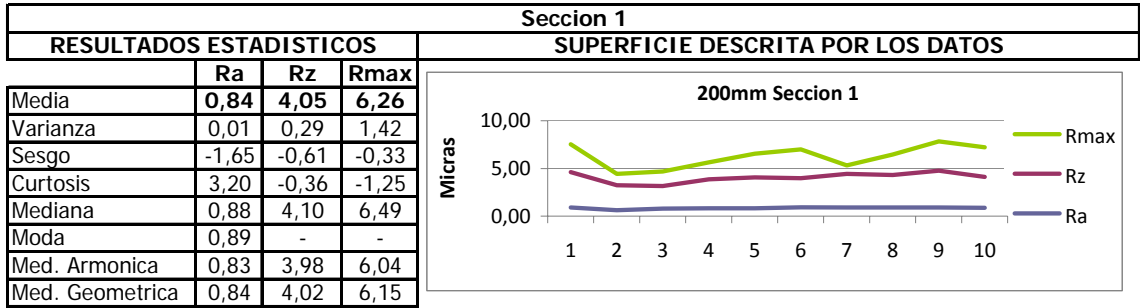


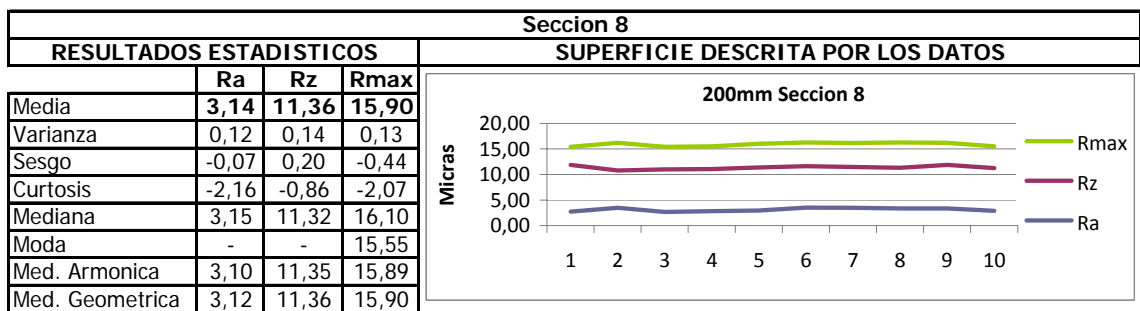
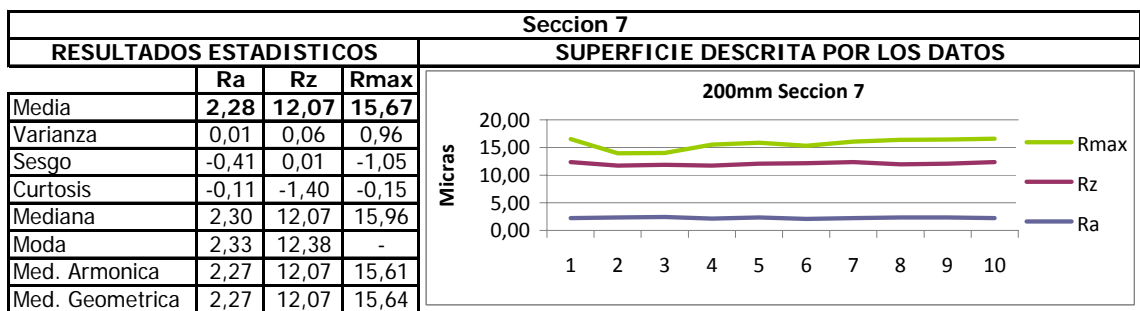
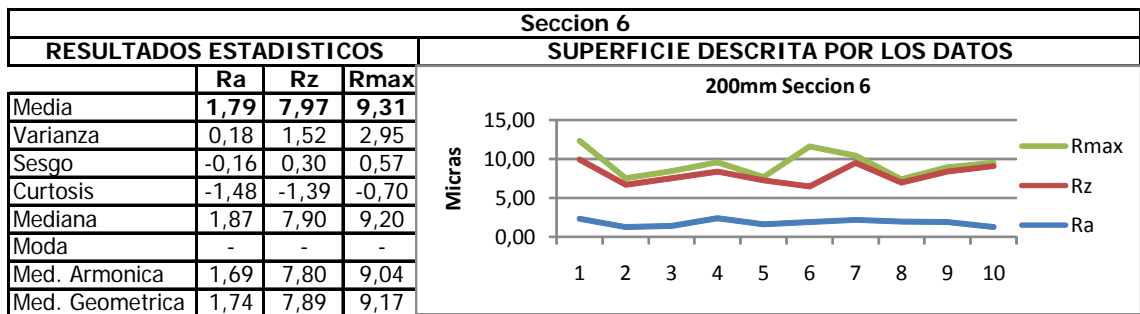
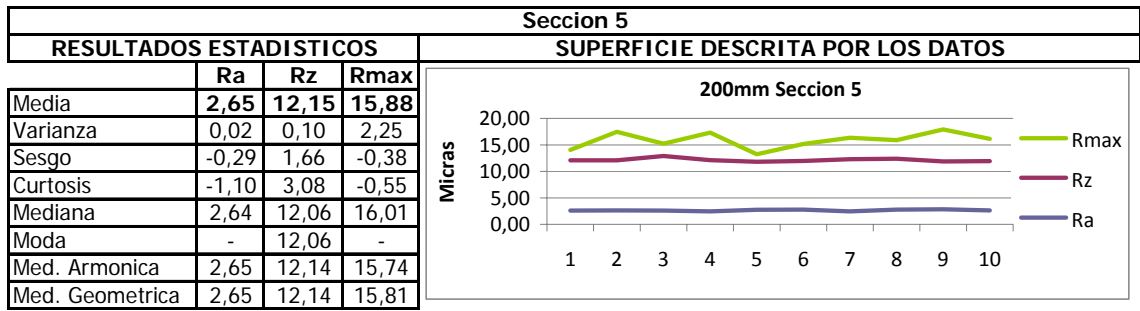


Ks= PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

KS= 0,37 um

Tabla 4.3.3 DIAMETRO 200mm

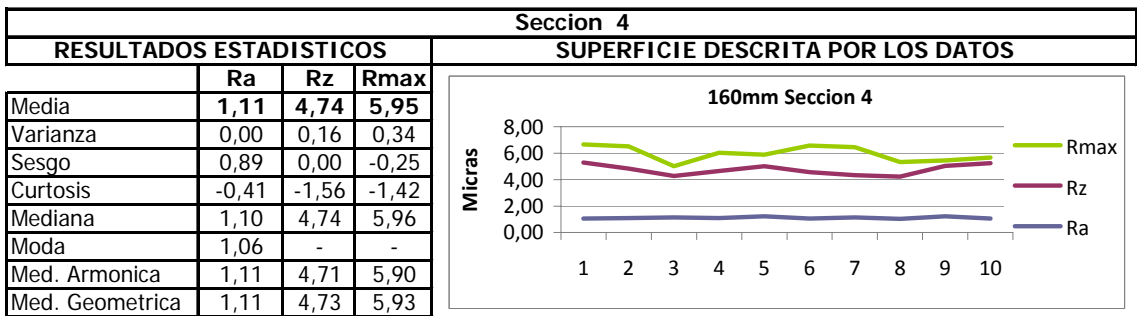
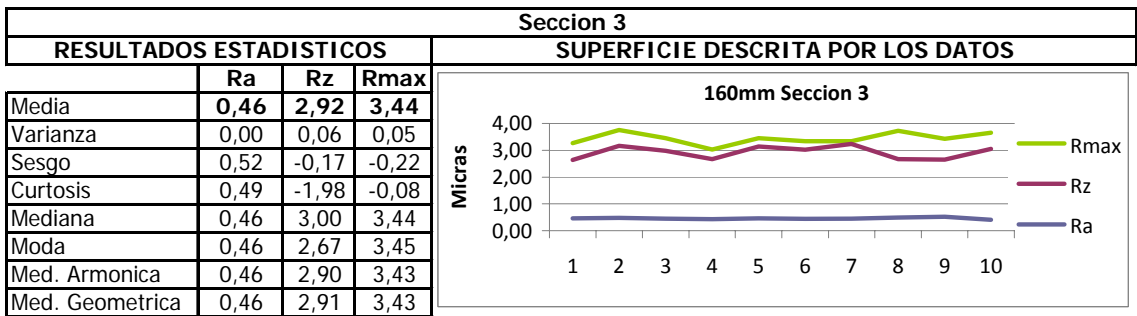
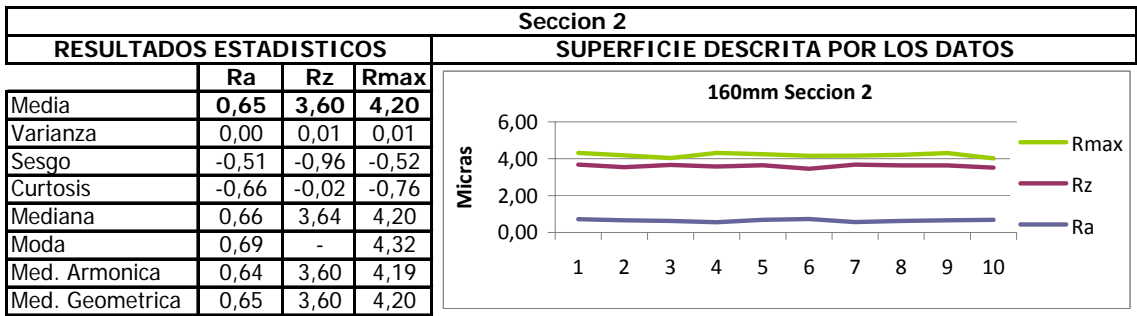
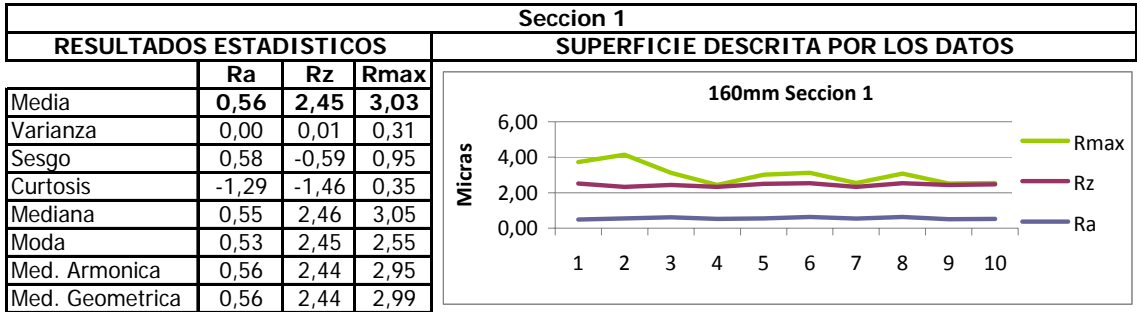


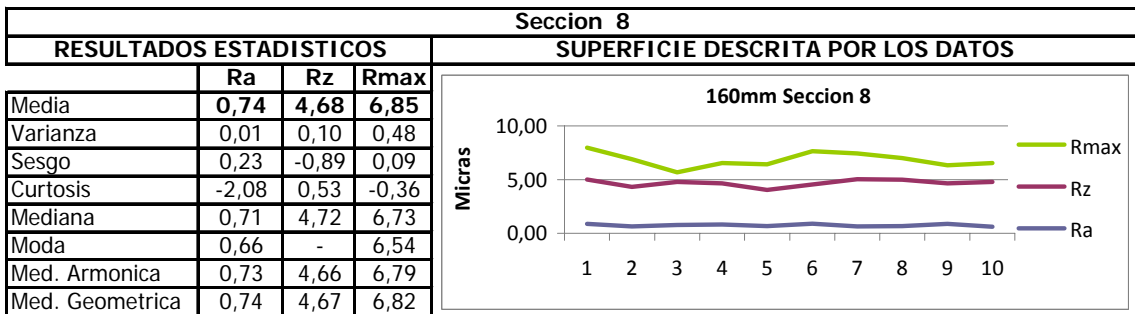
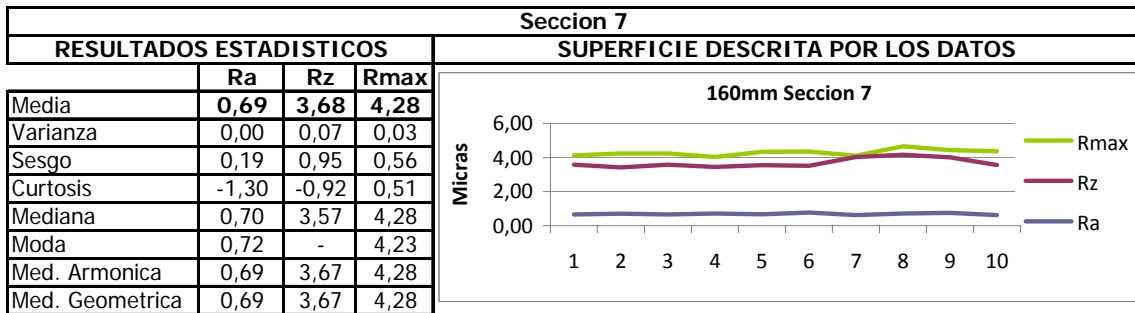
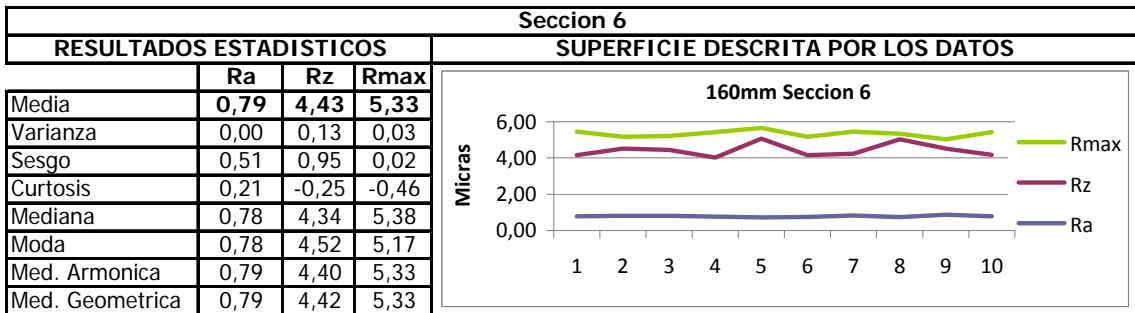
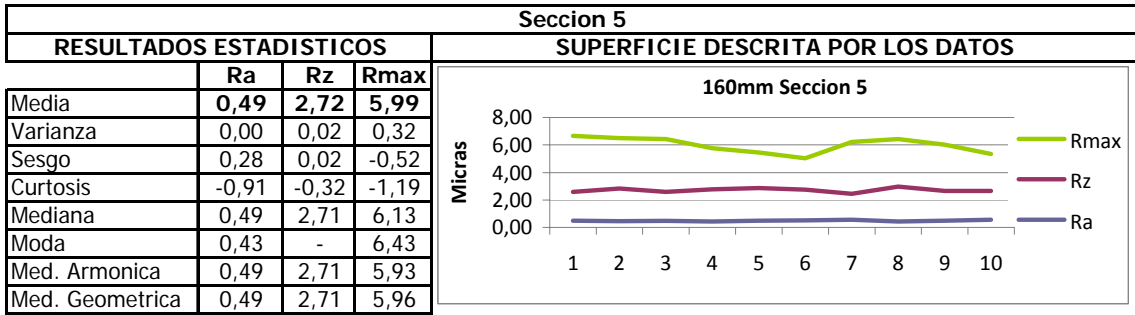


Ks= PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
 PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

Ks= 1,90 um

Tabla 4.3.4 DIAMETRO 160 mm

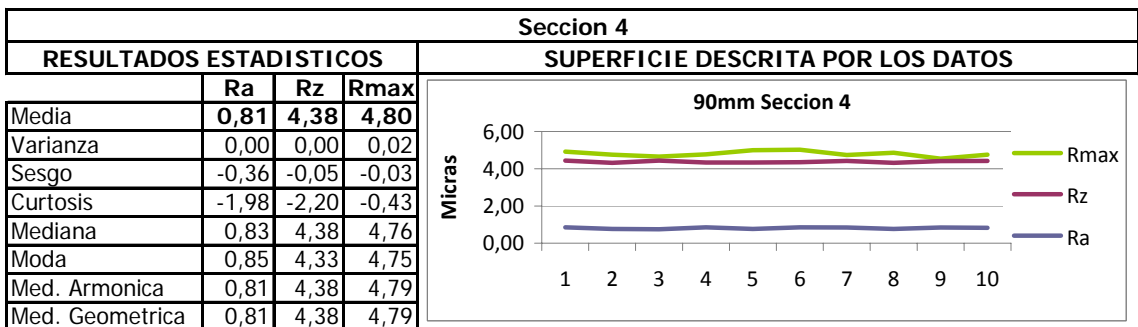
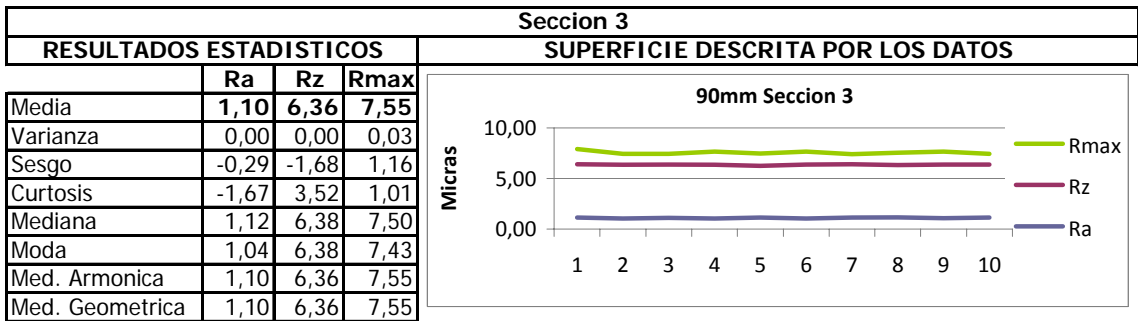
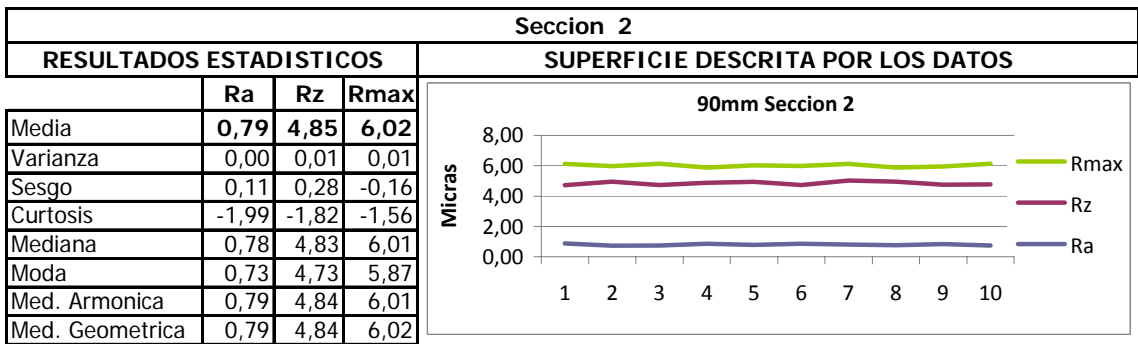
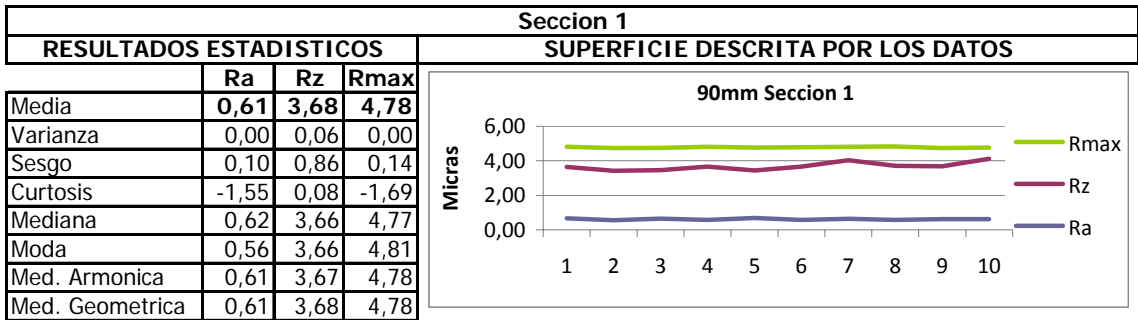




