

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

“Caracterización experimental del factor de fricción y la rugosidad hidráulica en tuberías de acero al carbono con costura y sin costura”

**Tesis a fin de optar el grado de MAGISTER EN CIENCIAS con
mención en ENERGÍA**

AUTOR

JOEL MARTÍN LÓPEZ BONILLA

ASESOR

Dr. Luis Ricardo Chirinos García

JURADO

MSc. Enrique José Barrantes Peña

Dr. Julio César Cuisano Egúsqiza

**LIMA – PERÚ
2017**

Resumen

El presente trabajo pretende caracterizar experimentalmente el fenómeno de la pérdida de presión en dos tipos de tubería: acero al carbono con costura y acero al carbono sin costura, adquiridos en el mercado nacional peruano. Esta caracterización se realiza utilizando aire comprimido, seco y regulado para presiones manométricas entre 1 y 7 bar, bajo condiciones de incompresibilidad en la línea de pruebas y con un rango de número Reynolds entre 9×10^4 y 8×10^5 .

El trabajo comprende la determinación experimental del factor de fricción, mediante un ensayo de pérdida de presión, con la finalidad de comprobar que su comportamiento, para las dos tuberías, obedece al modelo monotónico de Colebrook que se suma a las afirmaciones de Kemler en 1933, Moody en 1944, Schlichting en 1979, Bradshaw en 2000, Perry en 2001 y Langelandsvik en 2008. Esto permite calcular la rugosidad hidráulica para los dos tipos de tubería, resultando que la tubería de acero al carbono con costura tiene una rugosidad hidráulica experimental igual a 0,186 mm, siendo el parámetro de rugosidad R_z y el modelo de Afzal en 2007, las mejores opciones para estimar el valor experimental. Del mismo modo, la tubería de acero al carbono sin costura tiene una rugosidad hidráulica experimental igual a 0,018 mm, siendo el parámetro de rugosidad R_q y los modelos de Langelandsvik en 2008 y Botros en 2016, las mejores opciones para estimar el valor experimental.

Así, es posible determinar, con mayor acercamiento, la rugosidad hidráulica (k_s) para las tuberías de acero al carbono con y sin costura, conociendo solamente los parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q). Además, se puede tener la seguridad de utilizar el modelo monotónico de Colebrook para realizar el cálculo del factor de fricción (λ). Con esto, la estimación de pérdida de presión y el gasto de energía involucrado es mucho más próximo a lo requerido.

Palabras clave: Factor de fricción, rugosidad hidráulica, pérdida de presión, tuberías.

Abstract

The present work expects characterize experimentally the phenomenon of pressure loss in two type of pipes: carbon steel with seam and carbon steel seamless, acquired in the Peruvian market. This characterization is done using compressed air, dry and regulated for gauge pressure among 1 and 7 bar, under incompressibility conditions in the test line and with a Reynolds Number range among 9×10^4 y 8×10^5 .

This work includes the experimental determination of the friction factor by a pressure loss test, with the purpose of verify that its behavior complies with the monotonic model of Colebrook, for both pipes, according with the statements of Kemler in 1933, Moody in 1944, Schlichting in 1979, Bradshaw in 2000, Perry in 2001 y Langelandsvik in 2008. This allows to calculate the hydraulic roughness for both type of pipes, the result suggest that the pipe of carbon steel with seam has an experimental hydraulic roughness equal to 0,186 mm, being the surface roughness parameter R_z and the Afzar model in 2007, the best options to estimate the experimental value. At the same way, the pipe of carbon steel seamless has an experimental hydraulic roughness equal to 0,018 mm, being the surface roughness parameter R_q and the Langelandsvik in 2008 and Botros in 2016 models, the best options to estimate the experimental value.

In this way, if the roughness surface parameters (R_a , R_z and R_q) is known, it is possible to determine, with more proximity, the hydraulic roughness (k_s) for pipes of carbon steel with seam and seamless. Besides, it is possible to have the certain to use the monotonic model of Colebrook to make the calculation of the friction factor (λ). Thus, the estimation of pressure loss and the expense of energy involve is closer what is really demand.

Keywords: Friction factor, hydraulic roughness, pressure loss, piping.



Dedicatoria

A mis abuelos: Cecilia (☆), Vilma y Darío, como muestra de mi infinita gratitud.

Agradecimiento

A mi asesor, el Dr. Luis Chirinos García, por su apoyo y paciencia durante el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Armando Blanco por compartir su experiencia mediante sus valiosas recomendaciones.

A los profesores, colegas y amigos del Laboratorio de Energía – PUCP; Ms. Enrique Barrantes, Ms. Ronald Mas, Tc. Broni Huamaní, Ing. David Enríquez, Ing. José Miguel Pérez, Ing. Giuliano Soria, Ing. Carlos Cabezas, Tc. Yhonattan Rodriguez, Srta. Rocío Retamozo; por su trabajo, sus recomendaciones y su aliento durante el desarrollo de este trabajo.

Al equipo del Laboratorio de Manufactura – PUCP (Ing. Jorge Fernández, Sr. Mónica Ugaz e Ing. Renato Espinoza) por permitirme realizar parte de los ensayos en sus instalaciones.

A mis amigos y familiares, por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

Introducción	iii
CAPÍTULO 1: Fundamentos Teóricos	6
1.1. Flujo viscoso en tuberías:	7
1.1.1. Ley de viscosidad de Newton:	7
1.1.2. Régimen de flujo:.....	9
1.1.4. Pérdida de presión:.....	11
1.2. Factor de fricción - λ :	13
1.2.1. Flujo Laminar:.....	14
1.2.2. Parámetros de escalamiento en la pared:.....	15
1.2.3. Función de rugosidad:	16
1.2.4. Flujo hidráulicamente liso:	17
1.2.5. Flujo en transición rugosa:.....	20
1.2.6. Flujo completamente rugoso:.....	30
1.3. Flujo desarrollado:	31
1.4. Rugosidad hidráulica - k_s :	32
1.5. Rugosidad superficial:	42
1.5.4. Rugosidad media aritmética - Ra :	42
1.5.5. Rugosidad media de pico y valle - Rz :	42
1.5.6. Rugosidad valor cuadrático medio (RMS) – Rq :.....	43
1.5.7. Skewness u oblicuidad de rugosidad – Sk :	43
CAPÍTULO 2: Metodología	44
2.1. Parámetros de ensayo:.....	44
2.1.1. Diámetro y material de las tuberías:	44
2.1.2. Fluido de prueba:.....	44
2.1.3. Longitud de la tubería de prueba:	45
2.2. Variables para la determinación del factor de fricción:	46
2.3. Banco de ensayos para determinación de rugosidad hidráulica:.....	47
2.3.1. Instalación:	47
2.3.2. Instrumentación	56
2.3.3. Sistema de adquisición de datos	64
2.3.4. Medida de diámetro interno de tuberías:.....	64
2.3.5. Medida de longitud de tuberías:.....	65
2.3.6. Procedimiento de ensayos:.....	65

2.4. Determinación de la rugosidad superficial:	67
CAPÍTULO 3: Procesamiento de Datos.....	73
3.1. Datos obtenidos:.....	73
3.1.1. Temperatura:.....	74
3.1.2. Presión manométrica al inicio de la tubería:	76
3.1.3. Pérdida de presión en la tubería:.....	78
3.1.4. Diferencia de presión en la placa orificio:.....	82
3.1.5. Diámetro de la tubería:	87
3.1.6. Longitud de la tubería:	89
3.2. Cálculo del factor de fricción:.....	90
3.2.1. Determinación de la densidad:	90
3.2.2. Determinación de la viscosidad:	95
3.2.3. Determinación del flujo volumétrico en la placa orificio:	97
3.2.4. Determinación de la velocidad media:	109
3.2.5. Determinación del número de Reynolds:	111
3.2.6. Determinación del número de Mach:	114
3.2.7. Determinación del factor de fricción:.....	117
3.3. Determinación de la rugosidad hidráulica:	120
3.4. Determinación de la rugosidad superficial:	126
3.5. Comparación con modelos de rugosidad hidráulica:.....	130
CONCLUSIONES.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	135
ANEXOS	
ANEXO 1: Esquema de la Instalación	
ANEXO 2: Hoja técnica del sensor de temperatura	
ANEXO 3: Hoja de calibración del sensor de temperatura	
ANEXO 4: Hoja técnica del sensor de presión manométrica	
ANEXO 5: Hoja de calibración del sensor de presión manométrica	
ANEXO 6: Hoja técnica del sensor de presión diferencial en la tubería	
ANEXO 7: Hoja de calibración del sensor de presión diferencial en la tubería	
ANEXO 8: Plano de fabricación de la placa orificio	
ANEXO 9: Hoja técnica del sensor de presión diferencial en la placa orificio	
ANEXO 10: Hoja técnica de los sensores de presión en la regulación.	

Lista de símbolos

τ	: Esfuerzo cortante (Pa)
u	: Velocidad (m/s)
μ	: Viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)
ρ	: Densidad de fluido (kg/m ³)
v	: Velocidad media del flujo (m/s)
d	: Diámetro interno de la tubería (m)
ν	: Viscosidad cinemática del fluido (m ² /s)
\dot{V}	: Flujo volumétrico
A_t	: Área transversal al flujo.
r	: Radio.
Δp	: Pérdida de presión.
g	: Gravedad (m/s ²).
λ	: Factor de fricción.
u_τ	: Fricción de velocidad
δ	: Escala de longitud viscosa
k_s^+	: Número de Reynolds de rugosidad hidráulica
U^+	: Velocidad local de flujo
y	: Distancia de la pared.
B	: Intercepto para flujo hidráulicamente liso
κ	: Constante de Von Karman
ΔU^+	: Función de rugosidad
λ_s	: λ para un flujo hidráulicamente liso considerando el mismo Re.
B'_{FR}	: Función de rugosidad de Nikuradse
Re	: Número de Reynolds
k_s	: Rugosidad hidráulica
le	: Longitud de desarrollo
S_k	: Oblicuidad de la rugosidad
Ra	: Rugosidad media aritmética
Rz	: Rugosidad media de pico y valle
Rq	: Rugosidad valor cuadrático medio (RMS)
l_1	: Distancia de la cara corriente arriba de la placa orificio
l_2	: Distancia de la cara corriente abajo de la placa orificio
d_o	: Diámetro del orificio de placa orificio.
d_{PL}	: Diámetro interior de la tubería que aloja a la placa orificio.
β	: Ratio de diámetros en la placa orificio.

l_c	: Longitud <i>cutoff</i> .
l_t	: Longitud de desplazamiento.
l_n	: Longitud de evaluación.
l	: Longitud de prueba para rugosidad superficial.
n	: Número de pruebas contenidas en l_n .
ε	: Error total de la medición.
ε_{al}	: Error aleatorio.
ε_{sis}	: Error sistemático.
σ	: Desviación estándar.
N	: Número de datos.
\bar{T}_{IN}	: Temperatura media del fluido, °C
P_{IN}	: Presión manométrica al inicio de la tubería, bar.
ΔP_{Tub}	: Pérdida de presión en la tubería, bar.
ΔP_{PI}	: Diferencia de presión en la placa orificio, kPa.
L	: Longitud de la tubería de pruebas, m
Z	: Coeficiente de compresibilidad, adimensional.
T_{IN}	: Temperatura al inicio de la tubería, °C.
R	: Constante particular para el aire = 287.1 J/kgK
E	: Factor de expansión, adimensional.
p_{PL}	: Presión absoluta antes de la placa orificio
κ	: Exponente isoentrópico del aire = 1.4.
\dot{m}	: Flujo másico, kg/s.
Cd	: Coeficiente de descarga, adimensional.
Ma	: Número de Mach
CS- WS:	Acero al carbono con costura
CS- WS:	Acero al carbono sin costura

Subíndices:

w	: Sobre la pared
a	: Actual
N	: Normal
m	: Valor medio

Lista de tablas

Tabla 1.1	: Escala temporal del fluido viscoso.
Tabla 1.2	: Escala temporal de la pérdida de presión.
Tabla 1.3	: Resumen de modelos de λ para flujo hidráulicamente liso.
Tabla 1.4	: Rugosidad hidráulica para tuberías según la fuente bibliográfica.
Tabla 2.1	: Condiciones de ensayo para diferentes flujos.
Tabla 2.2	: Condiciones referenciales de ensayo para diferentes flujos
Tabla 2.3	: Datos técnicos del compresor de tornillo Atlas Copco.
Tabla 2.4	: Datos técnicos del secador de aire Atlas Copco.
Tabla 2.5	: Datos técnicos de los filtros
Tabla 2.6	: Datos técnicos del sensor de temperatura.
Tabla 2.7	: Datos técnicos del sensor de presión manométrica
Tabla 2.8	: Datos técnicos del sensor de presión diferencial.
Tabla 2.9	: Datos técnicos de la placa orificio.
Tabla 2.10	: Datos técnicos del calibre de Vernier.
Tabla 2.11	: Datos técnicos del transmisor de presión diferencial.
Tabla 2.12	: Datos técnicos del sensor del sensor de flujo.
Tabla 2.13	: Datos técnicos del registrador de datos.
Tabla 2.14	: Datos técnicos del micrómetro de interiores.
Tabla 2.15	: Datos técnicos del flexómetro
Tabla 2.16	: Aperturas para la válvula reguladora de caudal.
Tabla 2.17	: Determinación del Cutoff
Tabla 2.18	: Determinación de la longitud de pruebas
Tabla 2.19	: Resumen de parámetros de medición de rugosidad superficial.
Tabla 3.1	: Número de aperturas evaluadas para cada material.
Tabla 3.2	: Medida del diámetro de la tubería CS-SL
Tabla 3.3	: Medida del diámetro de la tubería CS-WS
Tabla 3.4	: Medida de la longitud de la tubería CS-SL
Tabla 3.5	: Medida de la longitud de la tubería CS-WS
Tabla 3.6	: Medición del diámetro del orificio de la placa.
Tabla 3.7	: Medición del diámetro de la tubería 1½ in.
Tabla 3.8	: Rugosidad hidráulica para los dos materiales evaluados.
Tabla 3.9	: Medición de rugosidad superficial.
Tabla 3.10	: Fuentes para contrastar la rugosidad hidráulica.