$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

$K_s = 0,69$ um

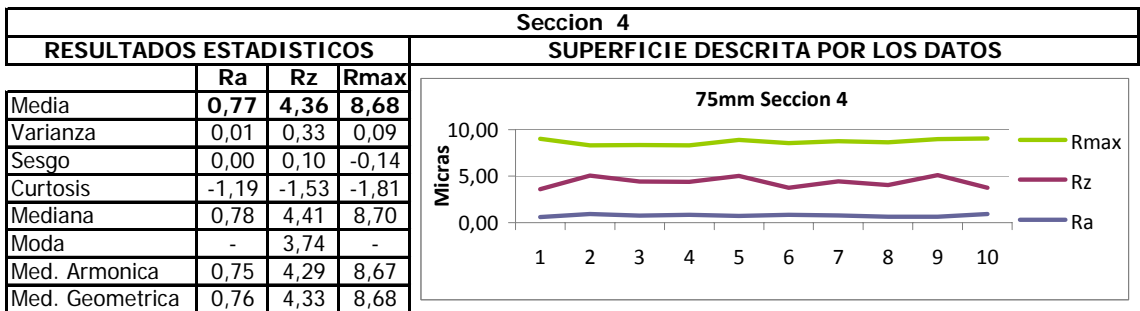
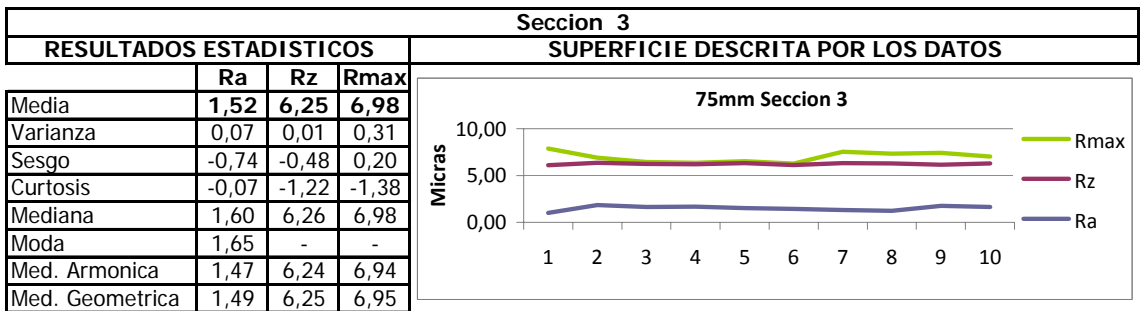
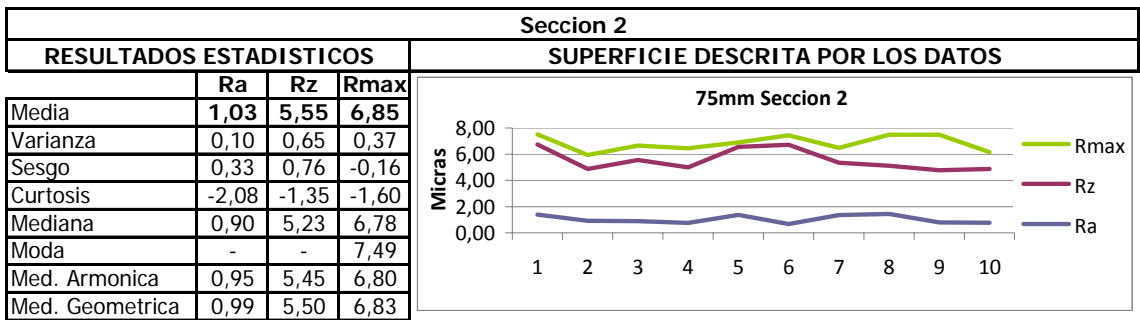
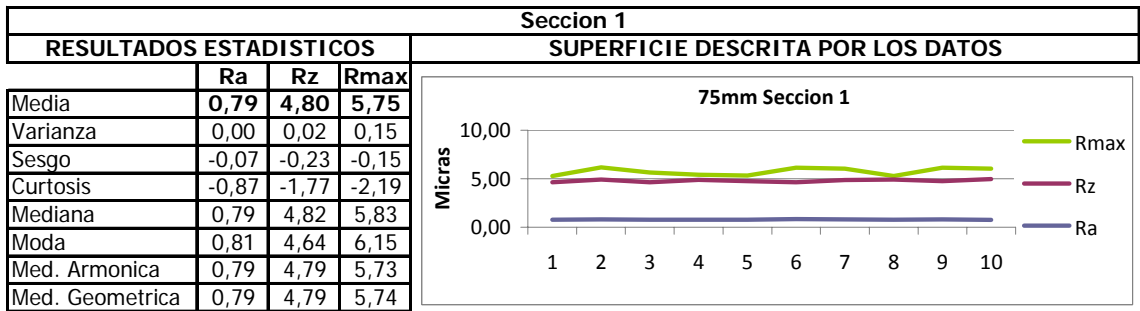
Tabla 4.3.5 DIAMETRO 90 mm



PROMEDIO DE LOS VALORES DE
 Ks= MEDIA PARA Ra DE TODAS LAS
 SECCIONES

Ks= 0,83 um

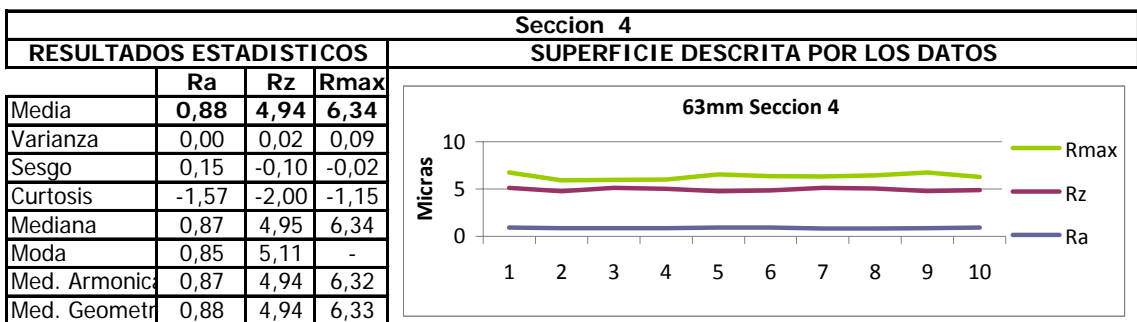
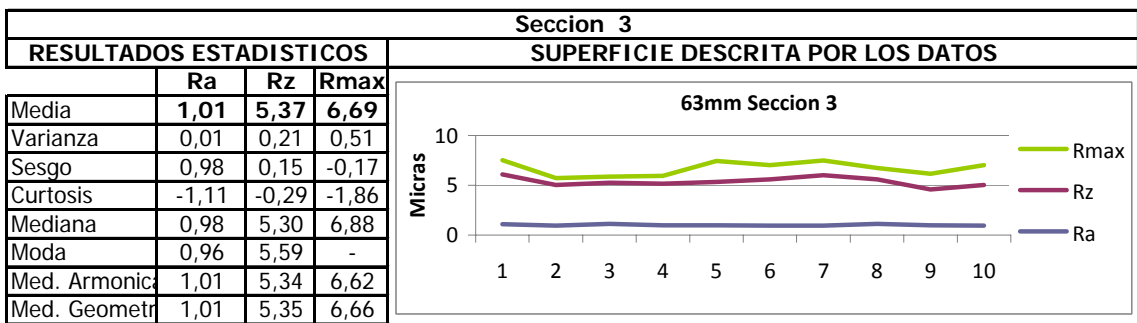
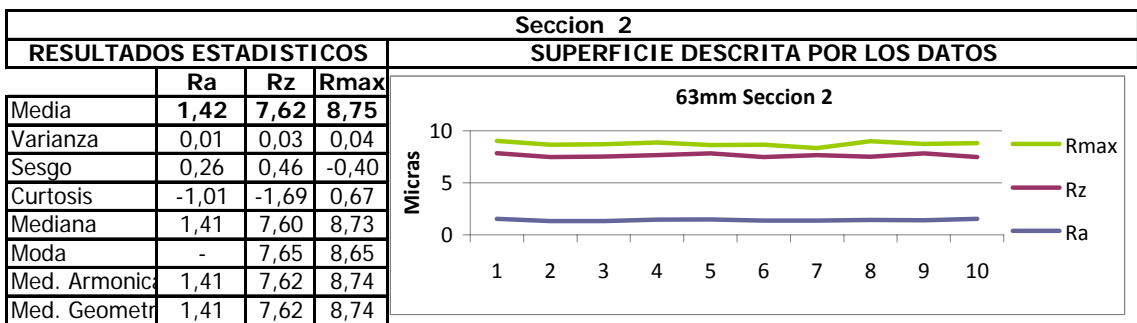
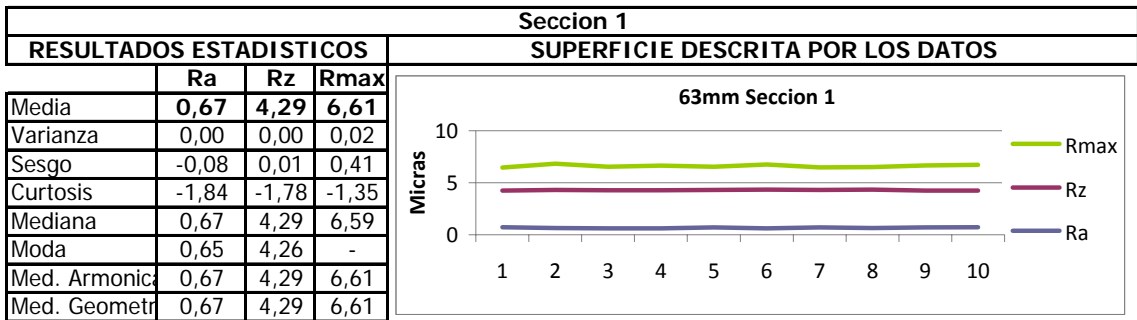
Tabla 4.3.6 DIAMETRO 75 mm



Ks= PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
 PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

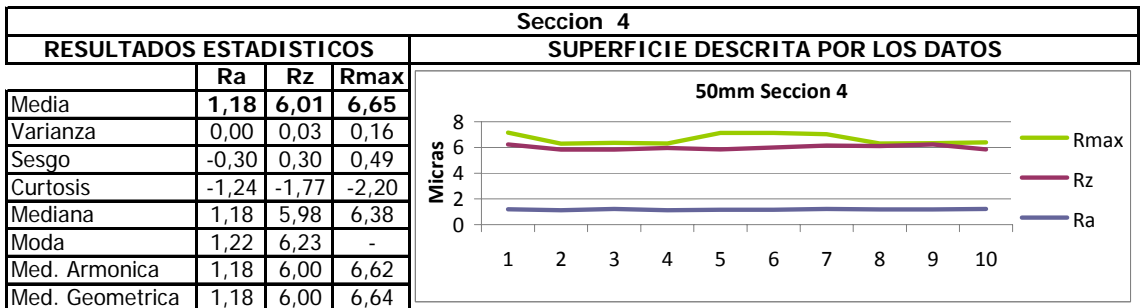
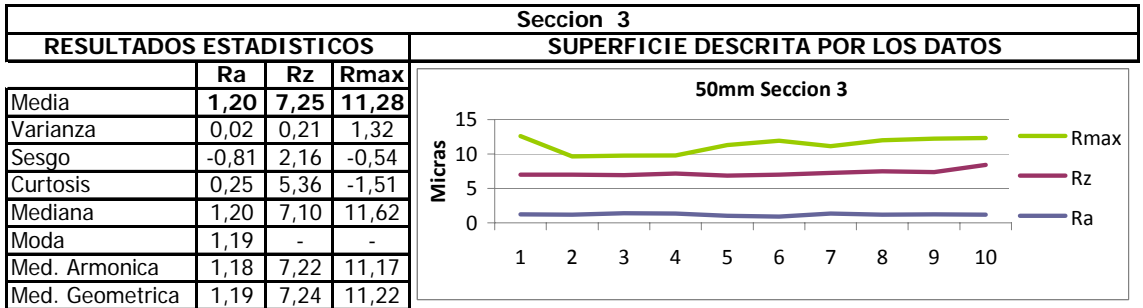
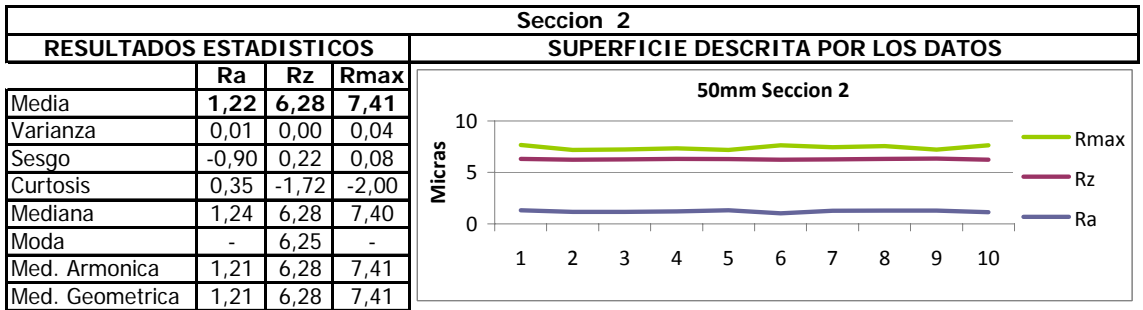
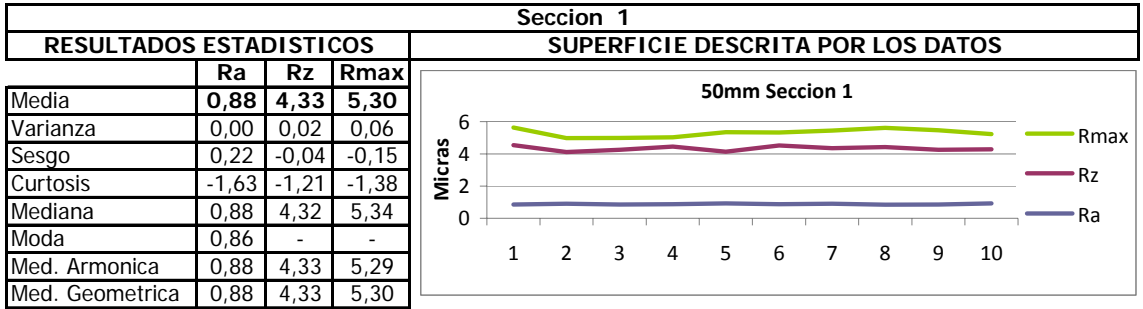
Ks= 1,03 um

Tabla 4.3.7 DIAMETRO 63mm



Ks= PROMEDIO DE LOS VALORES DE
 MEDIA PARA Ra DE TODAS LAS
Ks= 0,80 um

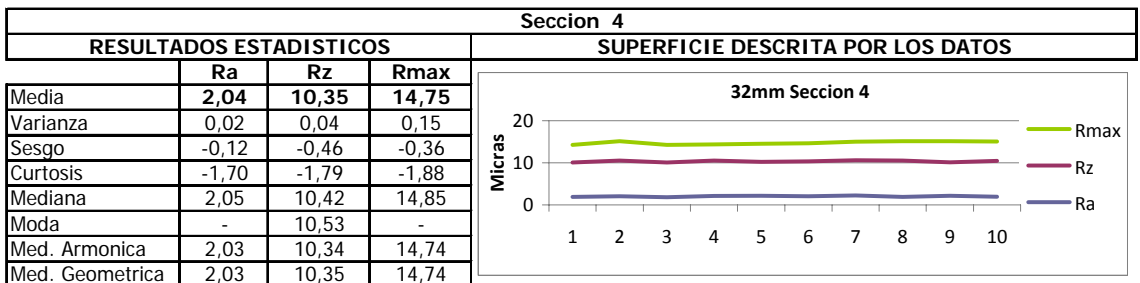
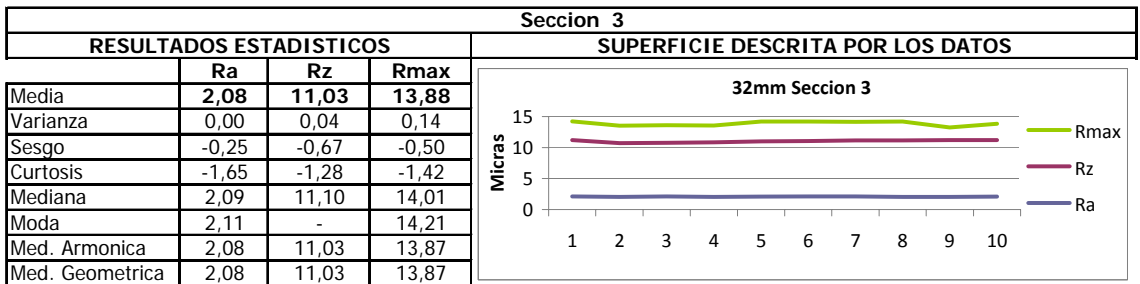
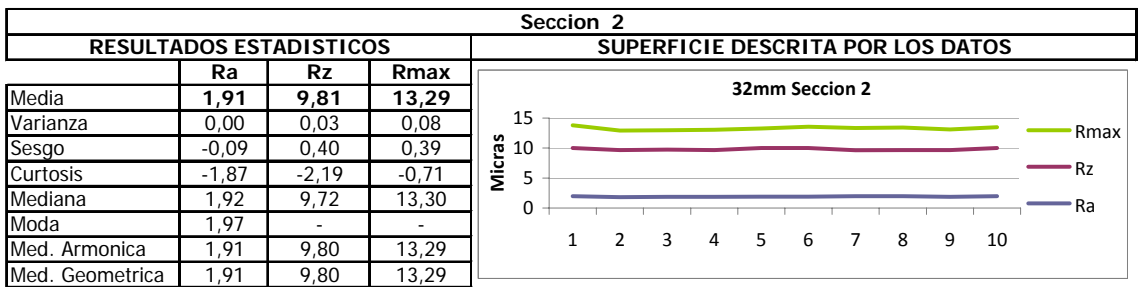
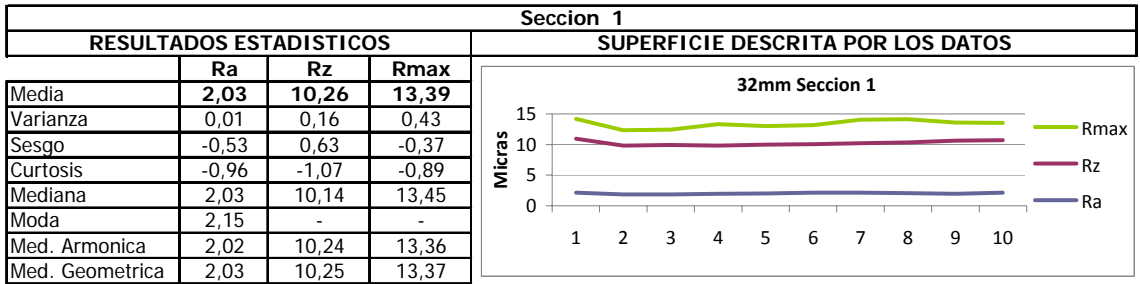
Tabla 4.3.8 DIAMETRO 50 mm



$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

$K_s = 1,12 \text{ um}$

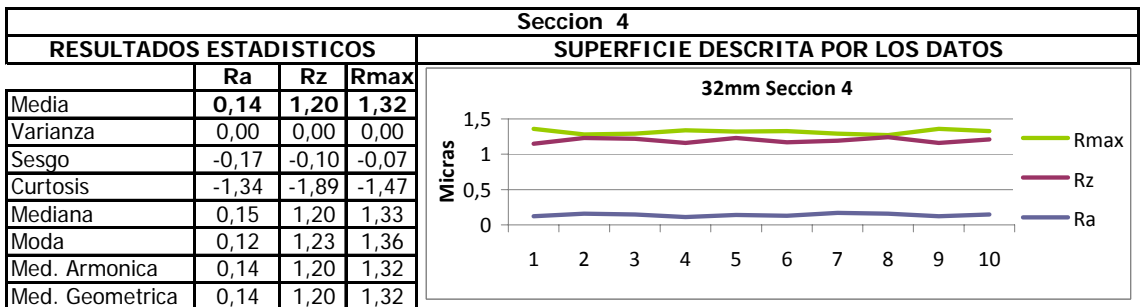
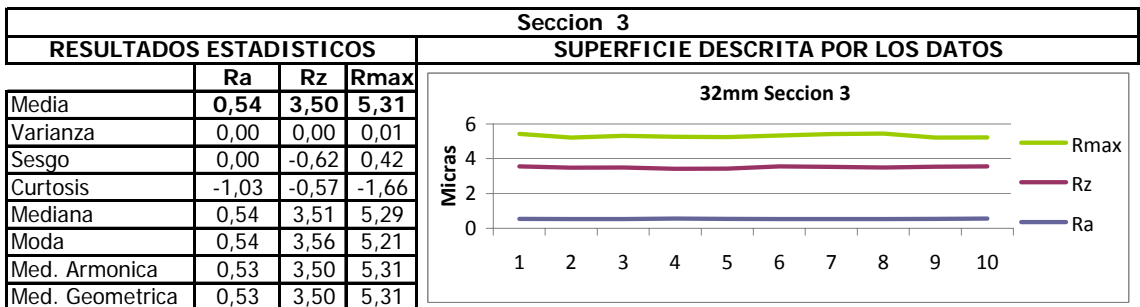
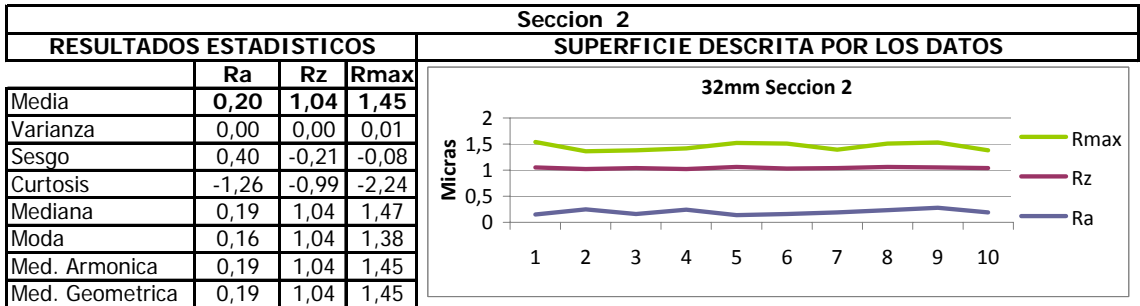
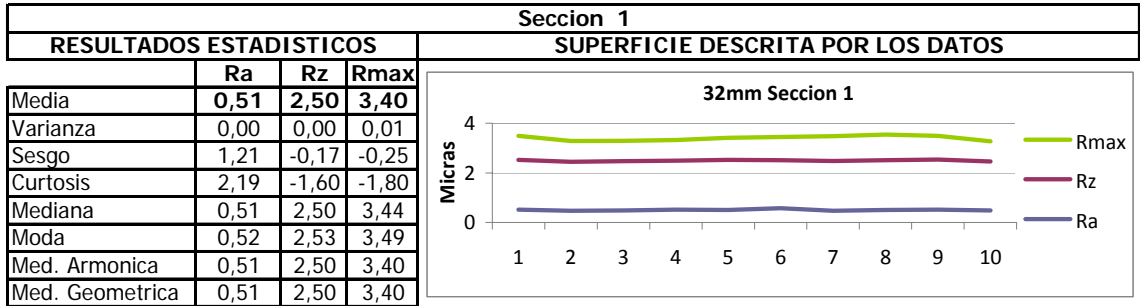
Tabla 4.3.9 DIAMETRO 32 mm PE80



$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

$k_s = 2,02 \text{ um}$

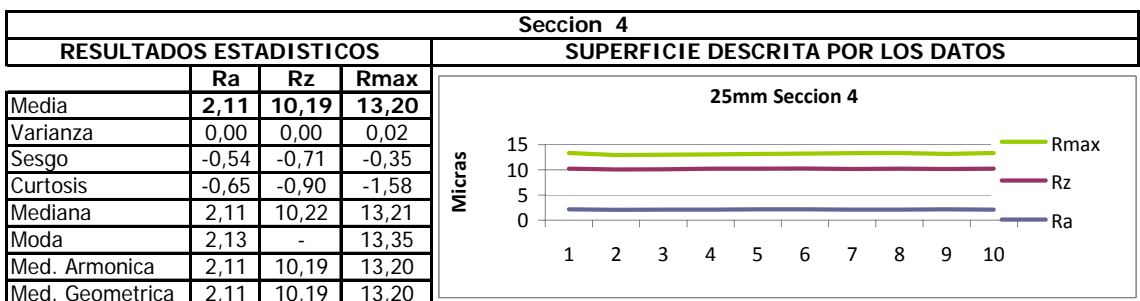
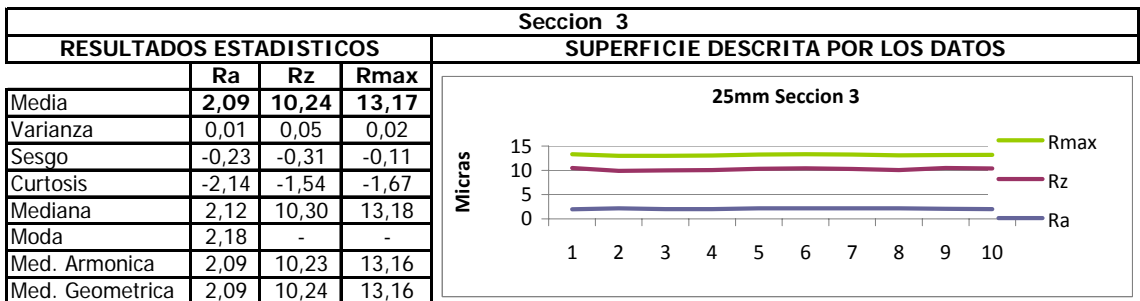
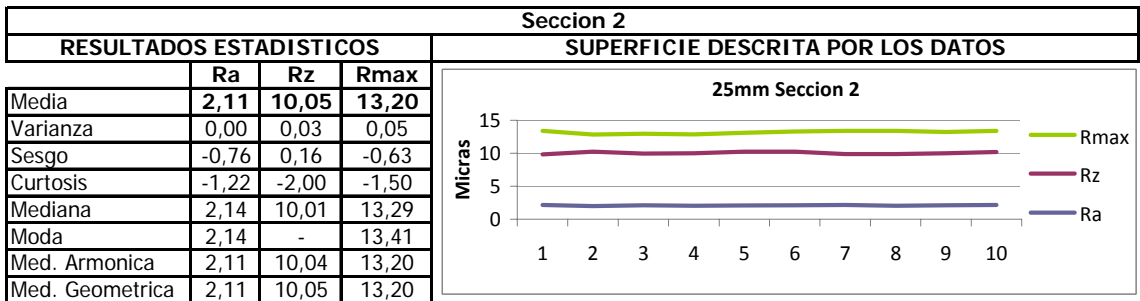
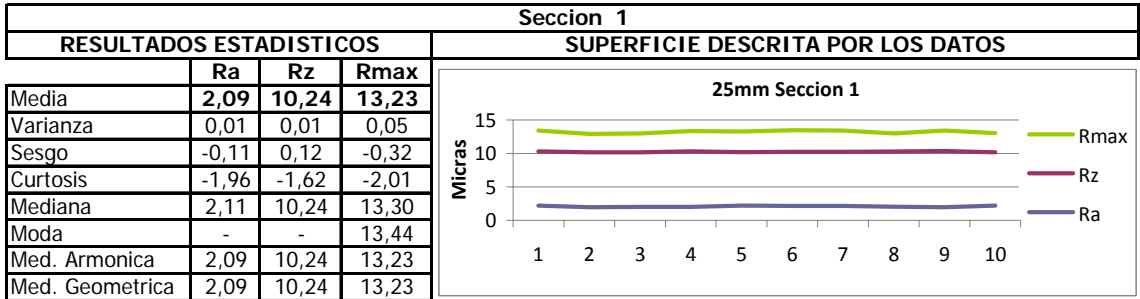
Tabla 4.3.10 DIAMETRO 32 mm PE40



$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

$K_s = 0,35$ um

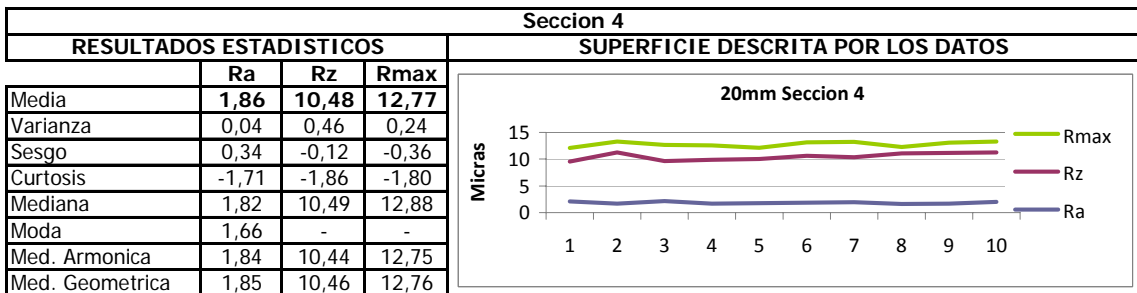
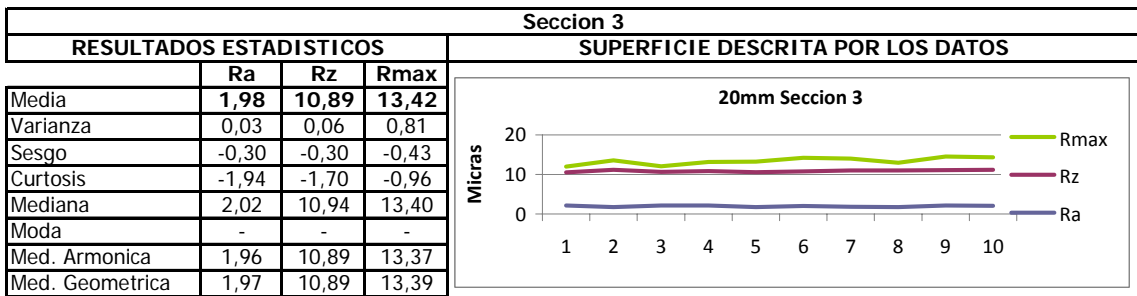
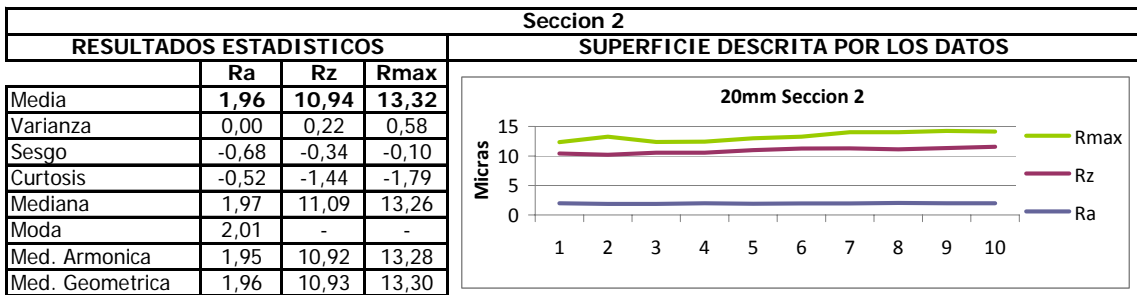
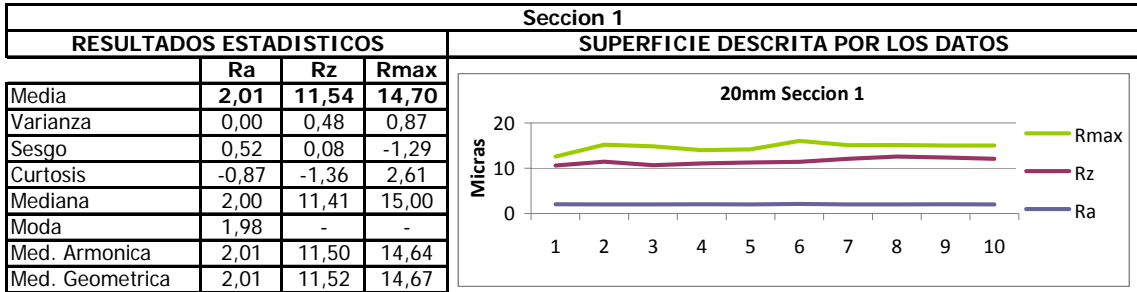
Tabla 4.3.11 DIAMETRO 25 mm



$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

$K_s = 2,10 \text{ um}$

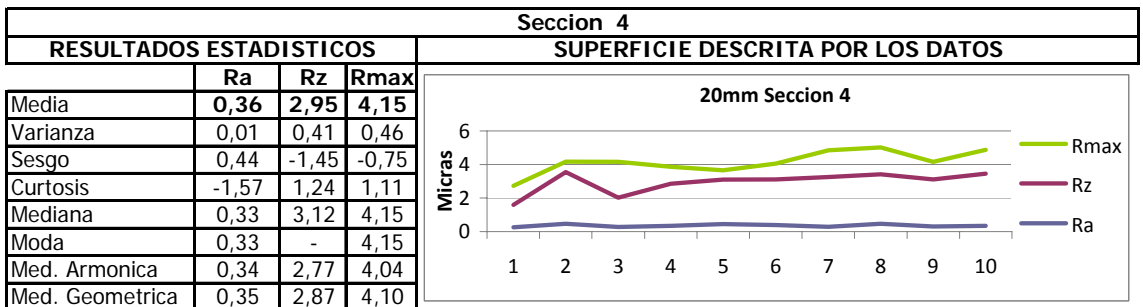
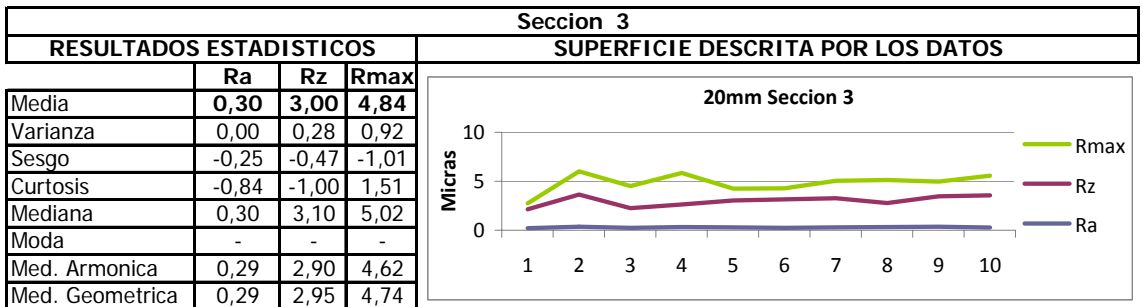
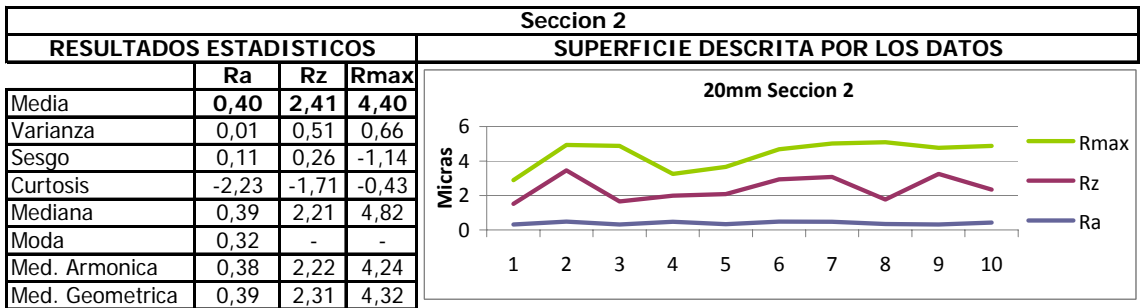
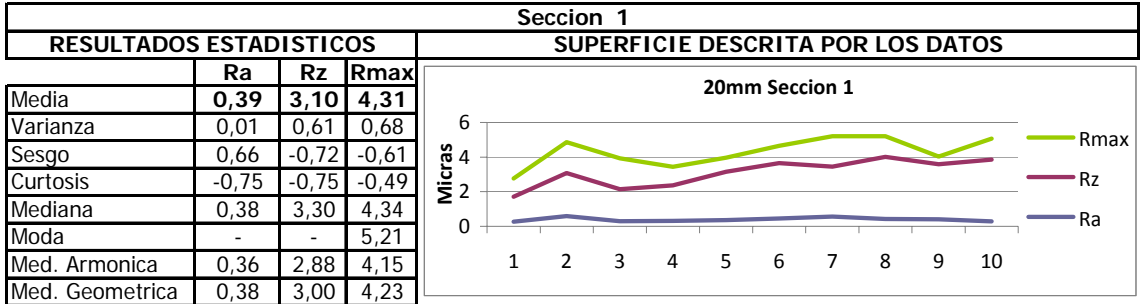
Tabla 4.3.12 DIAMETRO 20mm PE80



$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA PARA Ra
DE TODAS LAS SECCIONES