Lista de figuras

- Fig. 1.1** : Fluido entre placas paralelas.
- Fig. 1.2** : Fluidos newtonianos.
- Fig. 1.3** : Velocidad en el punto A del volumen de fluido en el tiempo.
- Fig. 1.4** : Perfiles de velocidad.
- Fig. 1.5** : Diagrama de cuerpo libre a un volumen de fluido.
- Fig. 1.6** : Factor de fricción en función del nivel de turbulencia y condición rugosa.
- Fig. 1.7** : (a) Factor de fricción para flujo laminar. Curva teórica. (b) Datos experimentales de la Universidad de Oregon.
- Fig. 1.8** : Función de rugosidad versus número de Reynolds de rugosidad para la transición rugosa inflexional y monotónica.
- Fig. 1.9** : (a) Flujo hidráulicamente liso en tubería lisa. (b) Flujo hidráulicamente liso en tubería rugosa.
- Fig. 1.10** : Validación experimental de la ecuación 1.21, ▲, Princeton; □, Oregon.
- Fig. 1.11** : Flujo en transición rugosa.
- Fig. 1.12** : Factor de fricción para la transición rugosa inflexional y monotónica.
- Fig. 1.13** : Factor de fricción evaluado por J. Nikuradse (1933).
- Fig. 1.14** : Función de rugosidad de la transición rugosa de varias superficies.
- Fig. 1.15** : Factor de fricción evaluado por Shockling et al.
- Fig. 1.16** : Función de rugosidad y número de Reynolds de rugosidad evaluados por Schultz y Flack (2007).
- Fig. 1.17** : Comparación del factor de fricción para las tuberías evaluadas por E. Sletfjerding (1999) y Shockling (2006) con la ecuaciones 1.31 (Inflexional) y la ecuación monotónica de Colebrook.
- Fig. 1.18** : Comparación del factor de fricción para las tuberías evaluadas por Shockling (2006) y Nikuradse (1933) con la ecuación 1.31 (Inflexional) y la ecuación monotónica de Colebrook.
- Fig. 1.19** : Función de rugosidad para las tuberías evaluadas por E. Sletfjerding (1999), Shockling (2006) y J. Nikuradse (1933).
- Fig. 1.20** : Ley de transición de Colebrook determinada experimental y teóricamente para varias superficies rugosas.
- Fig. 1.21** : Gráfico de L. F. Moody.
- Fig. 1.22** : Factor de fricción evaluado por Langelandsviki, et al. (2008). ○, experimental; —, flujo hidráulicamente liso (Ec. 1.21); ---, ecuación de Colebrook (1939) (Ec.1.23) para $k_s=8 \mu\text{m}$, ···, ecuación de Colebrook para $k_s=15 \mu\text{m}$.

- Fig. 1.23** : Factor de fricción evaluado por Shockling (2006) y la predicción según la Ec.1.36.
- Fig. 1.24** : Flujo completamente rugoso.
- Fig.1.25** : Distribución de la presión a lo largo de tubería.
- Fig.1.26** : Rugosidad relativa para tuberías nuevas y limpias.
- Fig. 1.27** : Comparación de predicción de la rugosidad hidráulica y la rugosidad experimental.
- Fig. 1.28** : Comparación de predicción de la rugosidad hidráulica y la rugosidad experimental.
- Fig. 1.29** : Resultados experimentales de la rugosidad equivalente según el modelo de Colebrook (k_s) y el parámetro de rugosidad de superficie (Rq).
- Fig. 1.30** : Resultados experimentales de la rugosidad equivalente según el modelo de Nikuradse (k_s) y el parámetro de rugosidad de superficie (Rq).
- Fig. 1.31** : Resultados experimentales de la rugosidad equivalente según el modelo de Colebrook (k_s) y el parámetro de rugosidad de superficie (Rq). Tomado de Botros y Shouman (2016)
- Fig. 1.32** : Comparación de la rugosidad hidráulica relativa para tuberías revestidas, tuberías comerciales y tuberías laminadas. (Tomado de F. Frashad et al., 2016)
- Fig. 1.33** : Nuevo gráfico de rugosidad hidráulica de Farshad para tuberías comunes.
- Fig. 1.34** : Predicción de la rugosidad hidráulica según N. Afzal y rugosidad superficial, utilizando la data de Sletfjetding y Gudmundson (2003).
- Fig. 1.35** : Rugosidad media aritmética.
- Fig. 1.36** : Rugosidad media pico y valle.
- Fig. 2.1** : Estación de compresión
- Fig. 2.2** : Compresor de tornillo.
- Fig. 2.3** : Secador de aire.
- Fig. 2.4** : Arreglo de filtros y secador.
- Fig. 2.6** : Tanque de 1.0 m³.
- Fig. 2.7** : Tanque de 0.7 m³.
- Fig. 2.8** : Esquema del arreglo de tanques.
- Fig. 2.9** : Tanques y sistema de tuberías
- Fig. 2.10** : Curva de caudal para regulador de presión.
- Fig. 2.11** : Instalación de regulación de presión.
- Fig. 2.12** : Esquema de instalación de regulación de presión.
- Fig. 2.13** : Línea de pruebas

- Fig. 2.14** : Válvula de globo.
- Fig. 2.15** : Instalación de línea de pruebas
- Fig. 2.16** : Sensor de temperatura instalado.
- Fig. 2.17** : Longitud de desarrollo.
- Fig. 2.18** : Toma de presión.
- Fig. 2.19** : Toma de presión del sensor de presión manométrica.
- Fig. 2.20** : Sensor de presión diferencial instalado.
- Fig. 2.21** : Longitudes a las tomas de presión.
- Fig.2.22** : Instalación de placa orificio.
- Fig. 2.23** : Rugosímetro MarSurf PS1.
- Fig. 2.24** : Parámetros de medición de rugosidad superficial.
- Fig. 2.25** : Izquierda: Probetas de acero al carbono sin costura (CS SL), derecha: Probetas de acero al carbono con costura (CS WS).
- Fig. 2.26** : Arriba: Zonas de medida de rugosidad en las tuberías CS SL, abajo: Zonas de medida de rugosidad en las tuberías CS WS.
- Fig. 2.27** : Imágenes del ensayo de rugosidad superficial.
- Fig. 3.1** : Medición de la temperatura para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig. 3.2** : Medición de la temperatura para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig. 3.3** : Medición de la presión manométrica al inicio de la tubería para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig. 3.4** : Medición de la presión manométrica al inicio de la tubería para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig. 3.5** : Medición de la presión diferencial en la tubería para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig. 3.6** : Medición de la presión diferencial en la tubería para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig. 3.7** : Medición de la presión diferencial en la placa orificio para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

- Fig. 3.8** : Medición de la presión diferencial en la placa orificio para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.9** : Determinación del coeficiente de compresibilidad Z para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.10** : Determinación del coeficiente de compresibilidad Z para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.11** : Determinación de la densidad para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.12** : Determinación de la densidad para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.13** : Determinación de la viscosidad dinámica para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.14** : Determinación de la viscosidad dinámica para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.15** : Determinación del coeficiente de expansión E para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.16** : Determinación del coeficiente de expansión E para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig. 3.17** : Diagrama de flujo para la determinación de C_d .
- Fig.3.18** : Determinación del coeficiente de descarga C_d para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.19** : Determinación del coeficiente de descarga C_d para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.20** : Determinación del flujo másico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.21** : Determinación del flujo másico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

- Fig.3.22** : Determinación del flujo volumétrico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.23** : Determinación del flujo volumétrico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.24** : Coeficiente de descarga en función del flujo volumétrico utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.25** : Coeficiente de descarga en función del flujo volumétrico utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.26** : Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.27** : Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.28** : Determinación de la velocidad media para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.29** : Determinación de la velocidad media para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.30** : Determinación del número de Reynolds para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.31** : Determinación del número de Reynolds para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.32** : Flujo volumétrico en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.33** : Flujo volumétrico en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.34** : Pérdida de presión en la tubería en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.35** : Pérdida de presión en la tubería en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.36** : Determinación del número de Mach para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

- Fig.3.37** : Determinación del número de Mach para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.38** : Número de Mach en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.39** : Número de Mach en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.40** : Determinación del factor de fricción para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.41** : Determinación del factor de fricción para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig.3.42** : Determinación de la rugosidad hidráulica para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL), evaluada con cuatro condiciones de presión de línea.
- Fig.3.43** : Determinación de la rugosidad hidráulica para la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS), evaluada con cuatro condiciones de presión de línea.
- Fig.3.44** : Comparación del factor de fricción experimental (ϕ) con el modelo monotónico de Colebrook para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig.3.45** : Comparación del factor de fricción experimental (ϕ) con el modelo monotónico de Colebrook para la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig. 3.46** : Medición los parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q) en la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL).
- Fig. 3.47** : Medición los parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q) en la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS).
- Fig. 3.48** : Comparación de la rugosidad hidráulica (k_s) de la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL) respecto de sus parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q) y los modelos para determinar k_s .
- Fig. 3.49** : Comparación de la rugosidad hidráulica (k_s) de la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS) respecto de sus parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q) y los modelos para determinar k_s .

Introducción

Esta investigación yace en el estudio del transporte de fluidos a través de tuberías, específicamente sobre el efecto de pérdida de presión por fricción en tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS) y sin costura (CS-SL). La pérdida de presión en tuberías es un fenómeno que ha sido ampliamente estudiado y su determinación, generalmente mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, es imprescindible en los diseños de sistemas de transporte de diversos fluidos, pues dependiendo de su magnitud se determina la cantidad de energía de suministro en sistemas de transporte de líquidos y gases.

Una variable determinante en la ecuación de Darcy-Weisbach es el factor de fricción (λ). Este ha sido estudiado por numerosos investigadores, quienes lo han definido según su naturaleza hidráulica (e.g. Hagen – Pouseuille (1840) para flujo laminar; Nikuradse – Prandtl – Karman, Blasius (1913), Brkic (2011), Zaragola y Smits (1998) y McKeon et al. (2005) para flujo hidráulicamente liso; Nikuradse (1933), Colebrook (1939), Moody (1944), Schlichting (1979), Sletfjerding (1999), P. Bradshaw (2000), Shockling et al. (2006), Schultz y Flack (2007), Langelandsvik et al. (2008), entre otros para flujo en transición rugosa; Nikuradse (1933) para flujo completamente rugoso). Estas investigaciones muestran correlaciones teórico-experimentales para determinar el factor de fricción (λ) en función del Número de Reynolds, el diámetro interno de la tubería y su rugosidad hidráulica. La rugosidad hidráulica (k_s) es un parámetro dependiente de la rugosidad superficial de la tubería. Algunas investigaciones, como la de Nikuradse (1933) han trabajado con rugosidades regulares de manera artificial utilizando granos de arena, de donde se conoce a la rugosidad hidráulica como rugosidad de grano de arena. Otras fuentes, tales como Shettfjerding (1999) o Langelandsvik et al. (2008), han utilizado tuberías reales que suelen tener superficies rugosas irregulares, propias del proceso de manufactura por el que han sido fabricadas (laminado en frío o caliente con soldadura, extrusión, forjado, etc.). Dado

que la rugosidad hidráulica no se ha determinado de manera generalizada, se han realizado algunos estudios experimentales para generar tablas de rugosidades hidráulicas para algunas tuberías específicas, como la que muestra el trabajo de Moody (1944). Además, se han definido modelos que relacionan matemática y/o experimentalmente k_s con los parámetros de rugosidad superficial: (i) rugosidad media aritmética (Ra), (ii) rugosidad media de pico y valle (Rz) y (iii) rugosidad de valor cuadrático medio (Rq).

A nivel nacional, se usa una gran variedad de materiales para tuberías para diversas aplicaciones desde sistemas de bombeo de agua potable, agua de servicio en industrias, fluidos sanitarios, así como sistemas de compresión de aire y gases. En este contexto, el material más utilizado es el acero al carbono, por extrusión (sin costura) o laminado y soldado por electrofusión (con costura).

Estos sistemas de bombeo, compresión y gravimétricos son dimensionados, en su gran mayoría, utilizando como referencia la información del *Engineering Data Book* del *Hydraulic Institute* (1990). Esta referencia indica una rugosidad hidráulica para acero comercial, denominación que se le atribuye indistintamente a los dos tipos de tubería, acero al carbono con y sin costura. Además, dicha información fue extraída de la publicación de L.F. Moody que data de 1944. Es claro que los efectos de fricción no son iguales a entre una tuberías con costura frente a otra sin costura y que los procesos de manufactura son diferentes en la actualidad, luego de más de 70 años de la publicación de Moody. En el mismo sentido, según la bibliografía estudiada, para definir el factor de fricción existen dos modelos: el inflexional (*inflexional*), cuyo mayor exponente es J. Nikuradse y el modelo monótonico (*monotonic*) representado por C.F. Colebrook, aunque el modelo monótonico se ha extendido de tal manera que en la mayoría de los diseño se dimensiona el factor de fricción directamente utilizando dicho modelo, sin ser necesariamente el correcto.