$K_s = 1,95$ um

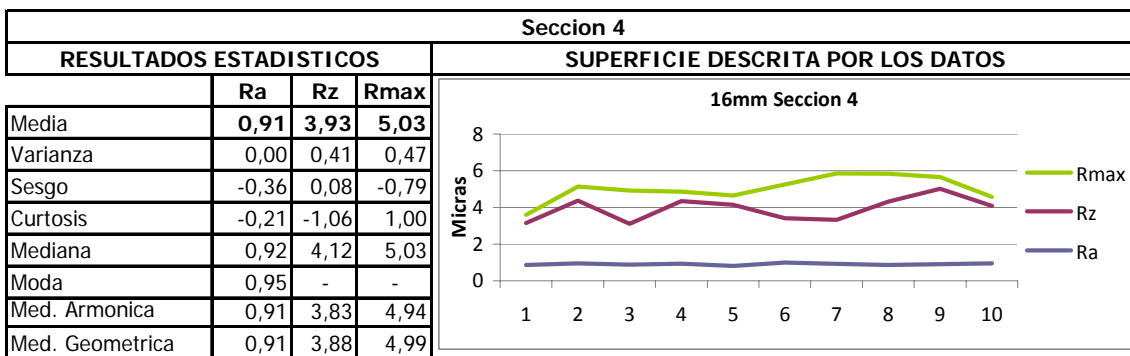
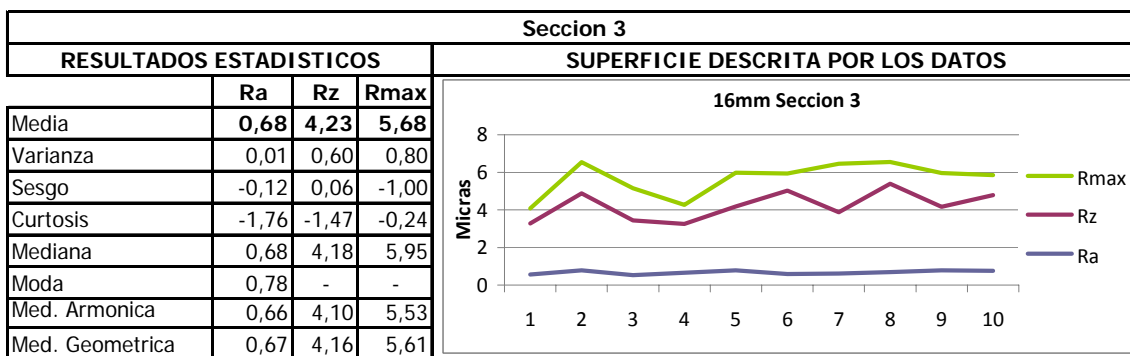
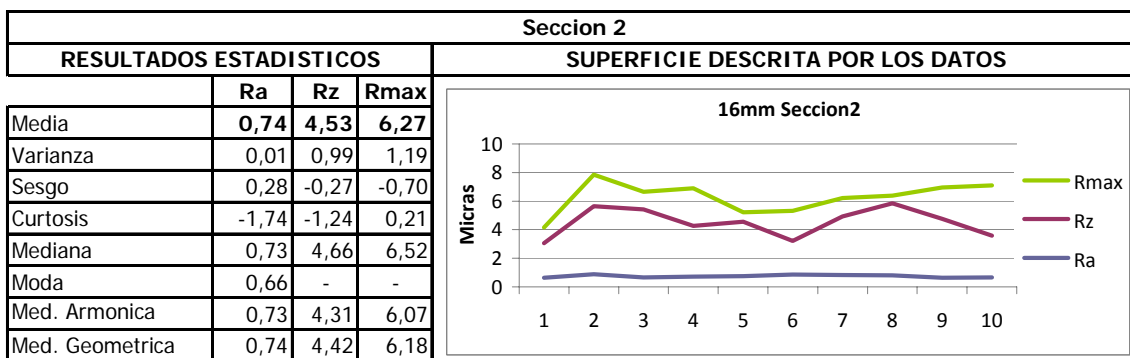
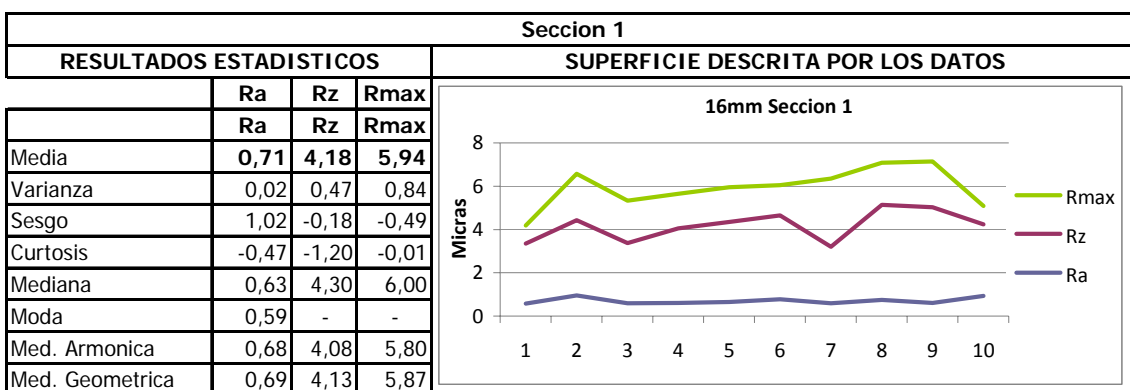
Tabla 4.3.13 DIAMETRO 20mm PE40



$K_s =$ PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

$K_s = 0,36$ um

Tabla 4.3.14 DIAMETRO 16 mm



Ks= PROMEDIO DE LOS VALORES DE MEDIA
PARA Ra DE TODAS LAS SECCIONES

Ks= 0,76 um

4.4 DETERMINACION DE LOS FACTORES DE RESISTENCIA HIDRAULICA

4.4.1 FACTOR DE FRICCION f

Para cada uno de los casos, se procede a hallar de manera grafica el factor de fricción para cada diámetro.

En un diagrama de Moody se relaciono la rugosidad relativa K_s/D de cada prueba con respecto al número de Reynolds; para todos los diámetros se tomo un valor Re representativo del régimen de flujo turbulento. ($Re=1e8$)

Tabla 4.4.1

| DIAMETRO (mm) | K_s (um) | K_s/D |
|---------------|------------|----------|
| 16 | 0,76 | 0,00005 |
| 20 | 0,36 | 0,000018 |
| 20 | 1,95 | 0,00010 |
| 25 | 2,1 | 0,000084 |
| 32 | 0,31 | 0,000010 |
| 32 | 0,35 | 0,000011 |
| 32 | 2,02 | 0,000063 |
| 50 | 1,12 | 0,000022 |
| 63 | 0,8 | 0,000013 |
| 75 | 1,03 | 0,000014 |
| 90 | 0,83 | 0,000009 |
| 160 | 0,69 | 0,000004 |
| 200 | 1,9 | 0,000010 |
| 250 | 0,37 | 0,000001 |
| 315 | 0,74 | 0,000002 |

4.4.2 COEFICIENTES C DE CHEZY y n DE MANNING

Para analizar la ecuación de Chezy, sus hipótesis y su valides, debe establecerse una analogía con el flujo en tuberías.

Igualando la expresión de Darcy con la formula de Chezy y tomando $D=4R|$ como surge de la definición de radio hidráulico para tuberías circulares se obtiene que:

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \quad (11)$$

Haciendo una comparación de las ecuaciones de resistencia, es fácil mostrar la relación existente entre ellas.

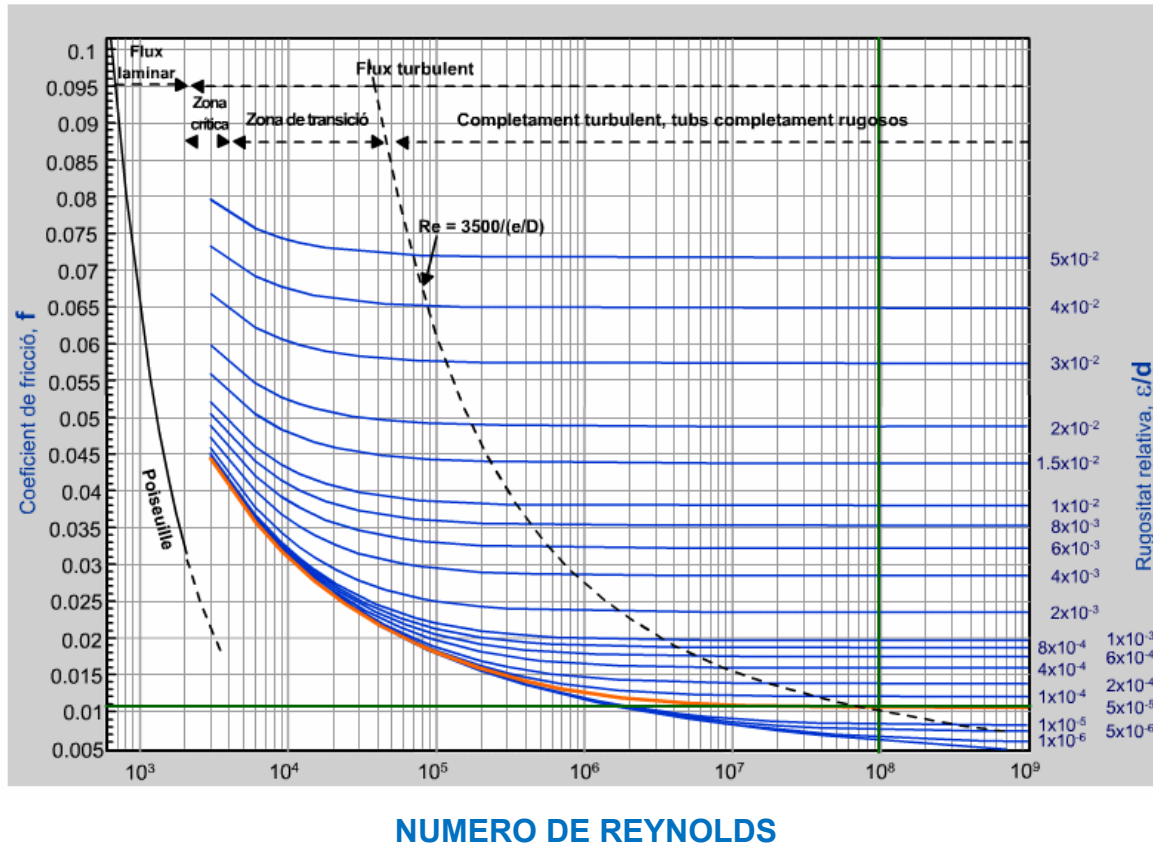
$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} = \frac{RH^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (12)$$

$$n = \frac{RH^{\frac{1}{6}}}{C} \quad (13)$$

A continuación se presentan el diagrama de Moody para los diámetros analizados. Y los valores de C y n correspondientes.

DIAMETRO 16mm

DIAGRAMA DE MOODY



RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

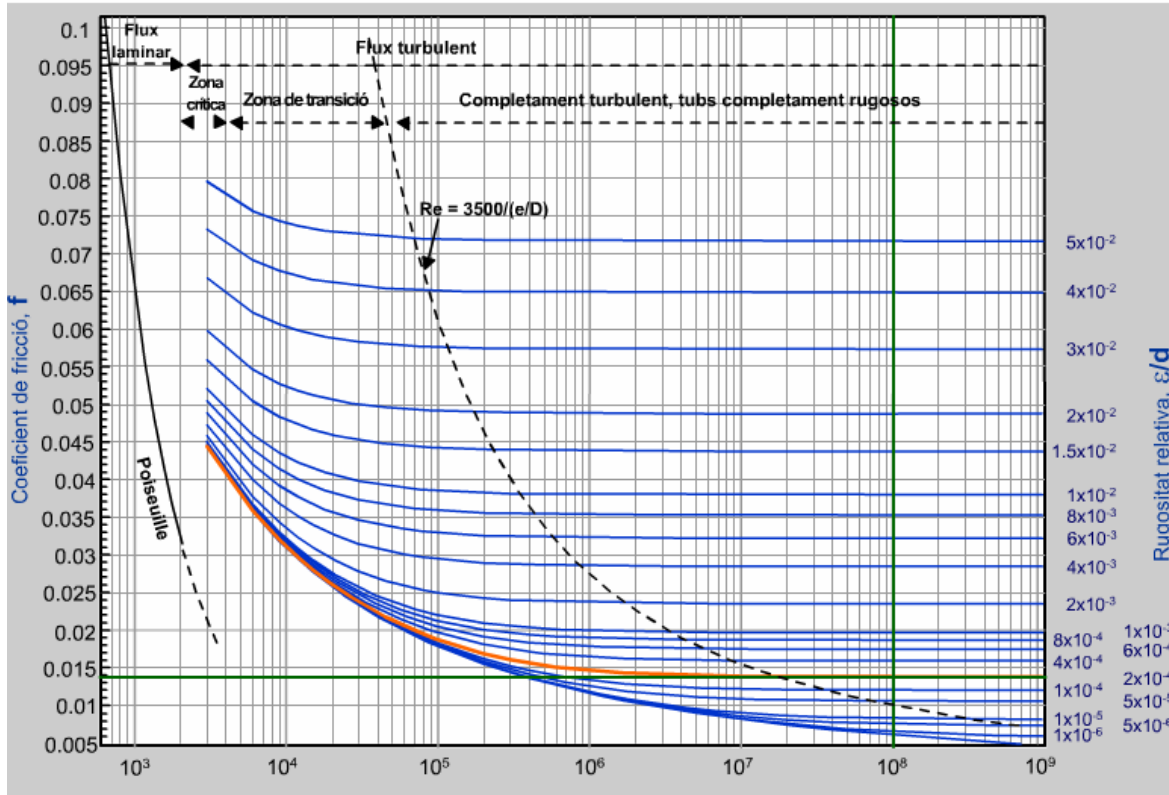
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|---------|-------|----|-------|-------|
| 0,76 | 0,00005 | 0,011 | 4 | 84,47 | 0,015 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 20 mmPE40

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

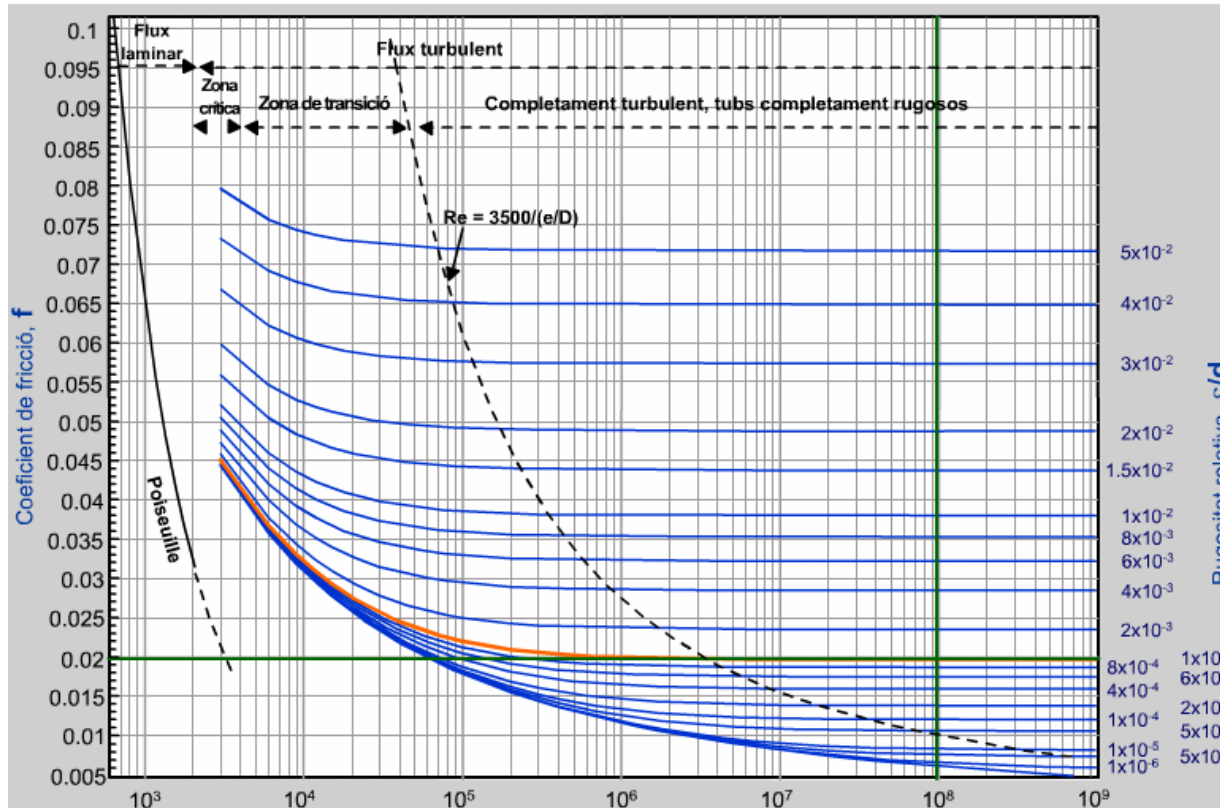
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|----|-------|-------|
| 0,36 | 0,000018 | 0,014 | 5 | 74,87 | 0,017 |

$K_s =$ valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 20 mm PE80

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

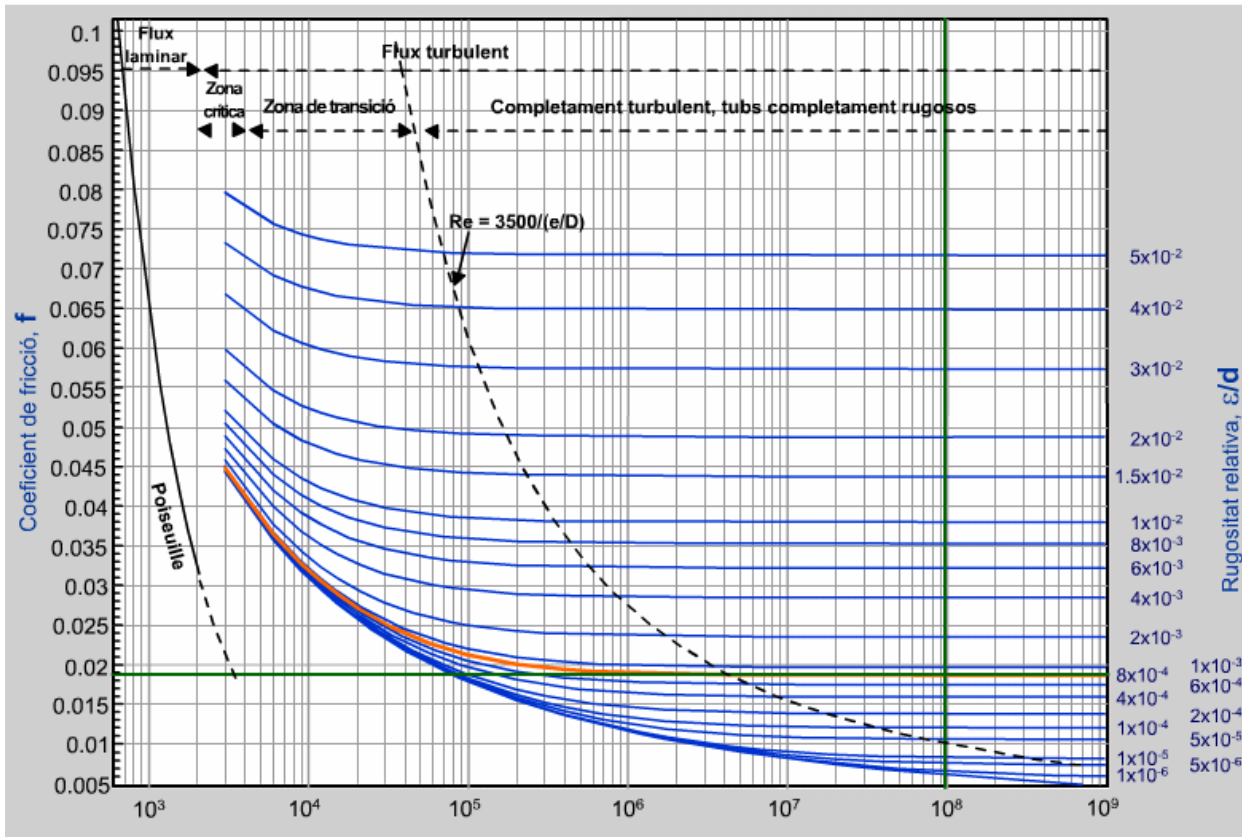
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|------|----|-------|-------|
| 1,95 | 9,75E-05 | 0,02 | 5 | 62,64 | 0,021 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 25mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