Estas imprecisiones en la determinación de la rugosidad hidráulica, produce un error de sobre o sub dimensionamiento en la determinación del factor de fricción, lo cual influye notoriamente en el cálculo de la pérdida de presión. Así, el dimensionamiento y selección de equipos en sistemas de bombeo, sistemas gravimétricos o sistemas de compresión puede estar errado, haciendo uso excesivo o deficiente de la energía respecto a lo que realmente se requiere.

El presente trabajo pretende solucionar este problema, centrándose en tuberías de acero al carbono con costura y sin costura adquiridas en el mercado nacional. Para esto se determinará experimentalmente el factor de fricción, se analizará su tendencia en función del número de Reynolds, para determinar si se ajustan al modelo monótonico o inflexional. Con esto, se determinará experimentalmente la rugosidad hidráulica de cada tubería (k_s), además de medir los parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q). Esto permite comparar k_s con cada parámetro de rugosidad superficial y además compararla con los modelos de k_s propuestos a la fecha. De esta manera se podrá establecer una recomendación para saber qué modelo o parámetro es el más conveniente a usar para determinar la rugosidad hidráulica, teniendo como información la medida de los parámetros de rugosidad superficial que pueden ser medidos con un rugosímetro de superficies.

Para determinar la rugosidad hidráulica se realiza un ensayo de pérdida de presión utilizando aire en condiciones de incompresibilidad (Número de Mach < 0.2), en un rango de número de Reynolds aproximado de $9 \times 10^4 - 8 \times 10^5$. Los parámetros a medir son los siguientes: presión manométrica y temperatura del fluido al inicio de la tubería, pérdida de presión en la tubería, el flujo másico de aire que circula al interior de la tubería, el diámetro y la longitud de la tubería. Estos datos permiten calcular el factor de fricción, de donde se puede inferir el tipo de modelo (monótonico o inflexional) que le corresponde. Dependiendo del modelo, se escoge la ecuación que determina la rugosidad hidráulica. Respecto a los parámetros de rugosidad superficial Para

determinar los parámetros de rugosidad superficial se utiliza un rugosímetro de superficies.

Los resultados del presente trabajo contribuyen en los siguientes aspectos: (i) incrementar el conocimiento sobre el fenómeno de pérdida de presión del flujo de fluido transportados por tuberías, (ii) caracterizar el factor de fricción para las tuberías de acero al carbono con costura y sin costura, (iii) conocer la rugosidad hidráulica experimental de las dos tuberías e (iv) identificar los modelos existentes que mejor correlacionan con el valor experimental de k_s . Así, permiten estimar de mejor manera la pérdida de presión de un flujo que atraviesa este tipo de tuberías, aproximándose a la energía óptima necesaria para el transporte de dicho fluido.



Hipótesis

El factor de fricción de un flujo de fluido que circula por una tubería de acero al carbono con costura o sin costura se puede determinar experimentalmente, demostrando que sigue una tendencia inflexional o monotónica. Esto permite determinar la rugosidad hidráulica de cada tubería y contrastarla los parámetros de rugosidad superficial y modelos existentes, a fin de recomendar la mejor estimación.

Objetivos Generales

Caracterizar el factor de fricción y la rugosidad hidráulica en tuberías de acero al carbono con costura y sin costura.

Objetivos Específicos

- Identificar los modelos de factor de fricción y rugosidad hidráulica.
- Diseñar el modelo conceptual de la experimentación.
- Implementar equipos, instrumentación y protocolos de ensayo.
- Realizar la experiencia de pérdida de presión con cada una de las tuberías.
- Calcular el factor de fricción experimental y determinar el modelo que mejor define su comportamiento.
- Determinar la rugosidad hidráulica correspondiente a las dos tuberías evaluadas.
- Realizar el tratamiento de la incertidumbre para todos los cálculos.
- Medir los parámetros de rugosidad superficial de las dos tuberías.
- Contrastar la rugosidad hidráulica de cada tubería con los parámetros de rugosidad superficial y con los modelos de rugosidad hidráulica existentes, a fin de generar una recomendación.

CAPÍTULO 1 Fundamentos Teóricos

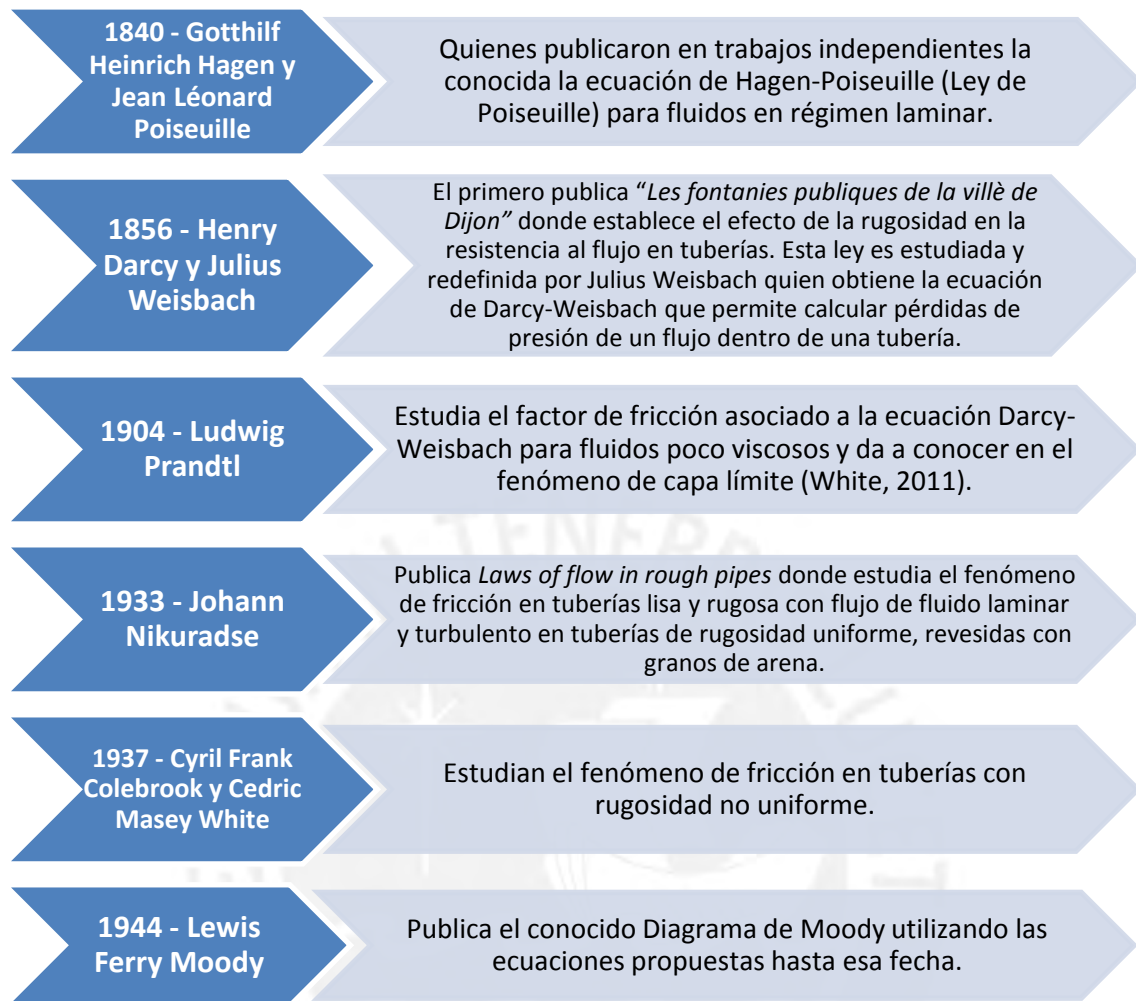
Dentro del estudio y desarrollo de la mecánica de fluidos, el flujo de fluido viscoso ha sido un tema bastante estudiado, dicho desarrollo de conocimiento se puede ver en la siguiente escala temporal:

Tabla 1.1: Escala temporal del fluido viscoso.

1502 - Leonardo Da Vinci	Ecuación de conservación de masa en una dimensión para un flujo estacionario (Schaschke, 1998).
1687 - Isaac Newton	Leyes de movimiento y la ley de viscosidad de fluidos newtonianos, sin tomar en cuenta los la fricción. (Sonin, 2001)
1738 y 1750 - Daniel Bernoulli y Leonhard Euler	El primero publica el principio de Bernoulli en <i>Hydrodynamica</i> (Munson, 2009) y el segundo desarrolla las ecuaciones diferenciales de movimiento y su forma integral conocida como la ecuación de Bernoulli (White, 2011)
1822 y 1847 - Claude-L. Navier y George G. Stokes	El primero introduce ecuaciones para flujo homogéneo incompresible y el segundo publica las ecuaciones de Navier – Stokes, que definen y cuantifican el movimiento de los fluidos incluyendo los términos viscosos newtonianos (Joseph, 2005)
1833 - Osborne Reynolds	Experimenta los regímenes de flujo y los cuantifica con el conocido número adimensional de Reynolds (White, 2011)

Respecto al fenómeno de pérdida de presión en flujo de fluido viscoso dentro de tuberías, se tiene también la siguiente escala temporal que expone el desarrollo del conocimiento hasta la concepción del conocido diagrama de Moody. Toda esta evolución del conocimiento, incluyendo trabajos más recientes, corresponden al desarrollo del presente capítulo.

Tabla 1.2: Escala temporal de la pérdida de presión.



En el presente capítulo, se expondrán todos fundamentos teóricos respecto al flujo de fluido viscoso de dentro de una tubería, el factor de fricción, la rugosidad hidráulica o de grano de arena y su interacción con la rugosidad superficial interna en las tuberías.

1.1. Flujo viscoso en tuberías:

1.1.1. Ley de viscosidad de Newton:

Isaac Newton (1687) define que existe una relación directamente proporcional entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad¹. (Ec. 1.1) Esta relación se desprende del análisis sobre dos placas paralelas que alojan un fluido entre ellas, tal como lo muestra la figura 1.1. Cuando la placa superior se desplaza

¹ Gradiente de velocidad o ratio de corte define como cambia la velocidad en función de la distancia y .

con una velocidad determinada genera esfuerzos cortantes y desplazamientos paralelos a menor velocidad en cada capa de fluido. Para $y = 0$, la velocidad del fluido es nula y el esfuerzo cortante es máximo, mientras que cuando $y = b$ la velocidad se hace máxima ($\frac{du}{dy} = 0$), por tanto es esfuerzo cortante se hace nulo.

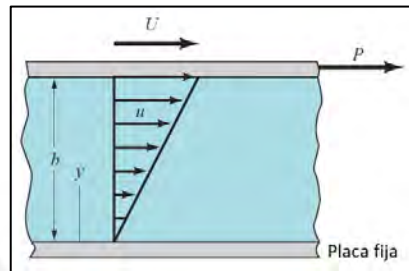


Fig. 1.1: Fluido entre placas paralelas. (Adaptado de Munson 2009)

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (\text{Ec.1.1})$$

Donde:

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)
- u : Velocidad (m/s)
- y : Posición (m)
- μ : Viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)

Si el comportamiento entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad es lineal, la viscosidad dinámica (μ) es constante y el fluido se conoce como fluido newtoniano según lo muestra la figura 1.2. Cualquier otro comportamiento de la viscosidad, caracterizará un fluido no newtoniano (plástico Bingham o pseudoplástico).

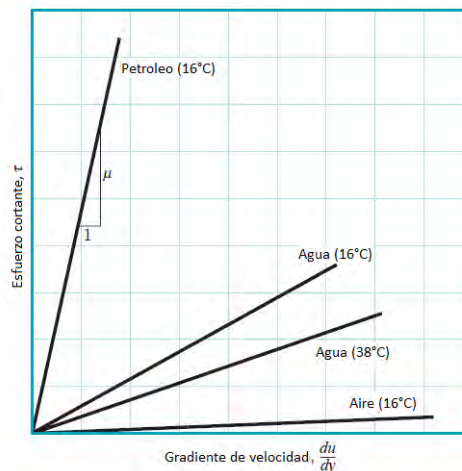


Fig. 1.2: Fluidos newtonianos. (Adaptado de Munson 2009)

1.1.2. Régimen de flujo:

Como parte de la dinámica de un fluido dentro de una tubería se puede observar que cuando los fluidos poseen viscosidad, existe un rozamiento interior que origina tensiones tangenciales entre las capas del fluido. Este fenómeno origina que los fluidos bajo determinadas condiciones, pueden estar en régimen laminar, transitorio o turbulento.

Osborne Reynolds (1842-1912) distingue esta diferencia de regímenes de flujo mediante la experimentación. Con la intención de cuantificar el nivel de turbulencia propuso un número adimensional que ahora se conoce como el número de Reynolds y se define como el ratio entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un flujo de fluido. El número Reynolds, ver ecuación 1.2, depende la densidad y viscosidad dinámica del fluido, una longitud característica, que en el caso de tuberías circulares es el diámetro interno y la velocidad media del flujo.

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} = \frac{v \times d}{\nu} \quad (\text{Ec.1.2})$$

Donde:

- ρ : Densidad de fluido (kg/m^3)
- v : Velocidad media del flujo (m/s)
- d : Diámetro interno de la tubería (m)
- μ : Viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- ν : Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

A. Flujo laminar:

Los fluidos laminares tienen un comportamiento uniforme, el flujo se desplaza en láminas paralelas que no se mezclan entre sí y cada partícula de fluido sigue una trayectoria ordenada, de modo que la velocidad en un punto de volumen es constante en el tiempo (ver figura 1.3), la velocidad en un fluido laminar tiene un solo componente \hat{i} . (Munson, 2009)

B. Flujo transitorio:

Este régimen es el más común en las aplicaciones de ingeniería; sin embargo, no es fácil de definir, dado que el fluido pasa de un régimen ordenado a otro totalmente caótico. Por tanto, es un tema de investigación de gran importancia en función de mejorar la precisión de las ecuaciones que lo gobiernan.

C. Flujo turbulento:

En contraste, los fluidos turbulentos se caracterizan porque las partículas viajan de manera caótica, debido a que las capas de fluido se cruzan, sin conservar su individualidad. De esta forma, la velocidad en un punto del volumen de fluido a lo largo del tiempo es variable y la velocidad para un diferencial de volumen se va a descomponer en tres direcciones, reflejadas por los vectores unitarios: \hat{i} , \hat{j} y \hat{k} .

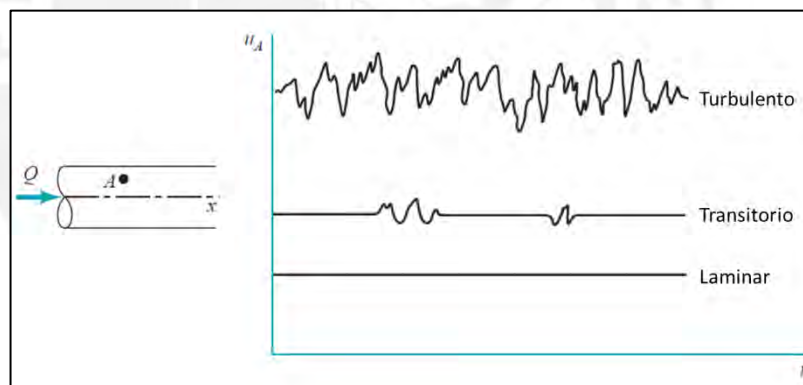


Fig.1.3: Velocidad en el punto A del volumen de fluido en el tiempo. (Tomado de Munson, 2009)

D. Perfil de velocidad:

La magnitud de la velocidad de un fluido no es constante dentro de una sección transversal al flujo, sino que toma patrones según el régimen de flujo como se ve en la figura 1.4. Para cualquier régimen, la velocidad máxima se encuentra en el eje del ducto y va descendiendo hasta volverse cero cuando encuentra la capa límite en las paredes del mismo. El nivel de turbulencia que tiene el fluido genera una transferencia de momento entre

las moléculas de fluido que resulta en una distribución más uniforme para el régimen laminar y más caótica para el régimen turbulento, dado que en el régimen laminar las capas de fluido no se mezclan, el perfil de velocidad se hace parabólico, mientras que el régimen turbulento la interacción entre capas producen un perfil con menos gradiente de velocidad.

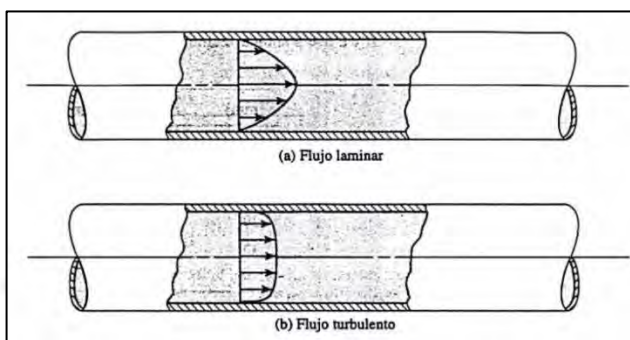


Fig.1.4: Perfiles de velocidad. (Tomado de Mott, 1996)

Sin embargo, para cuantificar la velocidad de un fluido que atraviesa una sección, se considera una velocidad media que surge de dividir el caudal sobre el área transversal al flujo (Ec. 1.3).

$$v = \frac{\dot{V}}{At} \quad (\text{Ec.1.3})$$

1.1.4 Pérdida de presión:

Para entender el estudio de la pérdida de presión en un flujo viscoso que atraviesa una tubería, se considera un flujo laminar de fluido newtoniano. Si se aísla un elemento de volumen cilíndrico de este flujo, se puede notar que se desarrollan esfuerzos cortantes debido al efecto viscoso del fluido. Estos esfuerzos a lo largo de una longitud (l) conducen a una pérdida de presión (Δp) en el fluido. En el diagrama de cuerpo libre de la figura 1.5 se muestran las fuerzas sobre el elemento de volumen.

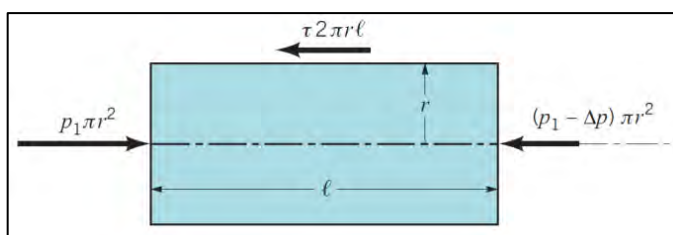


Fig. 1.5: Diagrama de cuerpo libre a un volumen de fluido.

Luego de aplicar la segunda ley de Newton sobre este diagrama de cuerpo libre, se despeja:

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{2 \cdot \tau}{r} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Donde:

- l : Longitud
- r : Radio.
- Δp : Pérdida de presión.
- τ : Esfuerzo de cizallamiento.

Luego, en una tubería de diámetro (d), el esfuerzo cortante tiene la siguiente distribución, en función del radio.

$$\tau = \frac{2 \cdot \tau_w \cdot r}{d} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde:

- τ_w : Esfuerzo cortante en las paredes de la tubería
- d : Diámetro interno de la tubería

De las ecuaciones 1.4 y 1.5, se obtiene una relación entre la pérdida de presión y el esfuerzo cortante en las paredes:

$$\Delta p = \frac{4 \cdot l \cdot \tau_w}{d} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Dado que el fluido es newtoniano, el esfuerzo cortante se obtiene de la ley de viscosidad de Newton, pero en coordenadas cilíndricas (Ec.1.7).

$$\tau = -\mu \cdot \frac{du}{dr} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Despejando la velocidad u e integrándola en función de r , tomando la consideración de que para $u = 0$, $r = d/2$. Se tiene la distribución de velocidad en un perfil de flujo laminar newtoniano:

$$u(r) = \left(\frac{\Delta p \cdot d^2}{16 \cdot \mu \cdot l} \right) \left[1 - \left(\frac{2 \cdot r}{d} \right)^2 \right] \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Al integrar esta distribución de velocidad en función de un diferencial de área en toda la sección transversal al flujo, se obtiene el caudal circulante que define la ley de Hagen – Pouseuille (1840):

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128 \cdot \mu \cdot l} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Despejando la pérdida de presión de la ecuación 1.9 en función de la velocidad

media $\left(V = \frac{\dot{V}}{\pi d^2/4} \right)$:

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \mu \cdot l \cdot V}{d^2} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

La ecuación 1.10 se puede generalizar para fluidos laminares, transitorios y turbulentos considerando un factor de fricción según la ecuación de Darcy Weisbach (Ec. 1.11).

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Pa}) \quad (\text{Ec. 1.11})$$

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \times g} \quad (\text{m.c.a})$$

Donde:

λ = Factor de fricción.

L = Longitud de la tubería (m).

d = Diámetro interior de la tubería (m).

v = Velocidad media (m/s).

ρ = Densidad del fluido (kg/m³)

g = Gravedad (m/s²).

La ecuación de Darcy Weisbach define el método más usado para determinar pérdidas de presión en tuberías y para esto requiere cierta información sobre las propiedades termofísicas del fluido, la geometría de la tubería por donde circula el fluido, así como la velocidad del flujo y la gravedad.

1.2 Factor de fricción - λ :

También conocido como factor de Darcy, este factor depende del régimen de flujo. Se puede definir en función de la pérdida de presión, despejando la ecuación 1.11, según la ecuación 1.12. Sin embargo, cuando lo que se precisa es determinar la pérdida de presión, el factor de fricción se define en función de su nivel de turbulencia o rugosidad hidráulica (ver figura 1.6): régimen de turbulencia laminar, condición rugosa hidráulicamente lisa, condición rugosa

en transición y nivel de turbulencia totalmente turbulento, equivalente a la condición completamente rugosa.

$$\lambda = \frac{\Delta p}{L} \times d \cdot \frac{2}{v^2 \times \rho} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

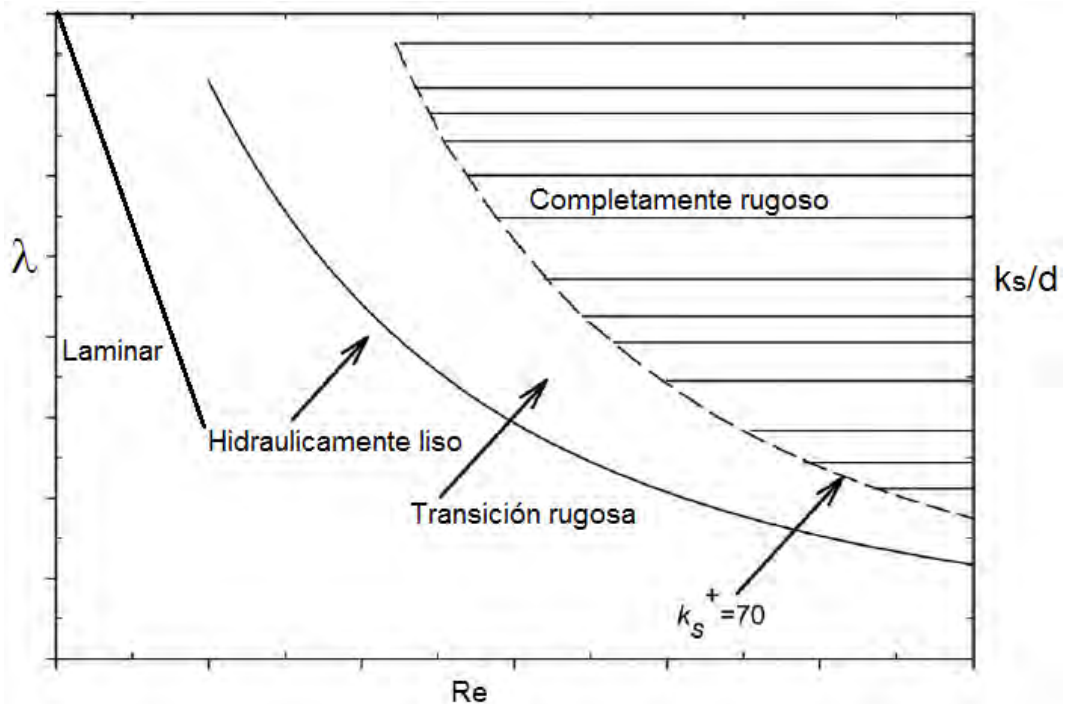


Fig. 1.6: Factor de fricción en función del nivel de turbulencia y condición rugosa. (Adaptado de Flack and Schultz, 2014)

1.2.1 Flujo Laminar:

Si se trata de un flujo laminar, el factor de fricción es totalmente dependiente del número de Reynolds, la determinación se realiza con una ecuación totalmente teórica (Ec.1.13) que se desprende de la ley de Hagen – Pouseuille (Ec. 1.9).

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

De esta manera, el factor de fricción mantiene una función lineal con el número de Reynolds y es independiente de la rugosidad de la tubería, como lo muestra la figura 1.7.

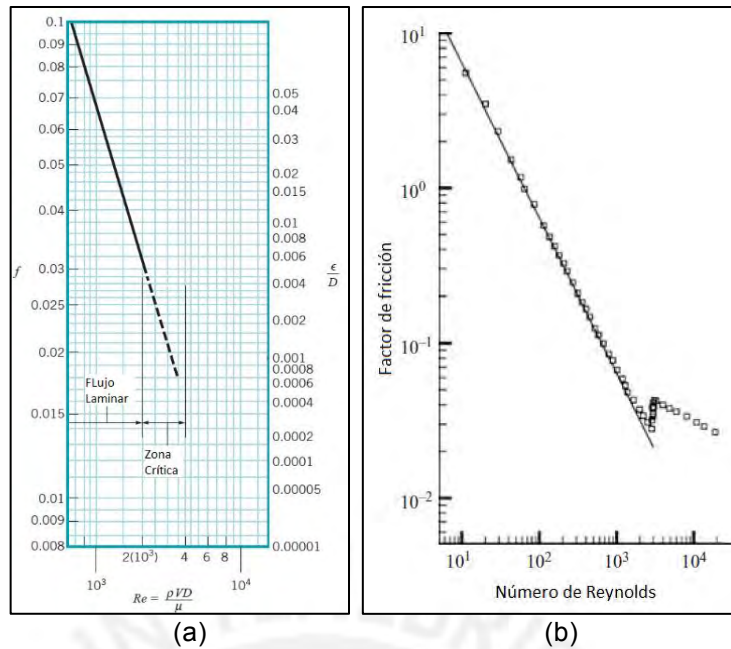


Fig. 1.7: (a) Factor de fricción para flujo laminar. Curva teórica (Adaptado de Munson, 2009) (b) Datos experimentales de la Universidad de Oregon (Tomado de McKeon, et al, 2004).

1.2.2 Parámetros de escalamiento en la pared:

En las zonas próximas a la pared, la viscosidad es predominante y los parámetros de escalamiento más importantes son la viscosidad cinemática y la fricción de velocidad o fuerza de corte (u_τ) (Colebrook, 1939), (Jiménez, 2004):

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Donde:

τ_w = Esfuerzo tangencial en la pared.