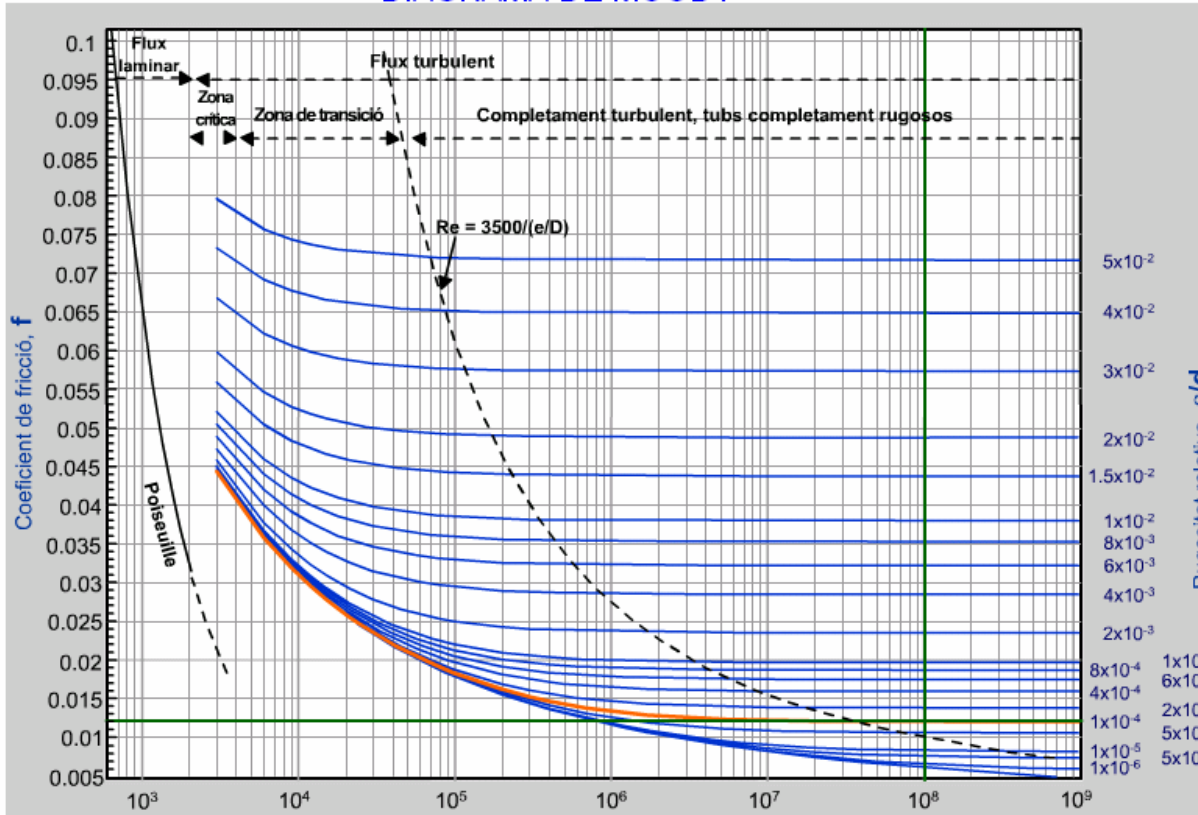
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|------|-------|-------|
| 2,1 | 0,000084 | 0,019 | 6,25 | 64,27 | 0,021 |

$K_s =$ valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 32 mm PE40

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

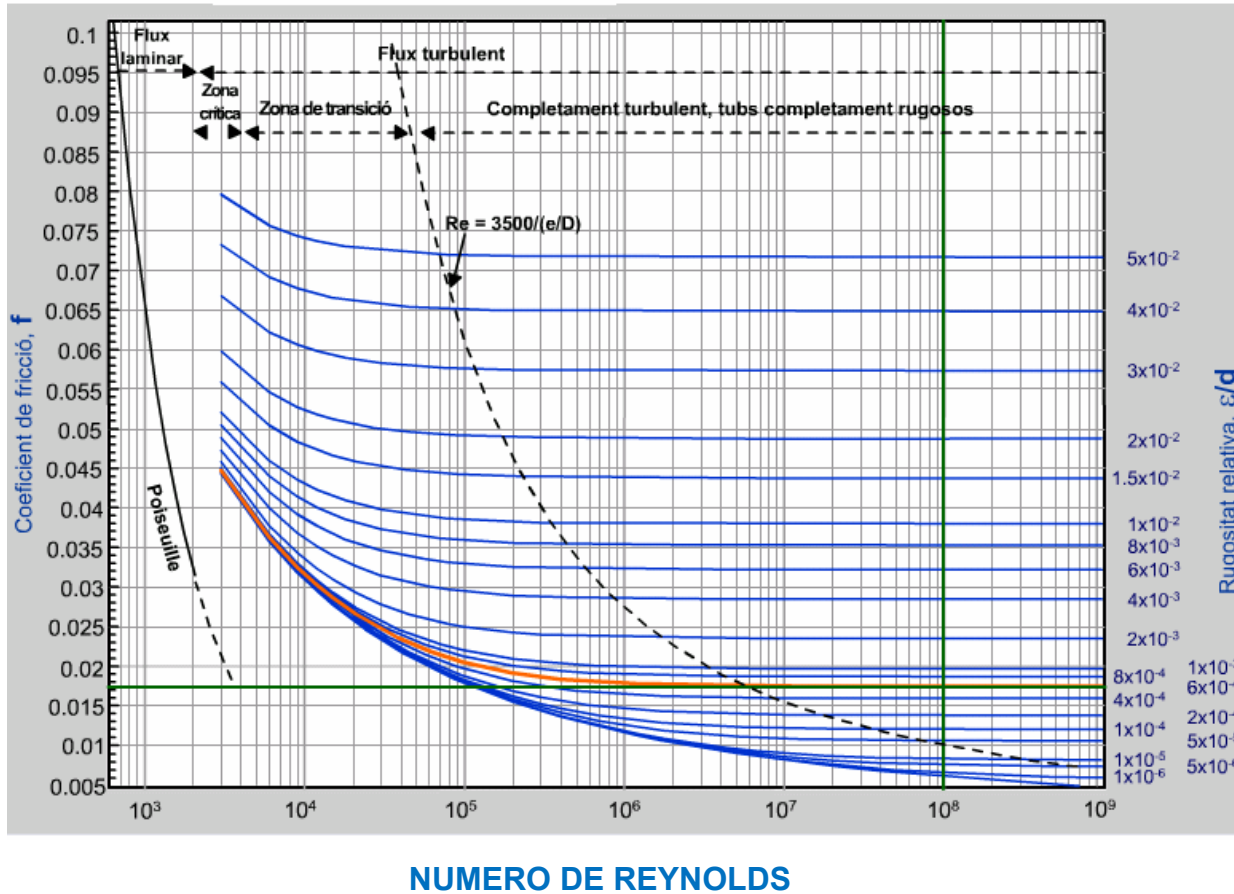
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| REF | Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|---------|----------|-------|----|-------|-------|
| PE40(1) | 0,31 | 0,000010 | 0,012 | 8 | 80,87 | 0,017 |
| PE40 | 0,35 | 0,000011 | 0,012 | 8 | 80,87 | 0,017 |

$K_s =$ valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 32mmPE80

DIAGRAMA DE MOODY



RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

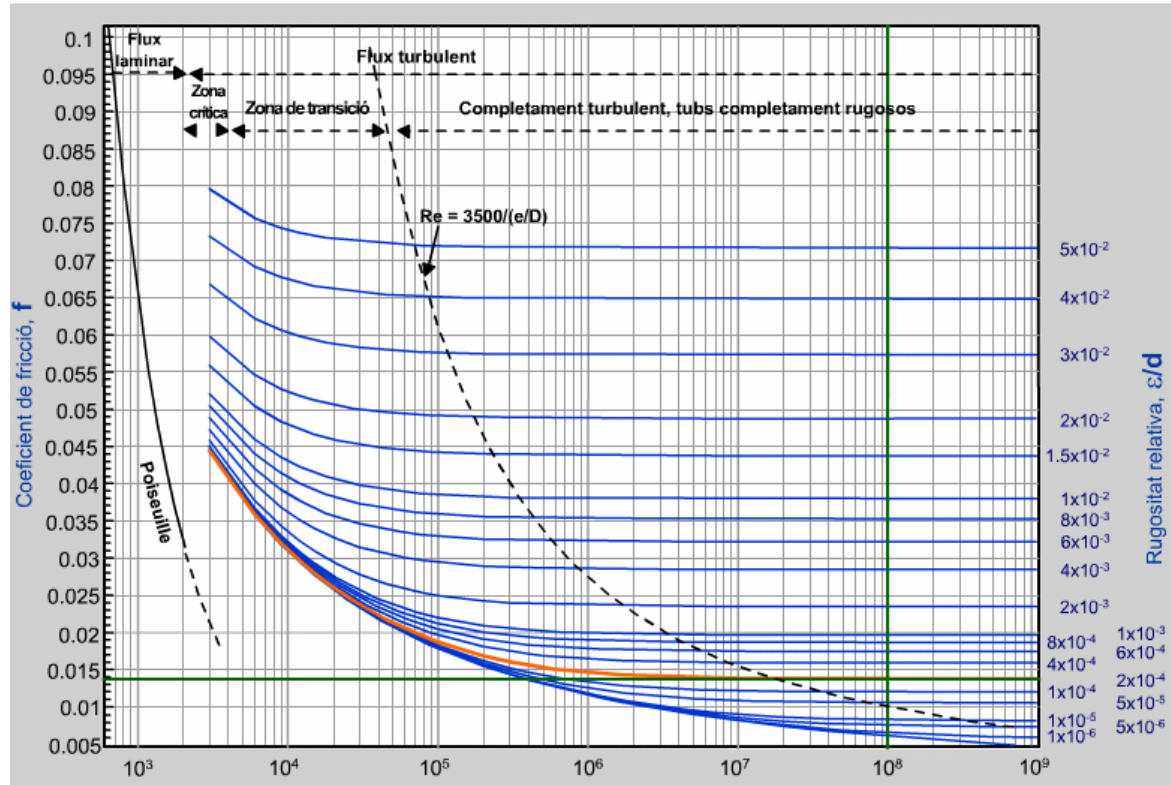
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|----|-------|-------|
| 2,02 | 0,000063 | 0,175 | 8 | 21,18 | 0,067 |

$K_s =$ valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 50mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

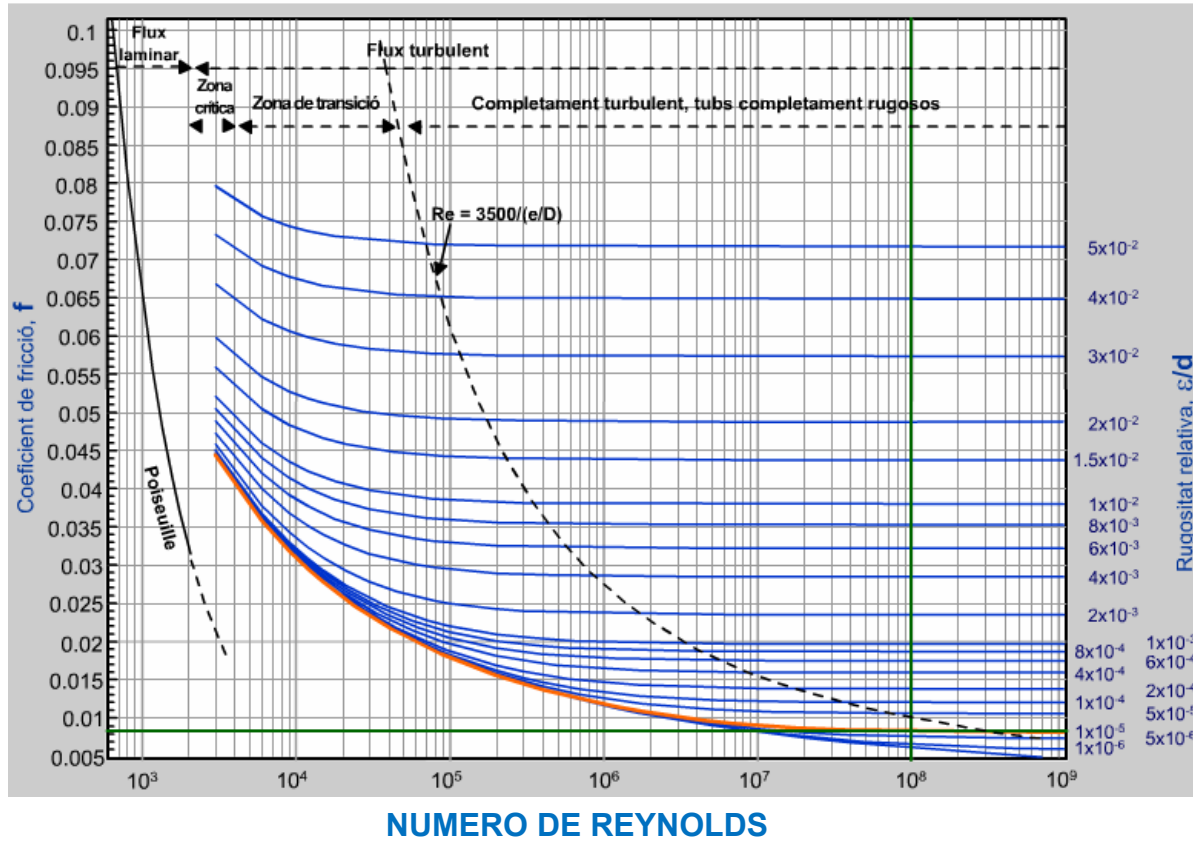
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|------|-------|------|
| 1,12 | 0,000022 | 0,014 | 12,5 | 74,87 | 0,02 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 63mm

DIAGRAMA DE MOODY



RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

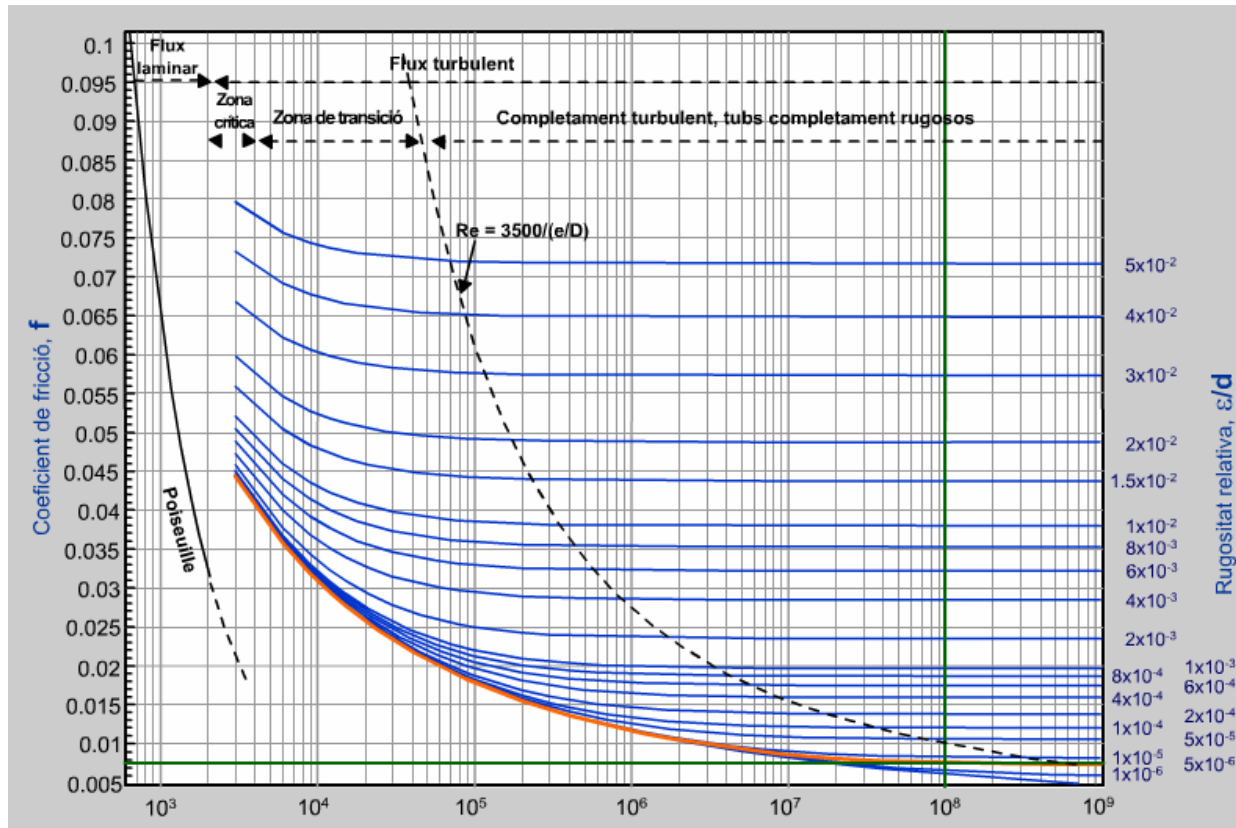
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|------|-------|-------|
| 0,8 | 0,000013 | 0,008 | 15,8 | 99,05 | 0,016 |

$K_s =$ valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 75mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

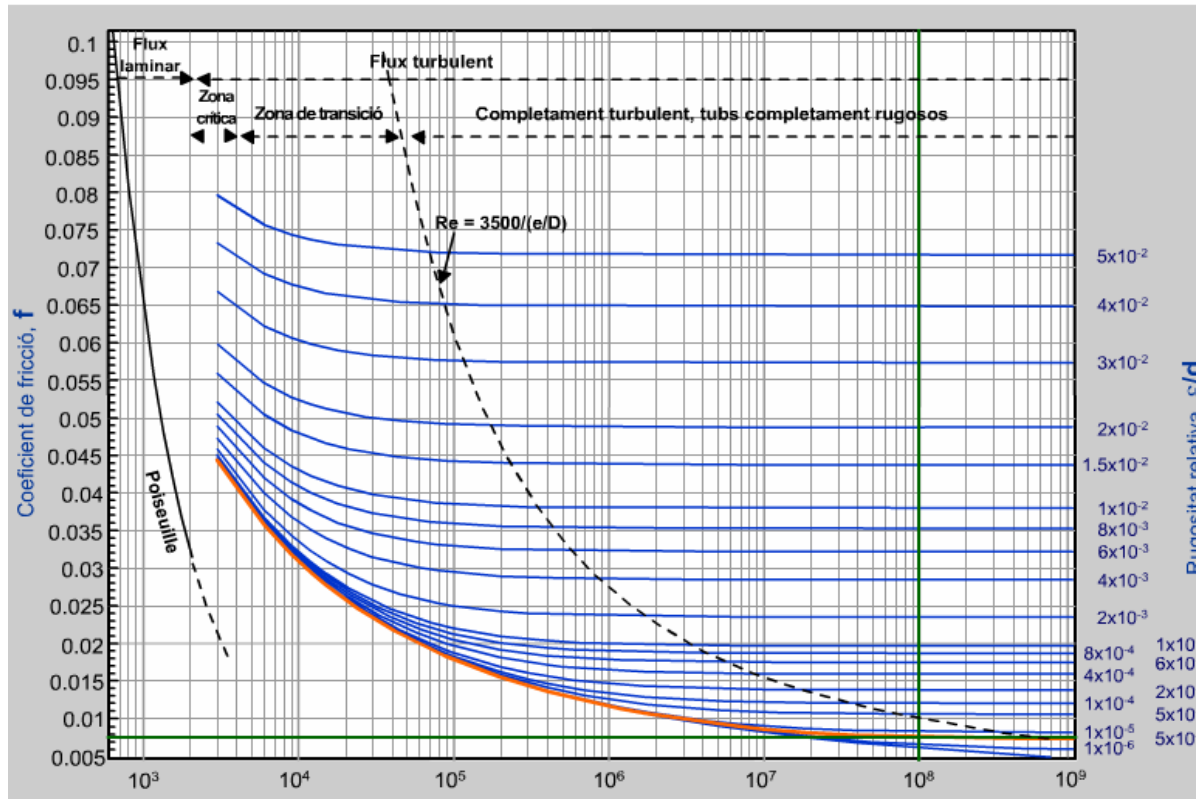
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|------|-------|-------|
| 1,03 | 0,000014 | 0,008 | 18,8 | 99,05 | 0,016 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 90mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FACTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