De donde también se construye la escala de longitud viscosa (δ).

$$\delta = \frac{\nu}{u_\tau} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

En orden de despejar estas ecuaciones, se toma la ecuación 1.6 y 1.11, de donde se obtiene el esfuerzo tangencial en la pared (τ_w):

$$\tau_w = \frac{\Delta p \cdot d}{4 \cdot l} = \frac{\lambda \cdot v^2 \cdot \rho}{8} \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Así:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\lambda \cdot v^2}{8}} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

$$\delta = \frac{\nu}{\sqrt{\frac{\lambda \cdot v^2}{8}}} = \frac{d}{Re \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{8}}} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

Todas aquellos parámetros (a) que se identifican con un superíndice + (a^+) son normalizados respecto a estos dos parámetros de escalamiento (Jiménez, 2004).

De esta forma, cuando se escala la rugosidad hidráulica (k_s) utilizando la escala de longitud viscosa, se define el número de Reynolds de la rugosidad hidráulica (k_s^+). Este está relacionado directamente con la rugosidad de la superficie interna de la tubería, por tanto permite clasificar la condición de flujo como liso, transición rugosa y completamente turbulento (ver figura 1.9) (Jiménez, 2004) (Flack et al., 2012) (Botros, 2016).

$$k_s^+ = \frac{k_s \cdot u_\tau}{\nu} = \frac{k_s}{\delta} = \frac{k_s \cdot Re}{d} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Según Nikuradse (1933):

Hidráulicamente liso: $k_s^+ \leq 5$
 Transición rugosa: $5 < k_s^+ < 70$
 Completamente rugoso: $k_s^+ \geq 70$

Según Colebrook (1933):

Hidráulicamente liso: $k_s^+ = 0$
 Transición rugosa: $0 < k_s^+ < 70$
 Completamente rugoso: $k_s^+ \geq 70$

1.2.3 Función de rugosidad:

La función de rugosidad (ΔU^+), propuesta por Clauser (1954) y Hama (1954), es una forma de representar cómo se modifica el perfil de velocidad debido a la rugosidad, basándose en las leyes de flujo hidráulicamente liso (Flack & Schultz, 2010) (Afzal et al., 2013)

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln y^+ + B - \Delta U^+ \quad (\text{Ec. 1.20})$$

Donde:

U^+ = Velocidad local de flujo
 $y^+ = y/\delta$
 y = Distancia de la pared.
 B = Intercepto para flujo hidráulicamente liso = 5.6
 κ = Constante de Von Karman = 0.421

Este parámetro está plenamente ligado al número de Reynolds de rugosidad (k^+). Se puede ver en la figura 1.8 que para $\Delta U^+ = 0$, el flujo es hidráulicamente liso y a medida que k^+ se incrementa, el flujo entra en transición rugosa, según las ecuaciones 1.21 y 1.22, hasta encontrar la asíntota de completamente rugoso que se define según la ecuación 1.23 (Schultz & Flack, 2007). Nótese que existen dos modelos que explican la transición rugosa, se ven a detalle en el punto 1.2.5.

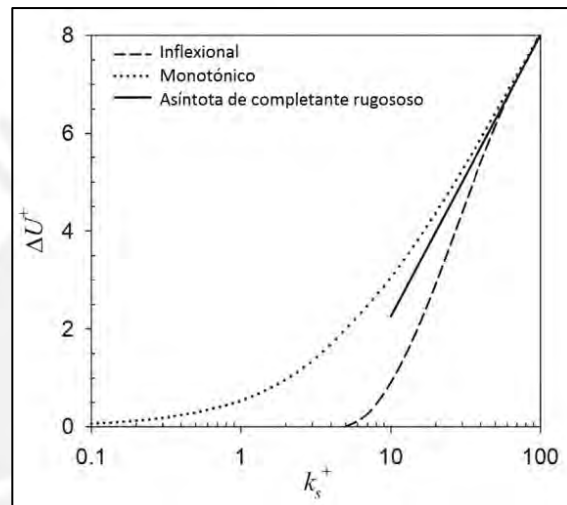


Fig. 1.8: Función de rugosidad versus número de Reynolds de rugosidad para la transición rugosa inflexional y monotónica.

$$\Delta U^+ = \sqrt{\frac{8}{\lambda_s}} - \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Donde:

λ_s = Factor de fricción para un flujo hidráulicamente liso considerando el mismo Re. (Ec. 1.24)

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \log(1 + 0.26 \cdot k_s^+) \quad (\text{Ec. 1.22})$$

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln k_s^+ + B - B'_{FR} \quad (\text{Ec. 1.23})$$

Donde:

B'_{FR} = Función de rugosidad de Nikuradse = 8.5

1.2.4 Flujo hidráulicamente liso:

Se define un flujo hidráulicamente liso cuando la tubería es totalmente lisa, como se ve en la figura 1.9 (a) o cuando el fluido crea una sub-capa laminar lo suficientemente gruesa que cubre la rugosidad de la tubería

creando una superficie lisa sobre dicha capa, como se muestra en la figura 1.9 (b).

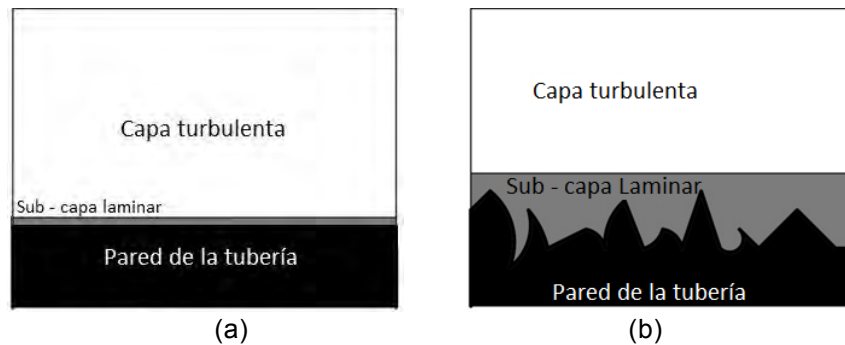


Fig 1.9: (a) Flujo hidráulicamente liso en tubería lisa. (b) Flujo hidráulicamente liso en tubería rugosa. (Adaptado de Brkic, 2011)

Para esta condición del flujo, la ecuación más conocida es la de Nikuradse – Prandlt – Karman (NPK), dado la secuencia de trabajos que se realizan hasta que Prandlt ajusta sus ecuaciones con la data de Nikuradse (1932) en el rango de $3.1 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3.2 \cdot 10^6$. Esta ecuación define el factor de fricción en función del número de Reynolds según la ecuación 1.24.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.8 = 2 \cdot \log\left(\frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2.51}\right) \quad (\text{Ec.1.24})$$

También se tiene las ecuaciones de Blasius (1913), ecuación 1.25 (a) y 1. 25 (b). (Brkic, 2011).

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}}, \quad Re < 100 \times 10^3 \quad (\text{Ec.1.25a})$$

$$\lambda = \frac{0.184}{Re^{0.2}}, \quad Re > 100 \times 10^3 \quad (\text{Ec.1.25b})$$

Zaragola y Smits, 1998 generan nueva data experimental en las instalaciones del “*Superpipe*” de la Universidad de Princeton para un tubería lisa ($R_q=0.15 \mu\text{m}$, $k_s=0.45 \mu\text{m}$). Con dicha data, determinan dos ecuaciones, la ecuación 1.26 predice el factor de fricción para $98 \cdot 10^3 \leq Re \leq 35 \cdot 10^6$ con una precisión de $\pm 1.2\%$ y la misma forma funcional que la ecuación NPK (Ec. 1.24). La ecuación 1.27 predice el factor de fricción en tuberías lisas con una precisión de $\pm 1.3\%$ para $10 \cdot 10^3 \leq Re \leq 35 \cdot 10^6$, considerando los efectos del número de Reynolds en el perfil de velocidad próximo a la pared (Zagarola & Smits, 1998).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.884 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.331 \quad (\text{Ec.1.26})$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.869 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.241 - \frac{233}{(Re \cdot \sqrt{\lambda})^{0.9}} \quad (\text{Ec.1.27})$$

McKeon et al. (2005) utilizan la data de Zagarola & Smits (1998) y generan data adicional en el “*Superpipe*” de Princeton utilizando la misma tubería, llegando a una serie de ecuaciones y recomendaciones. Concluyendo que para cierto rango de número de Reynolds, existe una determinada ecuación que se representa mejor con la data.

- | | |
|---|---------------------------------|
| $Re < 100 \cdot 10^3$; | Relación de Blasius (Ec. 1.25a) |
| $100 \cdot 10^3 \leq Re < 300 \cdot 10^3$; | Ecuación NPK (Ec. 1.24) |
| $300 \cdot 10^3 \leq Re < 35 \cdot 10^6$; | Ecuación 1.28 |

La ecuación 1.28 que predice el factor de fricción en tuberías lisas con una precisión de $\pm 0.5\%$ para $310 \cdot 10^3 \leq Re \leq 18 \cdot 10^6$ y con una precisión de $\pm 1.25\%$ para todo el rango evaluado experimentalmente $31 \cdot 10^3 \leq Re \leq 35 \cdot 10^6$. (McKeon et al., 2005)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.930 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.537 \quad (\text{Ec.1.28})$$

McKeon et al. (2004) compara la Ec. 1.31 con data obtenida en instalaciones totalmente distintas en la Universidad de Oregon, notándose una correlación apropiada con las dos datas (Oregon y Princeton) según lo muestra la figura 1.10.

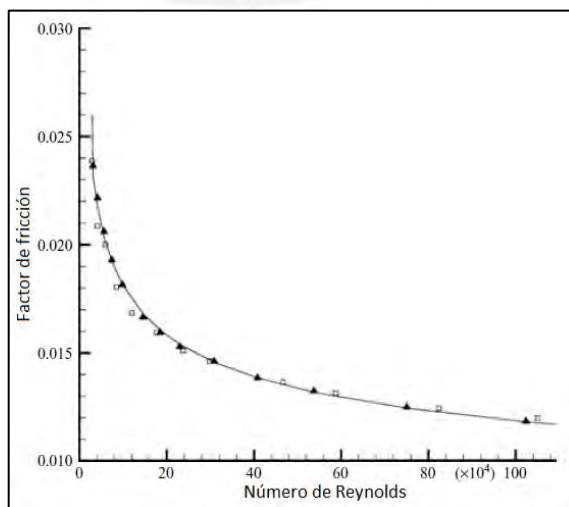


Fig 1.10: Validación experimental de la ecuación 1.21, ▲, Princeton; □, Oregon. (Tomado de McKeon et al., 2004)

Además, indican una ecuación (Ec. 1.29) que incluye una corrección por viscosidad y es válida para $10 \cdot 10^3 \leq Re < 30 \cdot 10^6$ con una precisión de 1.4% (para $310 \cdot 10^3 \leq Re < 30 \cdot 10^6$ con 0.6% de precisión) y que además correlaciona al 2% con la relación de Blasius (Ec. 1.25a) para $10 \cdot 10^3 \leq Re < 90 \cdot 10^3$. (McKeon et al., 2005)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.920 \cdot \log\left(\frac{Re}{\sqrt{\lambda}}\right) - 0.475 - \frac{7.04}{(Re \cdot \sqrt{\lambda})^{0.55}} \quad (\text{Ec.1.29})$$

A modo de resumen, se presenta la siguiente tabla:

Tabla 1.3: Resumen de modelos de λ para flujo hidráulicamente liso. (Elaboración propia)

Modelo	Rango de Re	Precisión	Ecuación
Nikuradse – Prandtl – Karman (NPK)	$3.1 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3.2 \cdot 10^6$	-	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.8$
Blasius, 1913	$Re < 100 \times 10^3$	-	$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$
	$Re > 100 \times 10^3$	-	$\lambda = \frac{0.184}{Re^{0.2}}$
Zaragola y Smits, 1998	$98 \cdot 10^3 \leq Re \leq 35 \cdot 10^6$	$\pm 1.2\%$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.884 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.331$
	$10 \cdot 10^3 \leq Re \leq 35 \cdot 10^6$	$\pm 1.3\%$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.869 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.241 - \frac{233}{(Re \cdot \sqrt{\lambda})^{0.9}}$
McKeon et al., 2005	$310 \cdot 10^3 \leq Re \leq 18 \cdot 10^6$	$\pm 0.5\%$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.930 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.537$
	$31 \cdot 10^3 \leq Re \leq 35 \cdot 10^6$	$\pm 1.25\%$	
	$10 \cdot 10^3 \leq Re < 90 \cdot 10^3$	-	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.920 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0.475 - \frac{7.04}{(Re \cdot \sqrt{\lambda})^{0.55}}$

1.2.5 Flujo en transición rugosa:

En este flujo, la capa sub laminar disminuye su espesor, como se muestra en la figura 1.11. De manera, la viscosidad no es suficiente para amortiguar los remolinos turbulentos generados por los elementos rugosos, creando arrastre e incrementando el efecto de fricción (Flack, et al., 2012).



Fig 1.11: Flujo en transición rugosa. (Adaptado de Brkic, 2011)

El comportamiento de la transición para una superficie en particular depende críticamente de la naturaleza geométrica de la rugosidad (Allen, et al., 2007). Básicamente, existen dos modelos que explican dicho comportamiento como inflexional o monótonico para una determinada rugosidad específica, se puede notar la diferencia en la figura 1.12.

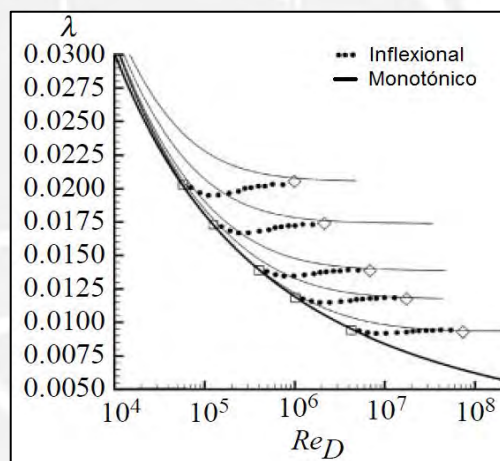


Fig. 1.12: Factor de fricción para la transición rugosa inflexional y monótonica.