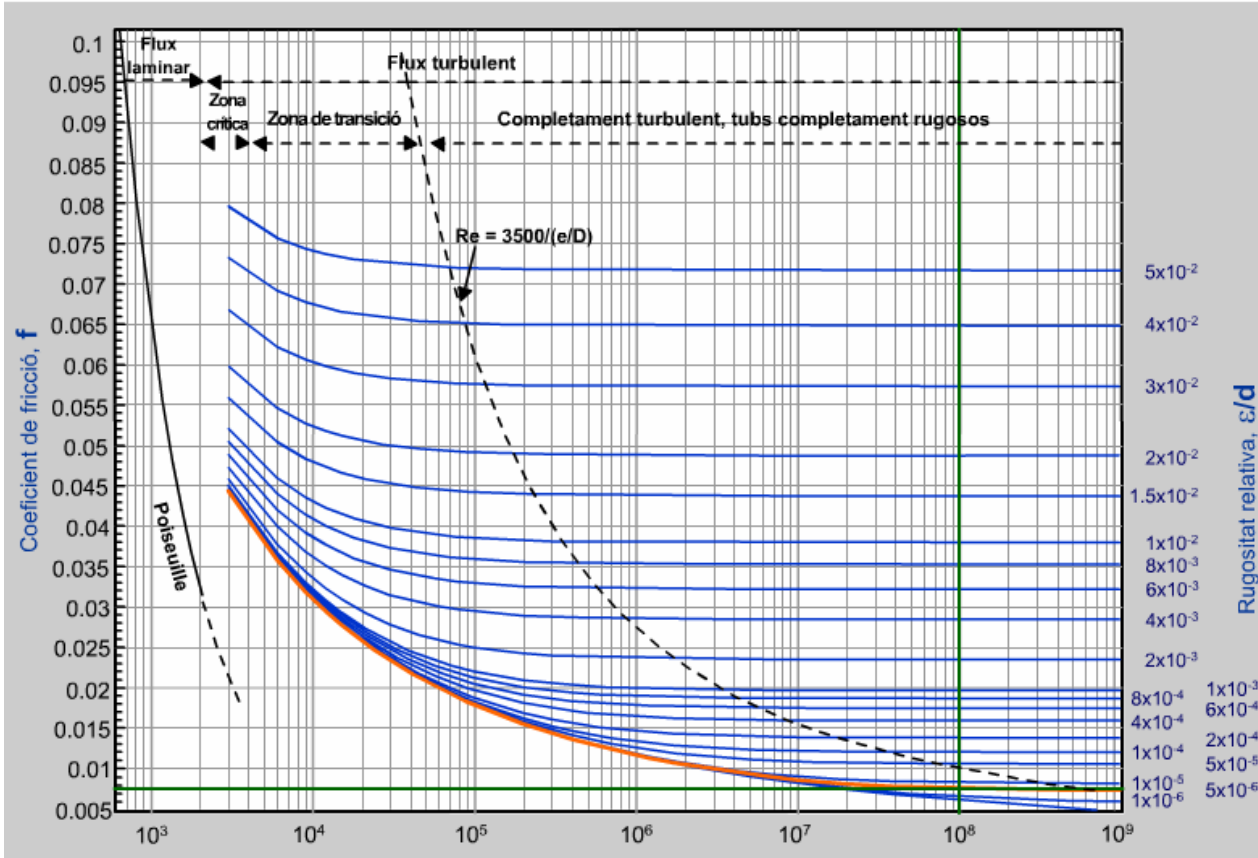
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|-------|------|--------|-------|
| 0,83 | 0,000009 | 0,008 | 22,5 | 99,045 | 0,017 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 160 mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

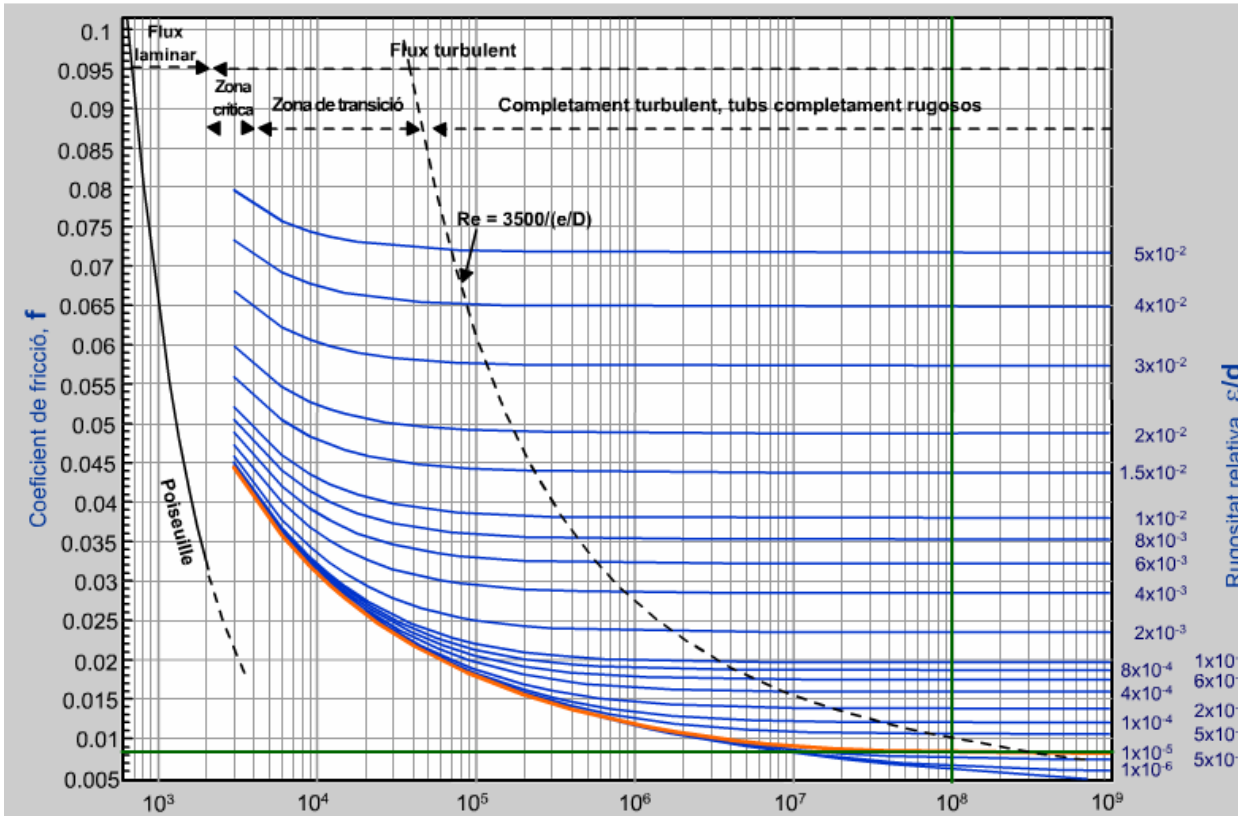
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|--------|----|--------|-------|
| 0,69 | 0,000004 | 0,0075 | 40 | 102,29 | 0,018 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 200 mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

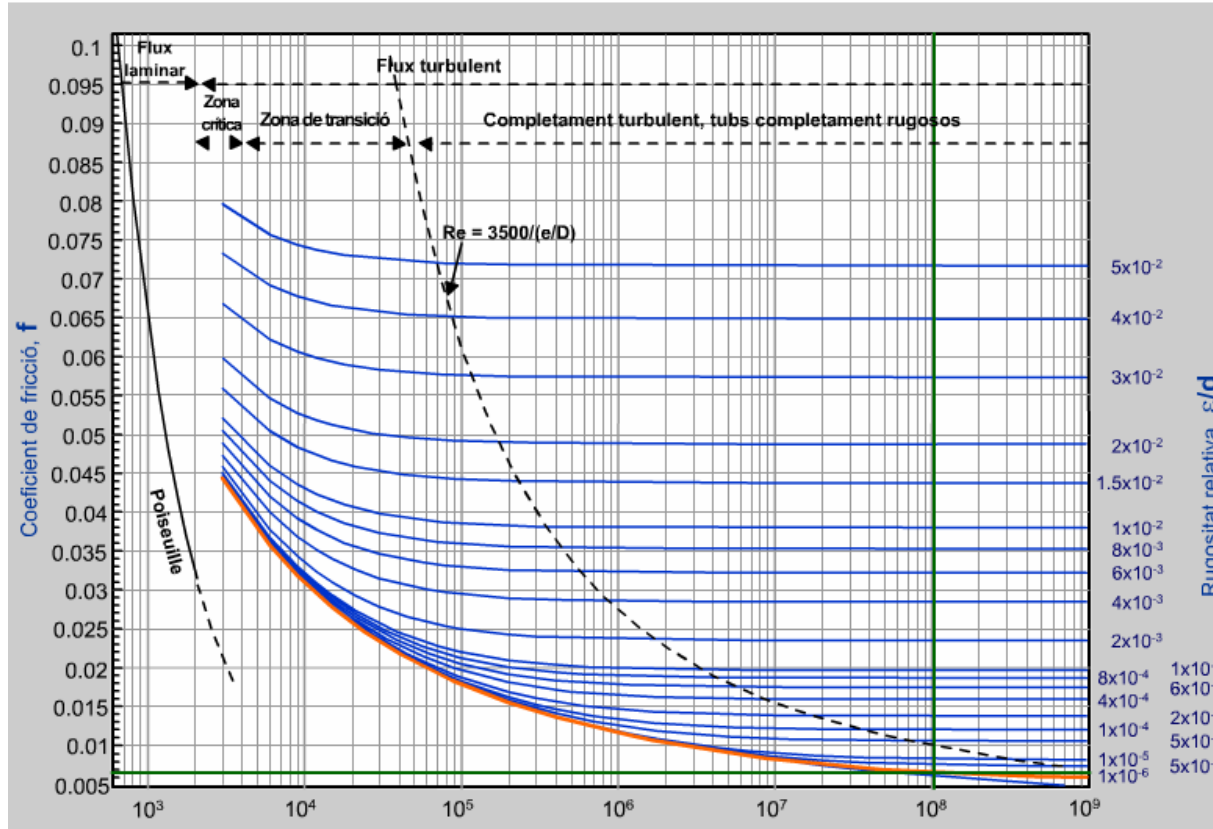
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|--------|----|--------|-------|
| 1,9 | 0,000010 | 0,0080 | 50 | 99,045 | 0,019 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 250 mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

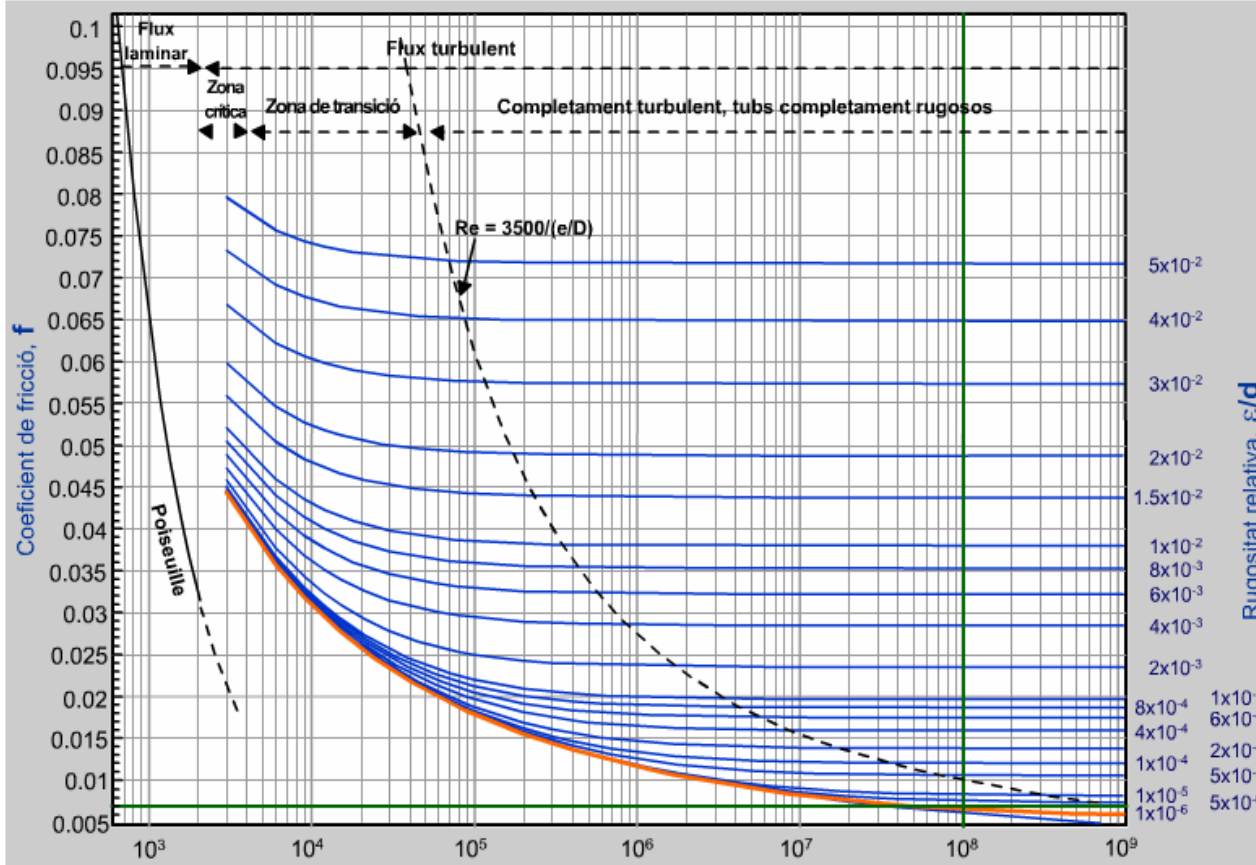
$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|--------|------|--------|-------|
| 0,37 | 0,000001 | 0,0060 | 62,5 | 114,37 | 0,017 |

$K_s =$ valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

DIAMETRO 315 mm

DIAGRAMA DE MOODY



NUMERO DE REYNOLDS

RELACION EXISTENTE ENTRE FARTOR DE FRICCION DE DARCY-WEISBACCH Y LOS COEFICIENTES DE CHEZY Y DE MANNING

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

$$n = \frac{Rh^{1/6}}{C}$$

| Ks (um) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|---------|----------|--------|------|--------|-------|
| 0,74 | 0,000002 | 0,0060 | 78,8 | 114,37 | 0,018 |

Ks= valor obtenido del analisis estadistico a los datos arrojados por las pruebas de laboratorio

CONCLUSIONES

Se establece la relación existente entre la densidad del polietileno y las características superficiales, esto nos permite afirmar que es un factor determinante en los valores obtenidos, ya que lecturas de rugosidad para polietileno de media densidad PE80 superaron en un porcentaje elevado los valores para polietileno PE40, fenómeno observado claramente en los resultados arrojados para los diámetros 32mm PE80 Y 32mm PE40 y corroborados con los diámetros 20mm PE80 Y 20mm PE40. (Ver Anexo B)

Los valores de los coeficientes de resistencia hidráulica calculados, se encuentran en los rangos sugeridos por la literatura (0.009-0.025) *El diseño Hidráulico – La Ecuación de manning 2006 extraídos en Octubre 2008 tomado de* (<http://tubosgm.com/Documentos/DISE%C3%91O%20HIDRAULICO.pdf>) lo cual valida esta investigación.

Se logro implementar una metodología para medición de coeficientes de rugosidad en el laboratorio teniendo en cuenta que los estudios realizados anteriormente con el mismo fin se realizaron mediante un montaje hidráulico, en los cuales no se lograba garantizar las condiciones de flujo turbulento ya que en la mayoría de los casos el flujo en tuberías se encuentra bajo este régimen.

RECOMENDACIONES

La investigación en todos los casos es un proceso continuo y evolutivo en el cual cada paso que se da es el antecesor del siguiente, así pues, esta el camino abierto para desarrollar profundización en el tema.

Implementar un método preventivo para el mantenimiento de la línea matriz o dados de la línea extrusora con el fin de homogenizar la rugosidad en las secciones.

Identificar perfiles térmicos adecuados que permitan conocer los parámetros reales y como afectan el factor rugosidad en las tuberías de polietileno extruido.

Si se desea obtener mayor precisión al momento de efectuar nuevamente las mediciones, se puede utilizar un rugosímetro de referencia mayor como el HommelWerke T1000 o implementar una nueva metodología óptica que permita mejorar los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Amador, R, (2008). Ponencia "Rugosidad Absoluta y Coeficientes de Perdidas Menores en Tuberías de PVC" XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.
- Dotelo, G, (1997) Hidráulica General, Volumen 1. México: Limusa Noriega Editores.
- Duarte, A, (2005) Introducción a la Hidráulica de Canales, Universidad Nacional de Colombia.
- French, R, (1985) Hidráulica de Canales Abiertos. México: Mc Graw Hill.
- Frank M, White, E, (1979) Mecánica de Fluidos, Mac Graw Hill
- Grann-Meyer, E, (2005) Polyethylene Pipes in applied engineering, Brussels: TOTAL
- Saldarriaga, J, (2007) Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega.