A. Modelo inflexional:

Johan Nikuradse realiza en 1933 experimentaciones con una serie de tuberías con rugosidad regular artificial, utilizando revestimientos de granos de arena con tamaño y distribución conocida. Esta data para el régimen transitorio muestra que el factor de fricción logra un mínimo valor y luego se incrementa hasta encontrar el valor de completamente rugoso (Allen et al., 2007), tal como se muestra en la figura 1.13.

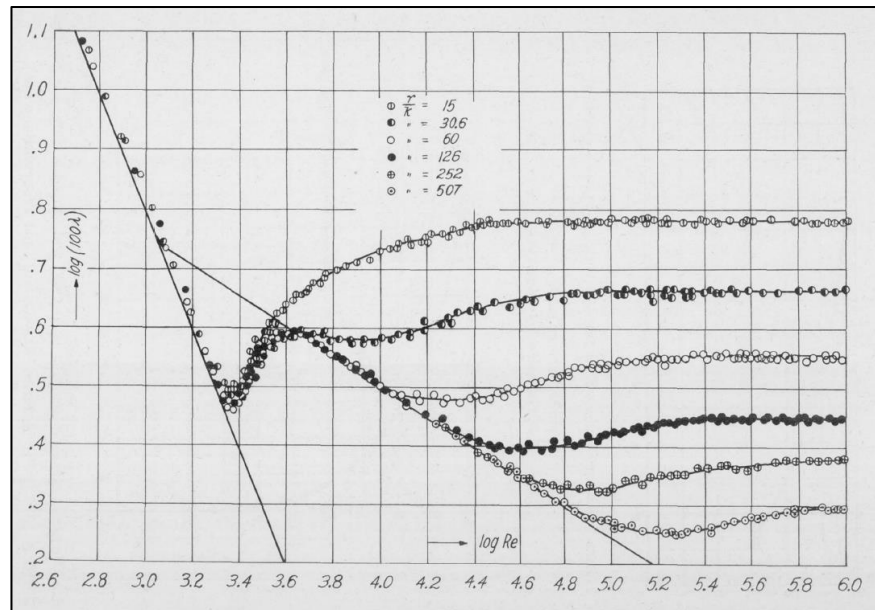


Fig. 1.13: Factor de fricción evaluado por J. Nikuradse (1933).

Jiménez, 2004 reúne data de diversos autores para validar que el comportamiento inflexional es coherente con las superficies de rugosidad uniforme, mientras que las tuberías comerciales toman un comportamiento monótonico, ver figura 1.14.

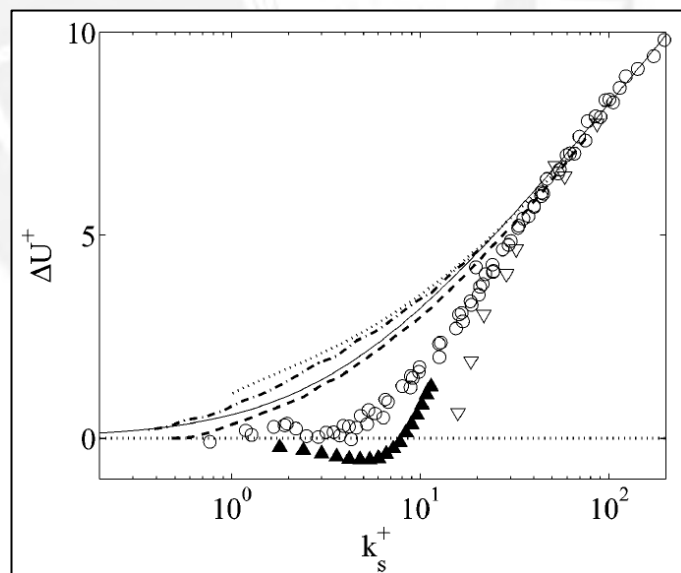


Fig. 1.14: Función de rugosidad de la transición rugosa de varias superficies. \circ , Granos de arena uniforme (Nikuradse, 1933); Δ , esferas uniformes (Ligrani & Moffat, 1986); \blacktriangle , rugosidad triangular (Bechert et al., 1997); \cdots , acero galvanizado; $-\cdots-$, acero fundido revestido con alquitrán; $-\cdot-, acero forjado (Colebrook, 1939); $—$, ecuación de Colebrook.$

Sin embargo, estudios actuales comprueban que incluso para superficies rugosas no uniformes y bajo un amplio rango de número

de Reynolds, el factor de fricción sigue el comportamiento inflexional encontrado por J. Nikuradse. E. Sletfjerding (1999) para tuberías comerciales utilizando gas natural como fluido trabajo, M.A. Shockling et al. (2006) para tuberías pulidas, Schultz y Flack (2007) para superficies pulidas, Langelandsvik et al. (2008) para tuberías comerciales, Flack et al. (2007) para superficies tipo lija y Flack et al. (2012) para superficies pintadas y pulidas.

La figura 1.15 muestra los resultados obtenidos por M.A. Shockling et al. (2006) con tuberías pulidas ($Rq/d = 1/17000$ y $k_s = 7.4 \mu\text{m}$) en las instalaciones del "Superpipe" de la Universidad de Princeton, se puede ver que la data genera una transición caracterizada por una inflexión, comportamiento similar al evaluado por Nikuradse (1933) (Fig. 1.13) con granos de arena.

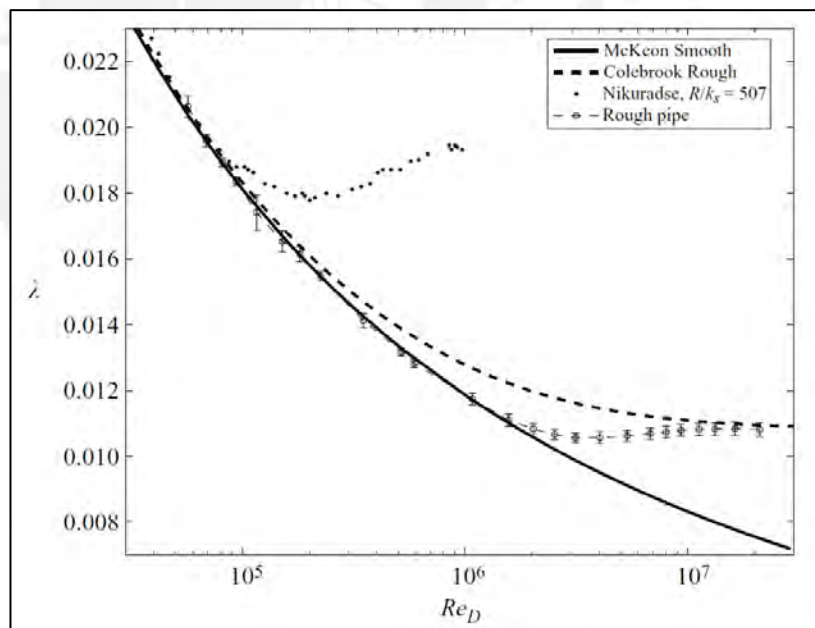


Fig. 1.15: Factor de fricción evaluado por Shockling et al. (2006).

M.P. Schultz y K.A. Flack (2007) desarrollan sus experiencias con flujo externo sobre placas rugosas, geoméricamente similares a las tuberías pulidas de Shockling et al. (2006), con resultados que indican que la transición rugosa tiene un comportamiento inflexional

y coincide con los resultados de Shockling et al. (2006), tal como lo muestra la figura 1.16.

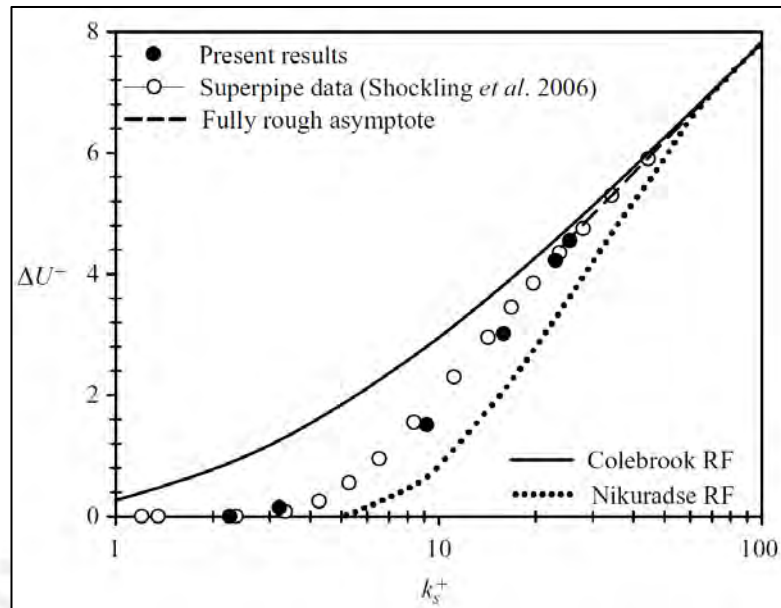


Fig. 1.16: Función de rugosidad y número de Reynolds de rugosidad evaluados por Schultz y Flack (2007).

N. Afzal (2007) y N. Afzal (2013) utiliza la data obtenida por E. Sletfjerding (1999), J. Nikuradse (1933), M.A. Shockling (2006) y M.A. Shockling et al. (2006) para desarrollar dos ecuaciones que representan el comportamiento inflexional en la transición rugosa, estudiado por J. Nikuradse (1933). La ecuación 1.30 se basa en las constantes de Prandtl (Ec. 1.24) para flujo hidráulicamente liso, mientras que la ecuación 1.31, en las constantes de McKeon et al. (2005) (Ec. 1.28). En las figuras 1.17 y 1.18 se puede notar que la data experimental se ajusta al comportamiento inflexional, mientras que el comportamiento monótono de Colebrook sobredimensiona el factor de fricción. La figura 1.18 corresponde a las tuberías rugosas P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 evaluadas por Sletfjerding y la tubería pulida evaluada por Shockling.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3.7 \cdot d} \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2.83 \cdot d}{Re \cdot \sqrt{\lambda} \cdot k_s}\right) \right] \quad (\text{Ec.1.30})$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.93 \cdot \log \left[\frac{1.90}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3.7 \cdot d} \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2.83 \cdot d}{Re \cdot \sqrt{\lambda} \cdot k_s}\right) \right] \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Donde: $j = 11$, para representar el comportamiento inflexional y $j = 0$, para representar el comportamiento monónico de Colebrook (Ec. 1.32).

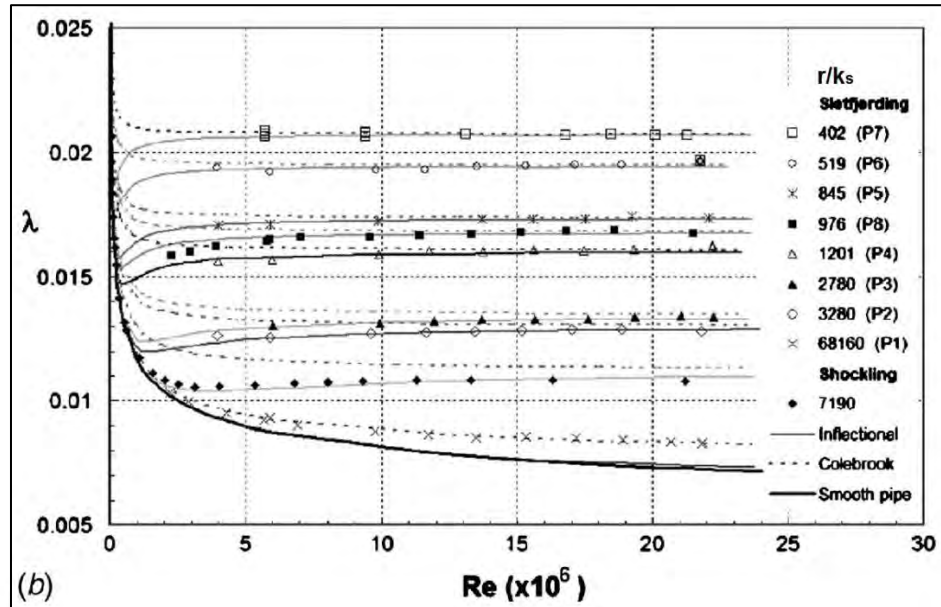


Fig. 1.17: Comparación del factor de fricción para las tuberías evaluadas por E. Sletfjording (1999) y Shockling (2006) con la ecuaciones 1.31 (Inflexional) y la ecuación monótonica de Colebrook. (Tomado de Afzal, 2007).

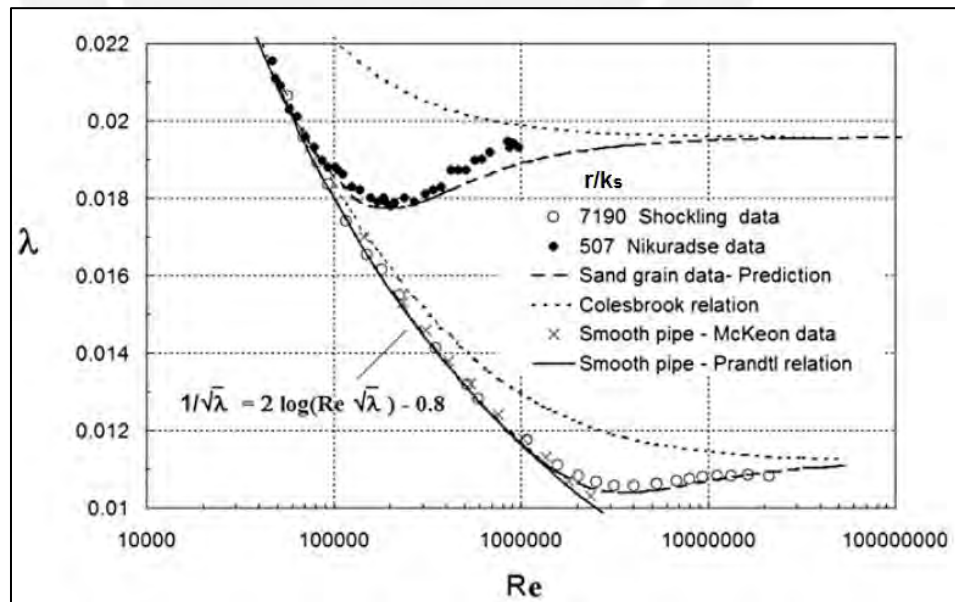


Fig. 1.18: Comparación del factor de fricción para las tuberías evaluadas por Shockling (2006) y Nikuradse (1933) con la ecuación 1.31 (Inflexional) y la ecuación monótonica de Colebrook. (Tomado de Afzal et al, 2011).

También se puede observar en la figura 1.19, que al nivel de función de rugosidad, los puntos experimentales se ajustan sobre la curva con inflexión.

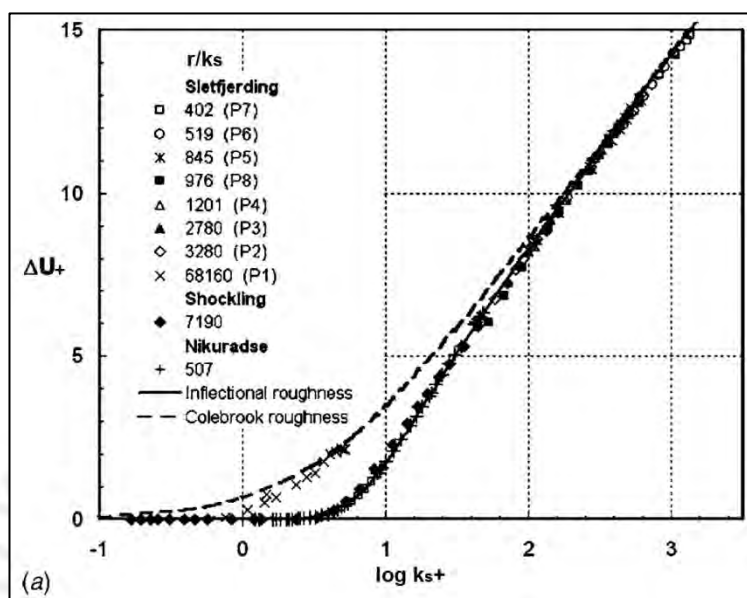


Fig. 1.19: Función de rugosidad para las tuberías evaluadas por E. Sletfjerdings (1999), Shockling (2006) y J. Nikuradse (1933). (Tomado de Afzal, 2007).

B. Modelo monotónico:

Este modelo, representado por la ecuación de Cyril Frank Colebrook en 1939, indica que el factor de fricción disminuye monotónicamente mientras incrementa el número de Reynolds, para una condición determinada de rugosidad relativa. Para este modelo, la transición hacia la condición de totalmente rugoso es gradual aproximándose a un comportamiento asintótico para flujos con mayor número de Reynolds. (Flack et al., 2016)

La ecuación de C. F. Colebrook surge de experimentaciones utilizando tuberías comerciales (ver figura 1.20) y su base teórica tiene origen en las ecuaciones 1.24 y 1.36, para flujo hidráulicamente liso y totalmente rugoso respectivamente. Colebrook y White (1937) realizan experimentaciones con granos de arena de distinto tamaño y tuberías industriales que dan soporte al modelo monotónico (Jiménez, 2004).

Colebrook indica que cualquier intento de expresar matemáticamente la condición de transición para rugosidades uniformes de grano de arena será complicada debido a que la turbulencia generada por un grano interfiere mutuamente con el siguiente, de manera que el efecto de resistencia será producido por fuerzas viscosas y mecánicas que son difíciles de separar (Colebrook, 1939). En el caso de las superficies rugosas no uniformes, existen grandes granos aislados que cubren a los granos pequeños, de manera que el área de superficie entre las grandes excrescencias puede considerarse como hidráulicamente liso, mientras que sobre dichos granos grandes, se considera un comportamiento de completamente turbulento dado que la turbulencia local es alta incluso para bajas velocidades medias, es decir el flujo entre dos grandes elementos rugosos es dominado por los efectos viscosos y no tanto por la rugosidad (Colebrook, 1939) (Langelandsvik et al., 2008). Así, la función dependerá de la distribución de los elementos rugosos, siendo matemáticamente indeterminable (Colebrook, 1939).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3.7 \cdot d} \right) \quad (\text{Ec. 1.32})$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

k_s = Rugosidad hidráulica de la tubería (m).

d = Diámetro interior de la tubería (m).

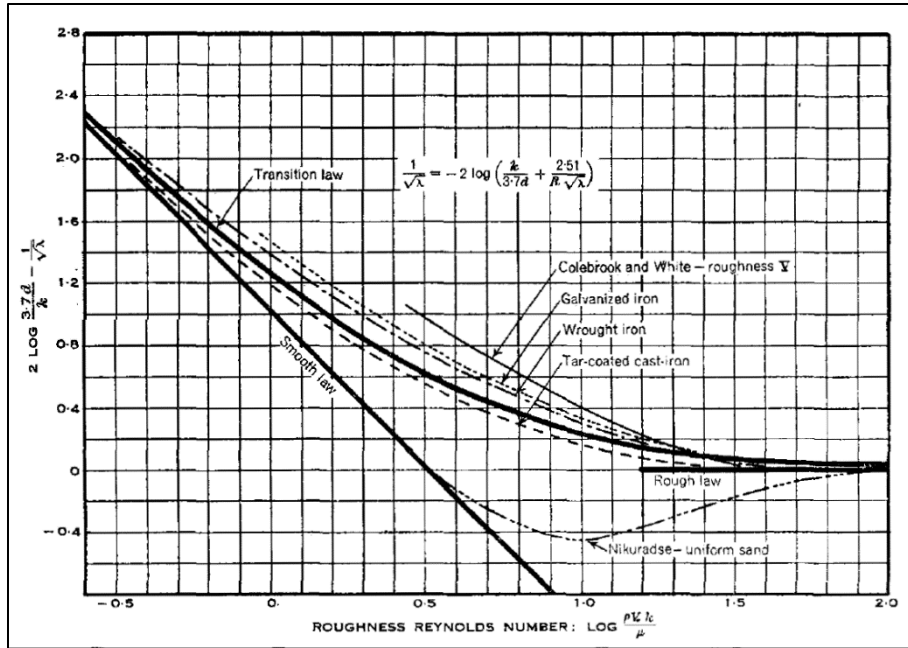


Fig 1.20: Ley de transición de Colebrook determinada experimental y teóricamente para varias superficies rugosas. (Tomado de Colebrook, 1939)

La figura 1.21 muestra el diagrama de Lewis F. Moody, que utiliza la ecuación de C. F. Colebrook y graficas las curvas de transición que parten desde la condición hidráulicamente lisa hasta convertirse en asíntotas de la condición totalmente rugosa.

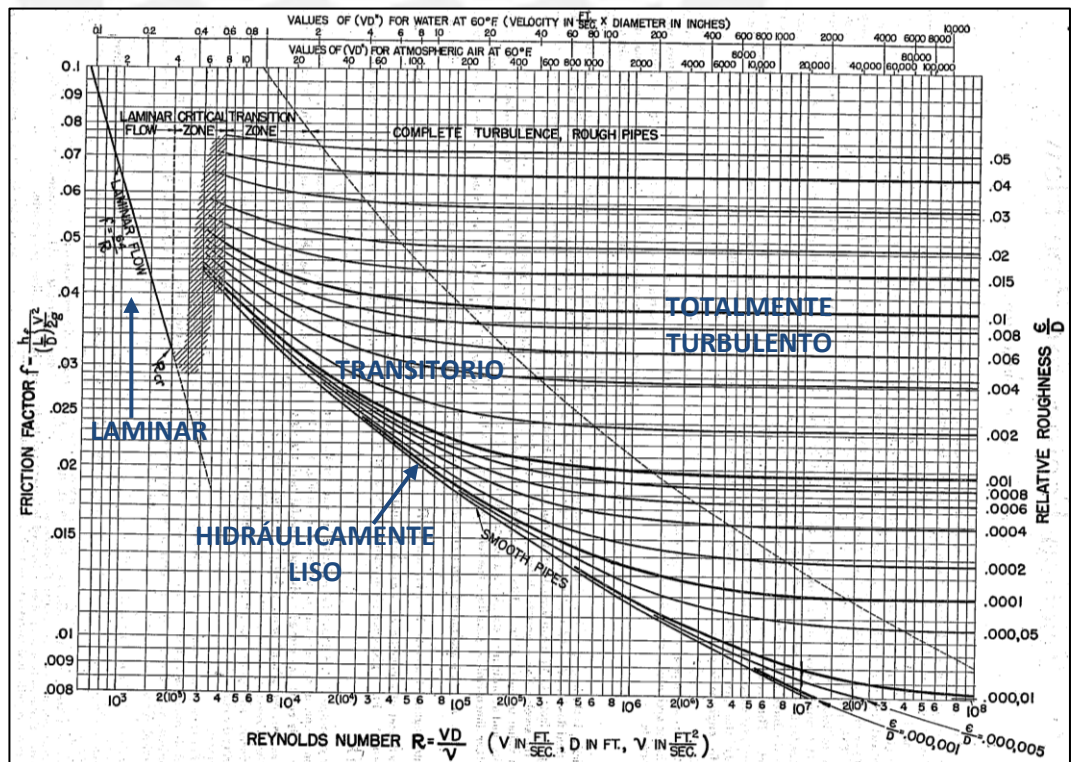


Fig. 1.21: Gráfico de L. F. Moody. (Tomado de Moody, 1944)

Existe literatura reciente que indica que el modelo monotónico se ajusta a tuberías comerciales: E. Kemler (1933), L. Moody (1944), H. Schlichting (1979), P. Bradshaw (2000), Perry et al. (2001) y L.I. Langelandsvik, et al. (2008).

Sobre este último, se tiene la figura 1.22 que muestra los resultados obtenidos por L.I. Langelandsvik et al. (2008) evaluados sobre un tubería de acero con costura ($Rq/d=26000$ y $k_s=8 \mu\text{m}$), se puede notar que los datos experimentales (\circ) se apartan de la ecuación de Colebrook, pero mantienen el comportamiento monotónico aunque haciendo una transición más abrupta.

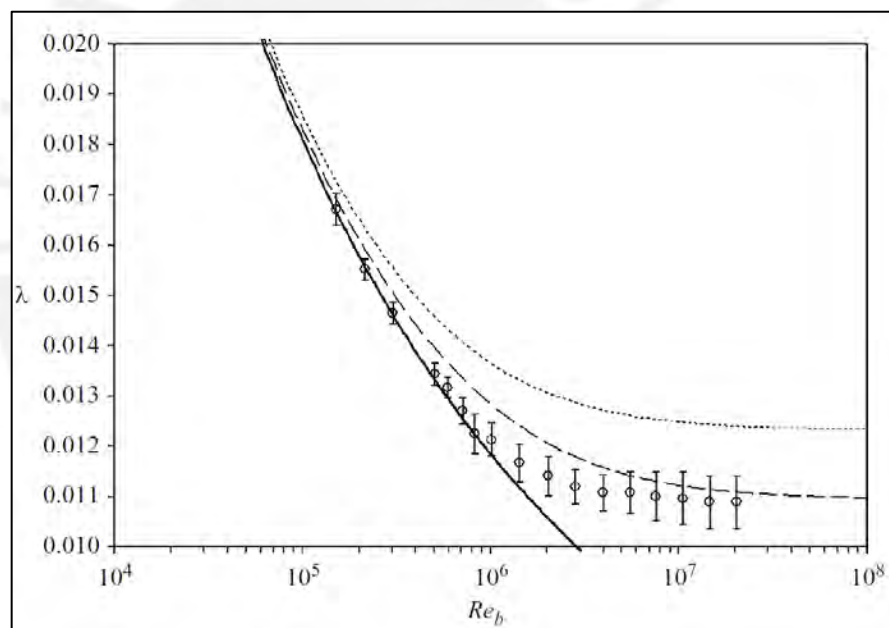


Fig. 1.22: Factor de fricción evaluado por Langelandsviki, et al. (2008). \circ , experimental; —, flujo hidráulicamente liso (Ec. 1.21); ---, ecuación de Colebrook (1939) (Ec.1.23) para $k_s=8 \mu\text{m}$, \cdots , ecuación de Colebrook para $k_s=15 \mu\text{m}$.

Con la finalidad de cuantificar el comportamiento monotónico encontrado por Langelandsviki, et al. (2008), N. Afzal (2013) desarrolla la ecuación 1.33 que predice el comportamiento de la transición rugosa monotónica para tuberías comerciales según la data de Langelandsviki, et al. (2008). En la figura 1.23 se puede la ecuación se ajusta a la data experimental.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left[\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{3.7 \cdot d} \cdot \exp \left\{ -a \cdot \left(\frac{2.83 \cdot d}{Re \cdot \sqrt{\lambda} \cdot k_s} \right)^m \right\} \right] \quad (\text{Ec.1.33})$$

Donde: $a=2.67$ y $m=0.6$.