ANEXO A RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES

DIAMETRO 315mm

Tabla A.1

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 1,46 | 6,84 | 7,50 | 1,10 | 4,74 | 5,71 | 0,76 | 3,90 | 5,76 | 0,86 | 3,88 | 5,18 |
| 0,72 | 3,28 | 3,70 | 0,80 | 3,98 | 5,22 | 0,30 | 2,00 | 3,10 | 0,88 | 3,74 | 5,90 |
| 1,23 | 2,65 | 3,12 | 0,69 | 3,50 | 4,78 | 0,40 | 2,10 | 2,80 | 0,75 | 3,54 | 5,17 |
| 1,45 | 4,15 | 5,65 | 1,15 | 4,85 | 5,44 | 0,65 | 2,62 | 3,87 | 0,69 | 3,31 | 5,11 |
| 0,89 | 3,15 | 4,29 | 1,04 | 4,43 | 4,98 | 0,79 | 3,54 | 5,91 | 0,92 | 4,02 | 5,67 |
| 1,55 | 7,12 | 7,76 | 0,75 | 3,55 | 4,32 | 0,61 | 3,03 | 6,15 | 0,85 | 3,97 | 6,02 |
| 0,75 | 3,45 | 5,34 | 0,86 | 4,67 | 5,88 | 0,73 | 2,78 | 3,83 | 0,69 | 3,65 | 5,13 |
| 1,04 | 5,98 | 6,76 | 1,19 | 5,05 | 5,91 | 0,35 | 1,68 | 2,90 | 0,96 | 3,11 | 5,45 |
| 1,15 | 4,98 | 6,14 | 0,94 | 5,31 | 6,15 | 0,38 | 2,49 | 4,78 | 1,12 | 3,63 | 5,95 |
| 1,44 | 6,76 | 7,45 | 1,03 | 4,65 | 6,02 | 0,52 | 2,12 | 4,32 | 0,74 | 3,06 | 6,14 |
| Seccion5 | | | Seccion6 | | | Seccion7 | | | Seccion8 | | |
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,44 | 2,00 | 2,48 | 0,92 | 4,08 | 5,02 | 0,20 | 1,20 | 1,60 | 0,10 | 0,80 | 3,10 |
| 0,40 | 1,82 | 2,32 | 0,86 | 4,12 | 5,06 | 0,78 | 3,34 | 3,94 | 0,78 | 3,82 | 7,24 |
| 0,36 | 1,45 | 2,58 | 0,89 | 4,05 | 5,12 | 0,65 | 2,08 | 2,55 | 0,65 | 0,96 | 3,27 |
| 0,51 | 2,12 | 2,36 | 0,81 | 3,95 | 5,25 | 0,55 | 1,43 | 1,96 | 0,22 | 0,76 | 3,84 |
| 0,32 | 2,19 | 2,35 | 0,94 | 4,15 | 5,02 | 0,81 | 1,62 | 1,90 | 0,64 | 1,96 | 5,26 |
| 0,52 | 1,65 | 2,16 | 1,03 | 4,17 | 4,89 | 0,32 | 2,17 | 4,09 | 0,42 | 2,35 | 6,98 |
| 0,47 | 1,95 | 2,11 | 0,86 | 4,25 | 5,09 | 0,56 | 2,01 | 3,70 | 0,69 | 2,69 | 7,21 |
| 0,39 | 1,85 | 2,64 | 0,94 | 4,33 | 5,02 | 0,72 | 1,33 | 3,21 | 0,82 | 3,59 | 6,84 |
| 0,59 | 1,89 | 2,55 | 0,97 | 3,92 | 4,96 | 0,44 | 1,44 | 3,56 | 0,19 | 2,11 | 6,33 |
| 0,44 | 2,05 | 2,36 | 0,84 | 3,97 | 4,87 | 0,65 | 1,83 | 2,94 | 0,26 | 2,98 | 5,72 |

DIAMETRO 250mm

Tabla A.2

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,38 | 2,28 | 2,50 | 0,30 | 2,00 | 2,60 | 0,42 | 2,28 | 2,52 | 0,20 | 1,32 | 1,52 |
| 0,75 | 3,51 | 3,75 | 0,30 | 1,70 | 1,88 | 0,52 | 2,92 | 6,92 | 0,26 | 1,64 | 1,94 |
| 0,67 | 2,96 | 3,56 | 0,42 | 1,85 | 2,31 | 0,58 | 2,45 | 3,48 | 0,38 | 1,45 | 1,55 |
| 0,35 | 3,34 | 3,98 | 0,38 | 2,18 | 2,66 | 0,48 | 2,26 | 2,59 | 0,12 | 1,23 | 1,38 |
| 0,31 | 3,12 | 3,42 | 0,39 | 2,06 | 2,69 | 0,41 | 2,03 | 4,34 | 0,45 | 1,55 | 1,78 |
| 0,65 | 2,16 | 2,83 | 0,27 | 1,93 | 2,19 | 0,38 | 3,18 | 5,09 | 0,22 | 2,34 | 2,45 |
| 0,94 | 3,92 | 4,07 | 0,29 | 1,89 | 1,96 | 0,45 | 2,56 | 3,08 | 0,19 | 2,23 | 2,76 |
| 0,63 | 3,17 | 3,85 | 0,33 | 1,64 | 1,73 | 0,63 | 3,03 | 5,70 | 0,33 | 1,56 | 2,02 |
| 0,81 | 2,69 | 3,11 | 0,38 | 1,53 | 1,65 | 0,59 | 2,19 | 4,58 | 0,25 | 1,34 | 1,67 |
| 0,77 | 2,83 | 3,06 | 0,29 | 1,94 | 2,09 | 0,47 | 2,74 | 6,02 | 0,33 | 2,08 | 2,34 |
| Seccion5 | | | Seccion 6 | | | Seccion 7 | | | Seccion 8 | | |
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,34 | 2,04 | 2,56 | 0,30 | 1,60 | 2,10 | 0,24 | 1,46 | 1,62 | 0,26 | 1,56 | 1,94 |
| 0,38 | 2,12 | 2,66 | 0,30 | 1,84 | 2,22 | 0,30 | 1,92 | 2,22 | 0,30 | 1,80 | 2,20 |
| 0,33 | 2,15 | 3,02 | 0,45 | 1,67 | 1,89 | 0,32 | 1,34 | 2,33 | 0,31 | 1,65 | 1,89 |
| 0,23 | 2,11 | 2,34 | 0,38 | 1,65 | 2,02 | 0,25 | 1,65 | 2,45 | 0,23 | 1,67 | 1,78 |
| 0,45 | 2,08 | 2,76 | 0,34 | 2,24 | 2,35 | 0,31 | 1,56 | 2,02 | 0,34 | 2,14 | 2,43 |
| 0,40 | 2,16 | 3,04 | 0,32 | 1,64 | 1,78 | 0,26 | 2,02 | 2,34 | 0,22 | 2,02 | 2,14 |
| 0,28 | 2,32 | 2,45 | 0,28 | 2,11 | 2,34 | 0,28 | 2,23 | 2,45 | 0,33 | 1,89 | 3,15 |
| 0,39 | 3,03 | 3,45 | 0,35 | 1,82 | 1,98 | 0,34 | 1,43 | 1,65 | 0,27 | 1,43 | 3,03 |
| 0,32 | 2,13 | 2,55 | 0,29 | 1,55 | 1,65 | 0,32 | 1,23 | 1,73 | 0,25 | 2,23 | 2,45 |
| 0,30 | 2,02 | 3,13 | 0,27 | 2,24 | 2,36 | 0,23 | 1,54 | 1,67 | 0,45 | 2,11 | 2,33 |

DIAMETRO 200mm

Tabla A.3

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|-------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,90 | 4,61 | 7,53 | 2,20 | 10,54 | 12,22 | 1,04 | 5,36 | 8,46 | 1,86 | 8,64 | 10,08 |
| 0,63 | 3,23 | 4,41 | 0,51 | 2,80 | 6,20 | 2,26 | 9,44 | 11,30 | 1,54 | 7,48 | 9,66 |
| 0,78 | 3,15 | 4,68 | 1,17 | 7,23 | 8,71 | 1,88 | 6,35 | 9,50 | 1,48 | 7,22 | 9,45 |
| 0,83 | 3,85 | 5,64 | 1,87 | 3,24 | 6,33 | 2,33 | 7,45 | 10,83 | 1,65 | 8,03 | 8,74 |
| 0,81 | 4,07 | 6,53 | 2,17 | 6,93 | 7,82 | 1,74 | 5,89 | 9,94 | 1,49 | 8,57 | 10,33 |
| 0,94 | 3,96 | 6,98 | 1,13 | 5,36 | 9,31 | 1,26 | 6,81 | 10,57 | 1,76 | 8,26 | 9,62 |
| 0,89 | 4,43 | 5,32 | 0,62 | 4,65 | 7,96 | 1,58 | 9,17 | 11,58 | 1,84 | 7,33 | 8,79 |
| 0,91 | 4,32 | 6,44 | 1,52 | 9,56 | 10,17 | 1,02 | 6,22 | 10,43 | 1,41 | 7,85 | 10,28 |
| 0,89 | 4,77 | 7,83 | 0,50 | 10,88 | 11,56 | 1,37 | 5,39 | 9,73 | 1,92 | 7,82 | 9,74 |
| 0,86 | 4,12 | 7,21 | 0,97 | 8,62 | 10,45 | 1,45 | 8,61 | 9,51 | 1,88 | 8,73 | 9,16 |

| Seccion5 | | | Seccion 6 | | | Seccion 7 | | | Seccion 8 | | |
|----------|-------|-------|-----------|------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 2,60 | 12,06 | 14,04 | 2,28 | 9,90 | 12,32 | 2,24 | 12,38 | 16,56 | 2,72 | 11,92 | 15,40 |
| 2,66 | 12,06 | 17,48 | 1,22 | 6,64 | 7,48 | 2,36 | 11,74 | 13,98 | 3,50 | 10,81 | 16,20 |
| 2,58 | 12,91 | 15,23 | 1,34 | 7,45 | 8,40 | 2,45 | 11,85 | 14,02 | 2,71 | 10,99 | 15,44 |
| 2,45 | 12,15 | 17,29 | 2,36 | 8,34 | 9,55 | 2,14 | 11,75 | 15,50 | 2,85 | 11,05 | 15,55 |
| 2,76 | 11,84 | 13,25 | 1,58 | 7,17 | 7,63 | 2,33 | 12,05 | 15,86 | 2,95 | 11,35 | 16,02 |
| 2,81 | 11,96 | 15,19 | 1,85 | 6,42 | 11,58 | 2,08 | 12,15 | 15,35 | 3,52 | 11,65 | 16,25 |
| 2,43 | 12,27 | 16,34 | 2,17 | 9,47 | 10,41 | 2,26 | 12,37 | 16,05 | 3,49 | 11,45 | 16,18 |
| 2,78 | 12,41 | 15,87 | 1,96 | 6,91 | 7,33 | 2,33 | 11,99 | 16,38 | 3,35 | 11,29 | 16,24 |
| 2,84 | 11,87 | 17,93 | 1,88 | 8,36 | 8,92 | 2,35 | 12,08 | 16,45 | 3,39 | 11,87 | 16,19 |
| 2,62 | 11,95 | 16,15 | 1,21 | 9,05 | 9,48 | 2,23 | 12,38 | 16,57 | 2,88 | 11,26 | 15,55 |

DIAMETRO 160mm

Tabla A.4

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,50 | 2,52 | 3,72 | 0,71 | 3,68 | 4,32 | 0,46 | 2,64 | 3,26 | 1,06 | 5,28 | 6,66 |
| 0,55 | 2,34 | 4,15 | 0,65 | 3,55 | 4,18 | 0,48 | 3,16 | 3,75 | 1,10 | 4,82 | 6,51 |
| 0,62 | 2,45 | 3,13 | 0,62 | 3,66 | 4,03 | 0,45 | 2,98 | 3,45 | 1,13 | 4,26 | 5,02 |
| 0,53 | 2,33 | 2,45 | 0,55 | 3,57 | 4,32 | 0,43 | 2,67 | 3,03 | 1,09 | 4,65 | 6,03 |
| 0,56 | 2,51 | 3,02 | 0,69 | 3,65 | 4,25 | 0,46 | 3,14 | 3,45 | 1,23 | 5,02 | 5,89 |
| 0,63 | 2,53 | 3,12 | 0,73 | 3,45 | 4,15 | 0,44 | 3,02 | 3,34 | 1,06 | 4,56 | 6,56 |
| 0,54 | 2,33 | 2,55 | 0,56 | 3,67 | 4,17 | 0,45 | 3,23 | 3,33 | 1,14 | 4,34 | 6,45 |
| 0,63 | 2,53 | 3,08 | 0,63 | 3,63 | 4,22 | 0,49 | 2,67 | 3,72 | 1,04 | 4,22 | 5,32 |
| 0,51 | 2,45 | 2,52 | 0,66 | 3,64 | 4,31 | 0,52 | 2,65 | 3,43 | 1,22 | 5,03 | 5,45 |
| 0,53 | 2,47 | 2,55 | 0,69 | 3,52 | 4,02 | 0,41 | 3,05 | 3,65 | 1,05 | 5,24 | 5,65 |

| Seccion5 | | | Seccion 6 | | | Seccion 7 | | | Seccion 8 | | |
|----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,50 | 2,60 | 6,66 | 0,78 | 4,16 | 5,46 | 0,66 | 3,58 | 4,12 | 0,86 | 5,01 | 7,98 |
| 0,45 | 2,84 | 6,51 | 0,81 | 4,52 | 5,17 | 0,71 | 3,41 | 4,23 | 0,65 | 4,32 | 6,91 |
| 0,47 | 2,59 | 6,43 | 0,82 | 4,44 | 5,22 | 0,65 | 3,57 | 4,23 | 0,76 | 4,77 | 5,67 |
| 0,43 | 2,77 | 5,76 | 0,77 | 4,02 | 5,43 | 0,72 | 3,45 | 4,02 | 0,83 | 4,65 | 6,54 |
| 0,49 | 2,87 | 5,44 | 0,72 | 5,06 | 5,65 | 0,68 | 3,55 | 4,33 | 0,66 | 4,03 | 6,43 |
| 0,52 | 2,76 | 5,03 | 0,76 | 4,15 | 5,17 | 0,77 | 3,52 | 4,35 | 0,89 | 4,55 | 7,65 |
| 0,56 | 2,45 | 6,23 | 0,83 | 4,23 | 5,45 | 0,63 | 4,03 | 4,11 | 0,63 | 5,04 | 7,45 |
| 0,43 | 2,98 | 6,43 | 0,74 | 5,03 | 5,33 | 0,72 | 4,15 | 4,65 | 0,66 | 4,98 | 7,02 |
| 0,49 | 2,66 | 6,02 | 0,88 | 4,52 | 5,04 | 0,76 | 4,01 | 4,43 | 0,87 | 4,66 | 6,34 |
| 0,56 | 2,65 | 5,34 | 0,78 | 4,17 | 5,42 | 0,63 | 3,56 | 4,37 | 0,62 | 4,78 | 6,54 |

DIAMETRO 90 mm

Tabla A.5

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,66 | 3,65 | 4,82 | 0,86 | 4,72 | 6,11 | 1,14 | 6,41 | 7,90 | 0,86 | 4,44 | 4,91 |
| 0,55 | 3,42 | 4,73 | 0,72 | 4,95 | 5,96 | 1,05 | 6,35 | 7,42 | 0,76 | 4,32 | 4,75 |
| 0,65 | 3,45 | 4,75 | 0,73 | 4,73 | 6,14 | 1,11 | 6,38 | 7,43 | 0,75 | 4,43 | 4,65 |
| 0,56 | 3,66 | 4,81 | 0,85 | 4,88 | 5,87 | 1,04 | 6,34 | 7,66 | 0,85 | 4,33 | 4,76 |
| 0,68 | 3,44 | 4,76 | 0,77 | 4,94 | 6,02 | 1,13 | 6,23 | 7,45 | 0,77 | 4,33 | 4,99 |
| 0,56 | 3,66 | 4,78 | 0,85 | 4,73 | 5,99 | 1,04 | 6,39 | 7,65 | 0,85 | 4,35 | 5,02 |
| 0,63 | 4,04 | 4,81 | 0,79 | 5,03 | 6,12 | 1,13 | 6,42 | 7,41 | 0,84 | 4,42 | 4,74 |
| 0,57 | 3,72 | 4,83 | 0,75 | 4,96 | 5,87 | 1,16 | 6,33 | 7,54 | 0,77 | 4,31 | 4,86 |
| 0,62 | 3,68 | 4,74 | 0,84 | 4,75 | 5,95 | 1,07 | 6,39 | 7,65 | 0,84 | 4,41 | 4,54 |
| 0,61 | 4,12 | 4,76 | 0,73 | 4,77 | 6,13 | 1,12 | 6,38 | 7,43 | 0,82 | 4,42 | 4,75 |

DIAMETRO 75mm

Tabla A.6

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,78 | 4,64 | 5,28 | 1,38 | 6,74 | 7,51 | 1,02 | 6,10 | 7,88 | 0,60 | 3,61 | 9,01 |
| 0,81 | 4,92 | 6,16 | 0,91 | 4,88 | 5,92 | 1,85 | 6,35 | 6,92 | 0,94 | 5,06 | 8,32 |
| 0,79 | 4,63 | 5,64 | 0,89 | 5,55 | 6,65 | 1,65 | 6,23 | 6,45 | 0,76 | 4,43 | 8,34 |
| 0,77 | 4,88 | 5,43 | 0,75 | 4,99 | 6,45 | 1,67 | 6,22 | 6,35 | 0,84 | 4,39 | 8,31 |
| 0,79 | 4,76 | 5,34 | 1,37 | 6,54 | 6,91 | 1,54 | 6,33 | 6,54 | 0,73 | 5,03 | 8,89 |
| 0,83 | 4,64 | 6,15 | 0,66 | 6,72 | 7,44 | 1,45 | 6,14 | 6,28 | 0,83 | 3,74 | 8,54 |
| 0,81 | 4,87 | 6,02 | 1,34 | 5,34 | 6,49 | 1,34 | 6,32 | 7,54 | 0,79 | 4,45 | 8,76 |
| 0,77 | 4,91 | 5,29 | 1,43 | 5,12 | 7,49 | 1,23 | 6,31 | 7,34 | 0,63 | 4,04 | 8,63 |
| 0,82 | 4,75 | 6,15 | 0,78 | 4,76 | 7,49 | 1,76 | 6,17 | 7,42 | 0,64 | 5,11 | 8,98 |
| 0,75 | 4,96 | 6,03 | 0,76 | 4,87 | 6,15 | 1,65 | 6,29 | 7,03 | 0,93 | 3,74 | 9,03 |

DIAMETRO 63mm

Tabla A.7

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,72 | 4,26 | 6,46 | 1,54 | 7,84 | 9,04 | 1,1 | 6,1 | 7,53 | 0,92 | 5,12 | 6,74 |
| 0,65 | 4,31 | 6,82 | 1,32 | 7,46 | 8,65 | 0,96 | 5,04 | 5,74 | 0,85 | 4,76 | 5,91 |
| 0,63 | 4,27 | 6,52 | 1,31 | 7,54 | 8,72 | 1,12 | 5,25 | 5,86 | 0,87 | 5,11 | 5,99 |
| 0,62 | 4,28 | 6,65 | 1,45 | 7,65 | 8,88 | 0,97 | 5,16 | 5,95 | 0,85 | 5,02 | 6,01 |
| 0,71 | 4,31 | 6,53 | 1,47 | 7,83 | 8,63 | 0,99 | 5,35 | 7,45 | 0,91 | 4,75 | 6,55 |
| 0,61 | 4,32 | 6,75 | 1,36 | 7,48 | 8,65 | 0,96 | 5,59 | 7,03 | 0,93 | 4,86 | 6,35 |
| 0,69 | 4,29 | 6,49 | 1,38 | 7,65 | 8,34 | 0,95 | 6,01 | 7,49 | 0,84 | 5,11 | 6,32 |
| 0,65 | 4,32 | 6,51 | 1,42 | 7,49 | 9,01 | 1,13 | 5,59 | 6,74 | 0,82 | 5,05 | 6,45 |
| 0,71 | 4,25 | 6,66 | 1,39 | 7,83 | 8,73 | 0,98 | 4,59 | 6,14 | 0,86 | 4,78 | 6,75 |
| 0,73 | 4,26 | 6,72 | 1,52 | 7,47 | 8,82 | 0,96 | 5,03 | 7,01 | 0,91 | 4,88 | 6,28 |

DIAMETRO 50mm

Tabla A.8

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|-------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,86 | 4,54 | 5,63 | 1,31 | 6,32 | 7,65 | 1,21 | 7,02 | 12,61 | 1,21 | 6,23 | 7,15 |
| 0,91 | 4,12 | 4,97 | 1,15 | 6,25 | 7,18 | 1,19 | 7,01 | 9,65 | 1,11 | 5,84 | 6,29 |
| 0,85 | 4,25 | 4,99 | 1,17 | 6,26 | 7,25 | 1,36 | 6,94 | 9,75 | 1,22 | 5,83 | 6,35 |
| 0,88 | 4,45 | 5,02 | 1,22 | 6,31 | 7,35 | 1,35 | 7,18 | 9,82 | 1,12 | 5,95 | 6,31 |
| 0,92 | 4,13 | 5,35 | 1,32 | 6,28 | 7,19 | 1,01 | 6,84 | 11,31 | 1,15 | 5,85 | 7,14 |
| 0,87 | 4,52 | 5,32 | 1,02 | 6,25 | 7,64 | 0,92 | 6,99 | 11,92 | 1,16 | 6,01 | 7,13 |
| 0,91 | 4,35 | 5,45 | 1,26 | 6,27 | 7,45 | 1,35 | 7,25 | 11,13 | 1,23 | 6,15 | 7,03 |
| 0,84 | 4,42 | 5,62 | 1,28 | 6,31 | 7,55 | 1,18 | 7,48 | 12,02 | 1,17 | 6,11 | 6,32 |
| 0,86 | 4,26 | 5,46 | 1,29 | 6,33 | 7,21 | 1,23 | 7,35 | 12,25 | 1,18 | 6,23 | 6,33 |
| 0,93 | 4,28 | 5,22 | 1,14 | 6,24 | 7,63 | 1,19 | 8,42 | 12,31 | 1,22 | 5,85 | 6,41 |

DIAMETRO 32mm PE80

Tabla A.9

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 2,16 | 10,9 | 14,18 | 1,98 | 10 | 13,81 | 2,11 | 11,2 | 14,23 | 1,91 | 10,1 | 14,21 |
| 1,85 | 9,83 | 12,34 | 1,83 | 9,65 | 12,94 | 2,04 | 10,7 | 13,54 | 2,06 | 10,5 | 15,12 |
| 1,84 | 9,95 | 12,45 | 1,84 | 9,75 | 12,98 | 2,12 | 10,8 | 13,59 | 1,84 | 10,1 | 14,22 |
| 1,99 | 9,84 | 13,35 | 1,87 | 9,66 | 13,05 | 2,05 | 10,9 | 13,55 | 2,13 | 10,5 | 14,35 |
| 2,01 | 9,99 | 13,02 | 1,92 | 10 | 13,25 | 2,09 | 11 | 14,21 | 2,19 | 10,3 | 14,55 |
| 2,15 | 10,1 | 13,19 | 1,91 | 9,99 | 13,55 | 2,12 | 11,1 | 14,19 | 2,04 | 10,4 | 14,67 |
| 2,13 | 10,2 | 14,05 | 1,97 | 9,64 | 13,35 | 2,11 | 11,2 | 14,17 | 2,22 | 10,6 | 15,02 |
| 2,05 | 10,4 | 14,17 | 1,99 | 9,67 | 13,45 | 2,03 | 11,2 | 14,21 | 1,86 | 10,5 | 15,11 |
| 1,98 | 10,7 | 13,59 | 1,85 | 9,68 | 13,08 | 2,06 | 11,2 | 13,24 | 2,17 | 10,1 | 15,13 |
| 2,15 | 10,7 | 13,55 | 1,97 | 9,98 | 13,48 | 2,08 | 11,2 | 13,85 | 1,93 | 10,5 | 15,08 |

DIAMETRO 32mm PE40

Tabla A.10

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion 4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|-----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,52 | 2,53 | 3,49 | 0,15 | 1,05 | 1,54 | 0,54 | 3,56 | 5,43 | 0,12 | 1,15 | 1,36 |
| 0,48 | 2,45 | 3,28 | 0,25 | 1,02 | 1,36 | 0,53 | 3,48 | 5,21 | 0,16 | 1,23 | 1,28 |
| 0,49 | 2,47 | 3,29 | 0,16 | 1,04 | 1,38 | 0,52 | 3,49 | 5,32 | 0,15 | 1,22 | 1,29 |
| 0,52 | 2,49 | 3,33 | 0,24 | 1,02 | 1,42 | 0,55 | 3,41 | 5,26 | 0,11 | 1,16 | 1,34 |
| 0,51 | 2,53 | 3,42 | 0,14 | 1,06 | 1,52 | 0,54 | 3,44 | 5,24 | 0,14 | 1,23 | 1,32 |
| 0,57 | 2,51 | 3,45 | 0,16 | 1,03 | 1,51 | 0,53 | 3,55 | 5,34 | 0,13 | 1,17 | 1,33 |
| 0,48 | 2,48 | 3,48 | 0,19 | 1,04 | 1,39 | 0,52 | 3,52 | 5,42 | 0,17 | 1,19 | 1,29 |
| 0,51 | 2,52 | 3,54 | 0,23 | 1,06 | 1,51 | 0,53 | 3,49 | 5,45 | 0,16 | 1,24 | 1,27 |
| 0,52 | 2,54 | 3,49 | 0,28 | 1,05 | 1,53 | 0,54 | 3,54 | 5,21 | 0,12 | 1,16 | 1,36 |
| 0,49 | 2,46 | 3,27 | 0,19 | 1,04 | 1,38 | 0,55 | 3,56 | 5,22 | 0,15 | 1,21 | 1,33 |

DIAMETRO 25mm

Tabla A.11

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 2,21 | 10,33 | 13,44 | 2,15 | 9,85 | 13,41 | 1,97 | 10,49 | 13,33 | 2,13 | 10,25 | 13,35 |
| 1,95 | 10,15 | 12,93 | 2,02 | 10,23 | 12,86 | 2,18 | 9,88 | 12,98 | 2,05 | 10,09 | 12,97 |
| 1,99 | 10,14 | 12,99 | 2,14 | 9,95 | 12,95 | 1,99 | 9,99 | 12,99 | 2,08 | 10,11 | 12,99 |
| 2,01 | 10,32 | 13,35 | 2,05 | 10,02 | 12,88 | 2,01 | 10,05 | 13,05 | 2,11 | 10,24 | 13,05 |
| 2,19 | 10,19 | 13,25 | 2,09 | 10,25 | 13,14 | 2,17 | 10,35 | 13,25 | 2,13 | 10,22 | 13,15 |
| 2,15 | 10,22 | 13,45 | 2,14 | 10,22 | 13,33 | 2,15 | 10,45 | 13,34 | 2,14 | 10,26 | 13,24 |
| 2,16 | 10,25 | 13,43 | 2,15 | 9,87 | 13,41 | 2,19 | 10,25 | 13,27 | 2,08 | 10,15 | 13,34 |
| 2,06 | 10,27 | 13,01 | 2,05 | 9,88 | 13,42 | 2,18 | 10,06 | 13,08 | 2,09 | 10,23 | 13,36 |
| 1,96 | 10,34 | 13,44 | 2,14 | 9,99 | 13,25 | 2,08 | 10,51 | 13,13 | 2,14 | 10,17 | 13,17 |
| 2,22 | 10,17 | 13,05 | 2,16 | 10,21 | 13,39 | 1,99 | 10,36 | 13,23 | 2,11 | 10,21 | 13,35 |

DIAMETRO 20mm PE80

Tabla A.12

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 2,05 | 10,58 | 12,57 | 2,01 | 10,45 | 12,35 | 2,15 | 10,55 | 12,02 | 2,11 | 9,55 | 12,08 |
| 1,96 | 11,44 | 15,19 | 1,85 | 10,2 | 13,24 | 1,75 | 11,17 | 13,54 | 1,66 | 11,25 | 13,27 |
| 1,98 | 10,66 | 14,87 | 1,87 | 10,56 | 12,38 | 2,13 | 10,65 | 12,08 | 2,15 | 9,65 | 12,67 |
| 2,04 | 11,02 | 14,01 | 1,99 | 10,55 | 12,45 | 2,17 | 10,85 | 13,15 | 1,69 | 9,87 | 12,55 |
| 1,97 | 11,25 | 14,15 | 1,93 | 11,02 | 13,02 | 1,78 | 10,56 | 13,25 | 1,75 | 10,02 | 12,11 |
| 2,08 | 11,37 | 16,02 | 1,95 | 11,25 | 13,28 | 1,99 | 10,78 | 14,25 | 1,89 | 10,65 | 13,15 |
| 2,01 | 12,05 | 15,05 | 1,94 | 11,32 | 14,03 | 1,85 | 11,02 | 14,05 | 1,98 | 10,33 | 13,22 |
| 1,99 | 12,55 | 15,14 | 2,03 | 11,15 | 14,06 | 1,74 | 11,05 | 12,99 | 1,65 | 11,05 | 12,26 |
| 2,03 | 12,37 | 15,01 | 2,01 | 11,36 | 14,25 | 2,14 | 11,13 | 14,54 | 1,66 | 11,15 | 13,08 |
| 1,98 | 12,09 | 14,99 | 1,98 | 11,56 | 14,11 | 2,05 | 11,16 | 14,35 | 2,01 | 11,24 | 13,26 |

DIAMETRO 20mm PE40

Tabla A.13

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,26 | 1,71 | 2,76 | 0,31 | 1,52 | 2,89 | 0,22 | 2,15 | 2,75 | 0,26 | 1,59 | 2,73 |
| 0,59 | 3,08 | 4,87 | 0,48 | 3,45 | 4,93 | 0,36 | 3,65 | 6,03 | 0,46 | 3,55 | 4,17 |
| 0,29 | 2,15 | 3,94 | 0,32 | 1,65 | 4,87 | 0,26 | 2,25 | 4,51 | 0,28 | 2,02 | 4,15 |
| 0,31 | 2,36 | 3,44 | 0,47 | 1,99 | 3,25 | 0,32 | 2,65 | 5,85 | 0,33 | 2,85 | 3,87 |
| 0,35 | 3,15 | 3,96 | 0,33 | 2,08 | 3,65 | 0,29 | 3,05 | 4,25 | 0,45 | 3,09 | 3,65 |
| 0,45 | 3,66 | 4,65 | 0,49 | 2,94 | 4,68 | 0,25 | 3,15 | 4,28 | 0,39 | 3,11 | 4,06 |
| 0,56 | 3,45 | 5,21 | 0,47 | 3,08 | 5,02 | 0,31 | 3,26 | 5,05 | 0,29 | 3,25 | 4,85 |
| 0,42 | 4,01 | 5,21 | 0,35 | 1,76 | 5,09 | 0,33 | 2,78 | 5,15 | 0,47 | 3,42 | 5,02 |
| 0,41 | 3,59 | 4,02 | 0,32 | 3,25 | 4,76 | 0,35 | 3,45 | 4,98 | 0,31 | 3,12 | 4,15 |
| 0,28 | 3,85 | 5,06 | 0,42 | 2,34 | 4,88 | 0,28 | 3,56 | 5,59 | 0,33 | 3,45 | 4,87 |

DIAMETRO 16 mm*Tabla A.14*

| Seccion1 | | | Seccion2 | | | Seccion3 | | | Seccion4 | | |
|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|----------|------|------|
| Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax | Ra | Rz | Rmax |
| 0,58 | 3,35 | 4,19 | 0,65 | 3,05 | 4,15 | 0,56 | 3,28 | 4,09 | 0,86 | 3,15 | 3,59 |
| 0,96 | 4,43 | 6,57 | 0,88 | 5,65 | 7,85 | 0,79 | 4,89 | 6,54 | 0,95 | 4,38 | 5,13 |
| 0,59 | 3,38 | 5,33 | 0,66 | 5,42 | 6,65 | 0,54 | 3,44 | 5,15 | 0,88 | 3,11 | 4,92 |
| 0,61 | 4,05 | 5,65 | 0,71 | 4,26 | 6,89 | 0,66 | 3,25 | 4,26 | 0,94 | 4,34 | 4,86 |
| 0,65 | 4,35 | 5,95 | 0,75 | 4,55 | 5,22 | 0,78 | 4,18 | 5,98 | 0,81 | 4,15 | 4,65 |
| 0,78 | 4,65 | 6,05 | 0,86 | 3,21 | 5,32 | 0,59 | 5,03 | 5,93 | 0,99 | 3,41 | 5,25 |
| 0,59 | 3,21 | 6,35 | 0,82 | 4,93 | 6,21 | 0,62 | 3,87 | 6,45 | 0,92 | 3,32 | 5,85 |
| 0,75 | 5,14 | 7,08 | 0,81 | 5,84 | 6,38 | 0,69 | 5,39 | 6,55 | 0,87 | 4,31 | 5,84 |
| 0,61 | 5,02 | 7,14 | 0,64 | 4,77 | 6,95 | 0,78 | 4,17 | 5,97 | 0,91 | 5,02 | 5,65 |
| 0,94 | 4,24 | 5,09 | 0,66 | 3,59 | 7,09 | 0,76 | 4,79 | 5,85 | 0,95 | 4,09 | 4,58 |

ANEXO B Compilado de resultados

Tabla B.1

| DIAMETRO (mm) | REF | Ks (μm) | Ks/D | f | Rh | C | n |
|------------------|---------|-------------------------|----------|--------|------|--------|-------|
| 16 | PE40 | 0.76 | 0.00005 | 0.011 | 4 | 84.47 | 0.015 |
| 20 | PE40 | 0.36 | 0.000018 | 0.014 | 5 | 74.87 | 0.017 |
| 20 | PE80 | 1.95 | 0.00010 | 0.020 | 5 | 62.64 | 0.021 |
| 25 | PE80 | 2.1 | 0.000084 | 0.019 | 6.25 | 64.27 | 0.021 |
| 32 | PE40(1) | 0.31 | 0.000010 | 0.012 | 8 | 80.87 | 0.017 |
| 32 | PE40 | 0.35 | 0.000011 | 0.012 | 8 | 80.87 | 0.017 |
| 32 | PE80 | 2.02 | 0.000063 | 0.175 | 8 | 21.18 | 0.067 |
| 50 | RDE11 | 1.12 | 0.000022 | 0.014 | 12.5 | 74.87 | 0.020 |
| 63 | RDE11 | 0.8 | 0.000013 | 0.008 | 15.8 | 99.05 | 0.016 |
| 75 | RDE11 | 1.03 | 0.000014 | 0.008 | 18.8 | 99.05 | 0.016 |
| 90 | RDE11 | 0.83 | 0.000009 | 0.008 | 22.5 | 99.05 | 0.017 |
| 160 | RDE11 | 0.69 | 0.000004 | 0.0075 | 40 | 102.29 | 0.018 |
| 200 | RDE11 | 1.9 | 0.000010 | 0.008 | 50 | 99.05 | 0.019 |
| 250 | RDE11 | 0.37 | 0.000001 | 0.006 | 62.5 | 114.37 | 0.017 |
| 315 | RDE11 | 0.74 | 0.000002 | 0.006 | 78.8 | 114.37 | 0.018 |

ANEXO C REGISTRO FOTOGRÀFICO

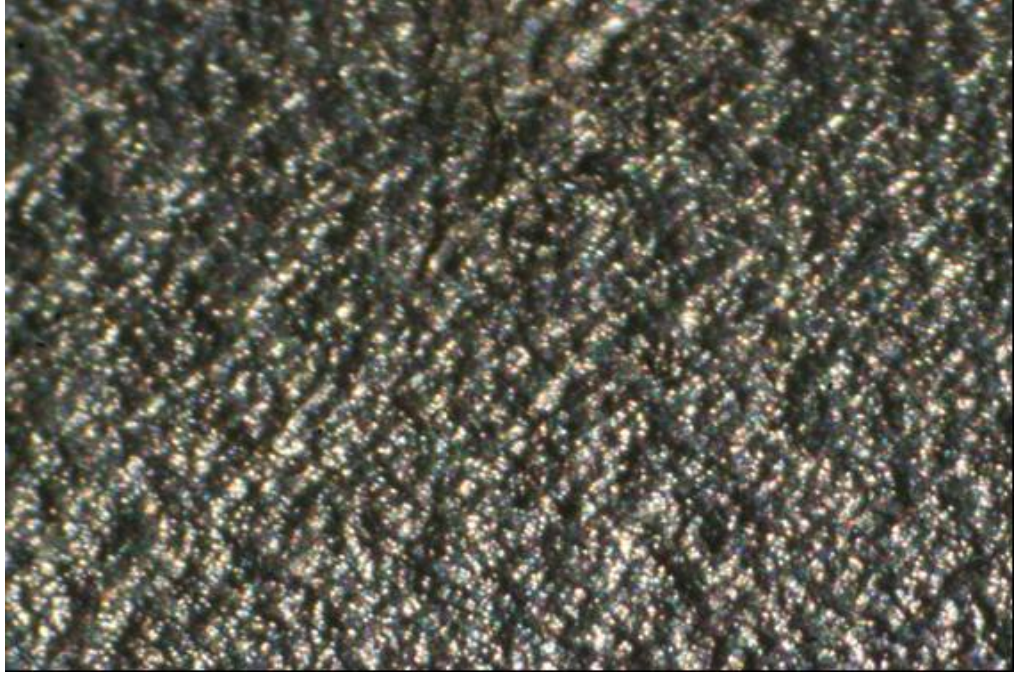


Imagen C.1 Tubería 32mm Sección 1 PE80 Aumento 30X



Imagen C.2 Tubería 32mm Sección 1 PE40 Aumento 30X

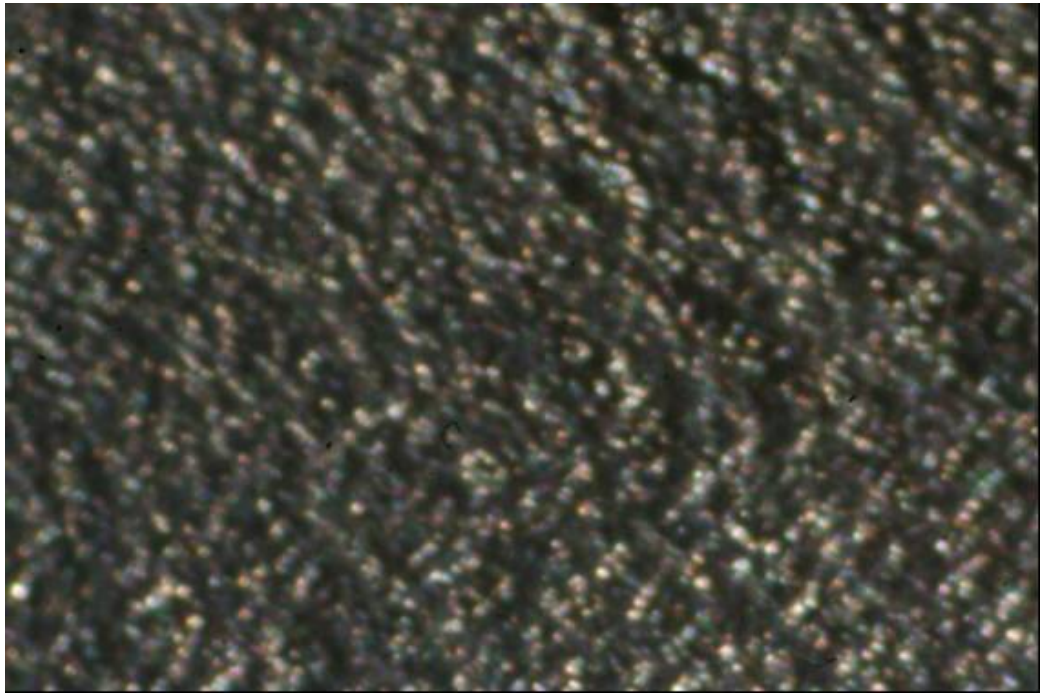


Imagen C.3 Tubería 20mm Sección 2 PE80 Aumento 30X



Imagen C.4 Tubería 20mm Sección 2 PE40 Aumento 30X