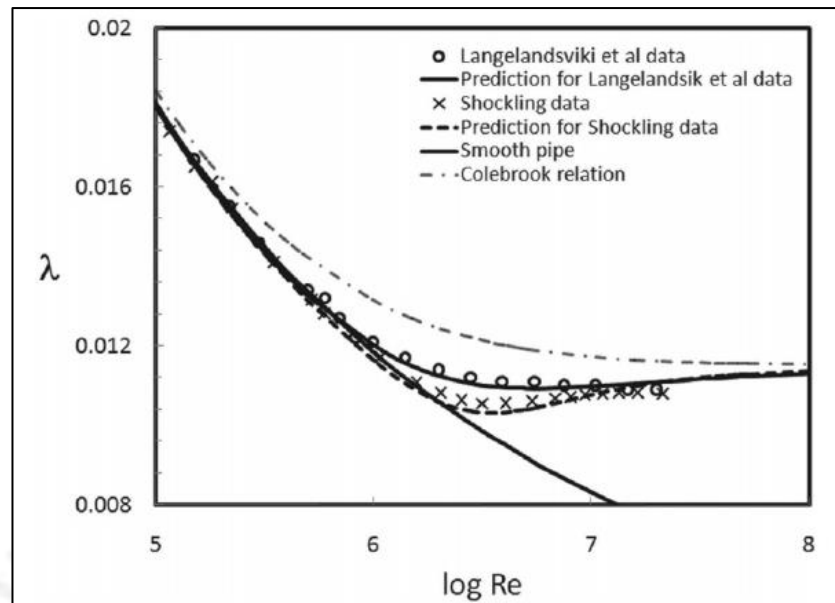


Fig. 1.23: Factor de fricción evaluado por Shockling (2006) y la predicción según la Ec.1.36 (Tomado de Afzal, 2013).

Es importante notar que para calcular el factor de fricción según la ecuación de C.F. Colebrook (Ec. 1.32) es necesario realizar iteraciones, sin embargo existen ecuaciones que aproximan la ecuación de C.F. Colebrook pero de manera explícita, como la ecuación de P.K. Swanee y A.K. Jain 1976 (Ec. 1.34) o Haaland, 1983 (Ec. 1.35).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} + \frac{k}{3.7 \cdot d} \right) \quad (\text{Ec. 1.34})$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{k}{3.7 \cdot d} \right)^{1.11} \right) \quad (\text{Ec. 1.35})$$

1.2.6 Flujo completamente rugoso:

Mientras el número de Reynolds aumenta, la sub capa laminar se ve afectada, exponiendo los elementos rugosos a la capa turbulenta, como lo muestra la figura 1.24. De esta manera, los fenómenos físicos próximos a la pared estarán dominados por la rugosidad, el efecto de fricción será provocado por el arrastre

sobre dichos elementos rugosos, los esfuerzos cortantes estarán dominados por los efectos inerciales y los efectos viscosos se harán despreciables, haciendo que el factor de fricción dependa únicamente de la rugosidad hidráulica relativa (k_s/d) (Munson, 2009) (Flack & Schultz, 2014) (Flack et al., 2016). Como se ve en la figura 1.6 y en el gráfico de Moody (figura 1.21), el factor de fricción toma un comportamiento asintótico.



Fig 1.24: Flujo completamente rugoso. (Adaptado de Brkic, 2011)

Para describir esta condición de flujo, Nikuradse (1933) desarrolla la ecuación 1.36, la cual es conocida como la ley de Von Karman.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log\left(\frac{d}{2 \cdot k_s}\right) + 1.74 = 2 \cdot \log\left(\frac{3.7 \cdot d}{k_s}\right) \quad (\text{Ec. 1.36})$$

Como se puede en las figuras anteriores, independientemente del comportamiento durante la transición rugosa, cuando el número de Reynolds o el número de Reynolds de rugosidad aumentan, el factor de fricción o la función de rugosidad llegan de manera asintótica al mismo nivel.

Para determinar desde qué momento se considera un flujo completamente turbulento o rugoso, L. F. Moody (1944) expone la siguiente ecuación:

$$\frac{Re \times \sqrt{f}}{d/k_s} > 200 \quad (\text{Ec. 1.37})$$

1.3 Flujo desarrollado:

Cuando los fluidos se transportan a través de tubería siempre existe la posibilidad de colocar accesorios, instrumentos de medición o cualquier cuerpo que obstruya el libre paso del fluido. Luego de esta obstrucción, el flujo

toma un comportamiento muy complicado de estudiar, denominado zona de entrada. Una vez finalizada la zona de entrada este comportamiento cambia debido a que el flujo se desarrolla. En la figura 1.26, se puede ver que en la zona de entrada la pérdida de presión no es lineal a la longitud, por tanto sería imposible utilizar la ecuación de Darcy Weisbach.

La longitud necesaria para lograr el flujo desarrollado es dependiente número de Reynolds, según las ecuaciones 1.38 y 1.39.

$$\text{Flujo laminar: } \frac{l_e}{d} = 0.06 \times Re \quad (\text{Ec. 1.38})$$

$$\text{Flujo turbulento: } \frac{l_e}{d} = 4.4 \times Re^{1/6} \quad (\text{Ec. 1.39})$$

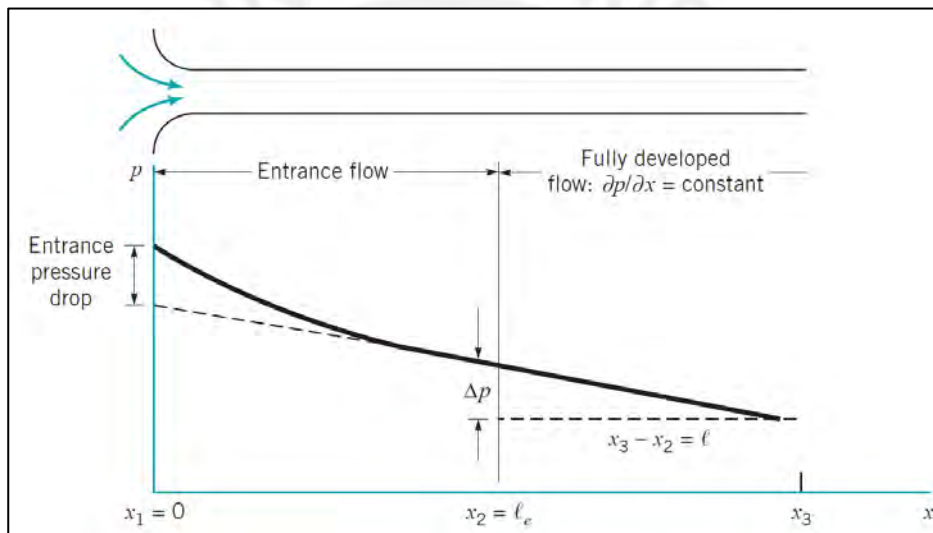


Fig.1.25: Distribución de la presión a lo largo de tubería. (Tomado de Munson, 2009)

1.4 Rugosidad hidráulica - k_s :

La rugosidad hidráulica es un parámetro que define a la superficie interna de la tubería en función del efecto hidráulico que produce en la fricción. Se le conoce también como la rugosidad equivalente de grano de arena, ya que es un equivalente que produce los mismos efectos de fricción (la misma función de rugosidad) que tendría una superficie arenada con rugosidad uniforme como las usadas por Nikuradse.

Este parámetro es necesario para calcular el factor de fricción, por tanto es un valor que se debe tener antes de realizar un cálculo de pérdida de presión en una

línea de tuberías. Usualmente, se obtiene de tablas que se encuentran en la bibliografía, como en los libros de R. Mott (1996) y F. White (2011) o en la publicación de L.F. Moody (1944) que es referenciada por el Hydraulic Institute. Sin embargo, estas muestran valores muy variantes, como se puede ver en la tabla 1.4. y la figura 1.26. Frente a esta problemática, existen trabajos que permiten predecir la rugosidad hidráulica utilizando los parámetros de rugosidad de la superficie interna de la tubería (Ra, Rz, Rq, etc).

Tabla 1.4: Rugosidad hidráulica para tuberías según la fuente bibliográfica.

	Material	Rugosidad hidráulica, k_s (mm)		
		R. Mott, 1966	F. White, 2011	L. F. Moody, 1944
Acero	Hoja de metal, nuevo		0.05	
	Inoxidable, nuevo		0.002	
	Comercial, nuevo	0.046	0.046	0.045
	Remachado	1.8	3.0	0.9 – 9.0
	Oxidado		2.0	
	Forjado	0.46		
	Estirado			0.015
Hierro	Fundido, nuevo		0.26	0.26
	Forjado, nuevo		0.046	
	Galvanizado, nuevo		0.15	0.15
	Fundido y asfaltado	0.12	0.12	
	Fundido sin revestir	0.24		
Latón	Laminado, nuevo	0.0015	0.002	
Cobre, plomo	Nuevo	0.0015		
Plástico	Laminado	Liso	0.0015	Liso
Vidrio	-	Liso	Liso	Liso
Concreto	Pulido		0.04	
	Rugoso	1.2	2.0	0.3 – 3.0
Madera	-		0.5	0.18 – 0.9

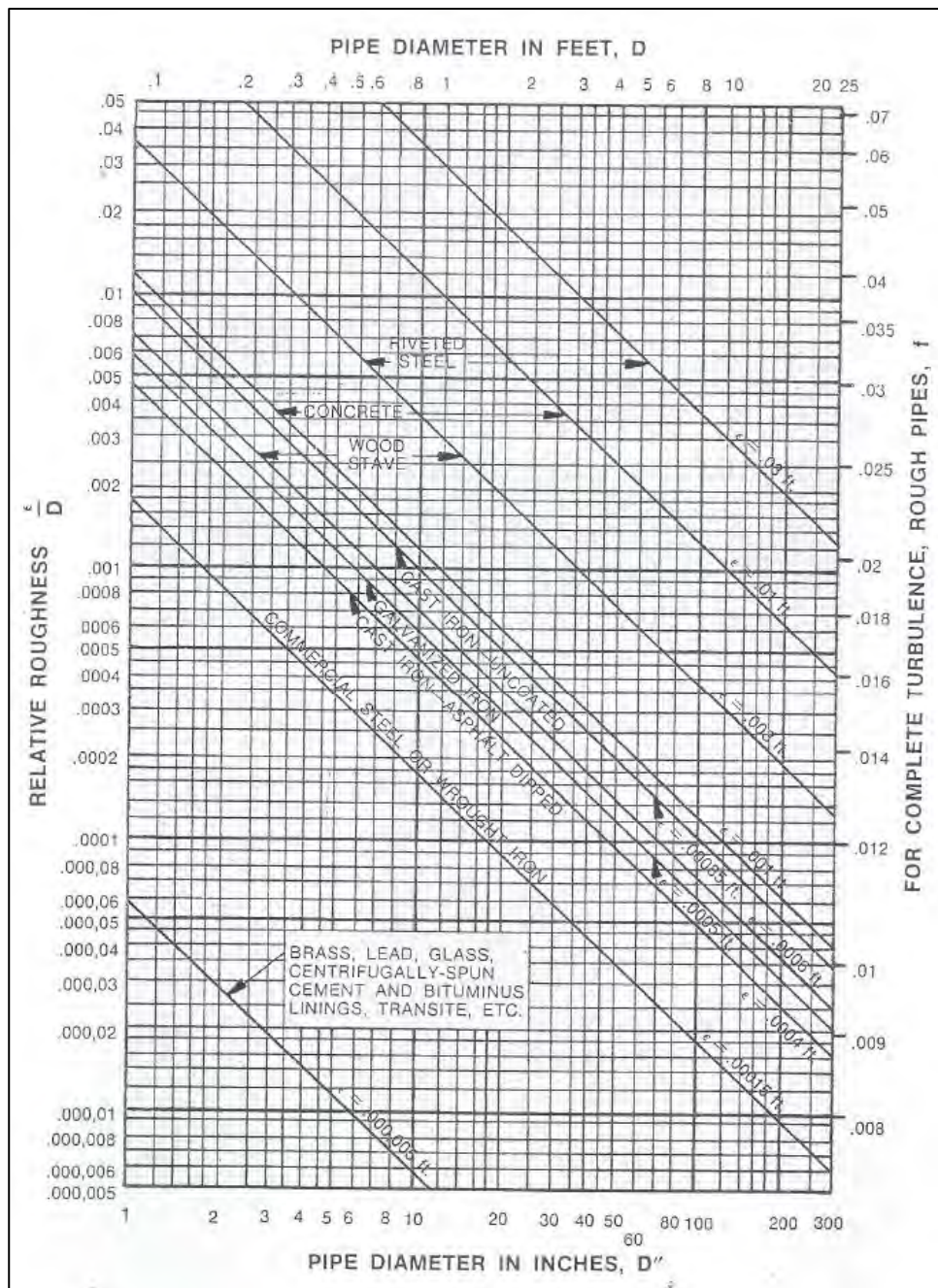


Fig.1.26: Rugosidad relativa para tuberías nuevas y limpias. (Tomado de Hydraulic Institute, 1990)

F. R. Hama (1954) realiza estudios sobre la capa límite en flujo interno y externo para flujo liso y rugoso, llegando a la conclusión que la correlación entre la rugosidad hidráulica y la rugosidad superficial es la que muestra la ecuación 1.40.

$$k_s = 5 \cdot Rq \quad (\text{Ec. 1.40})$$

Zagarola & Smits (1998) estudia el flujo en condición hidráulicamente liso con aire comprimido, utilizando tuberías de aluminio extruido y pulido, en las instalaciones del *Superpipe* de la Universidad de Princeton, evalúan el flujo en el rango de

número de Reynolds: $31 \times 10^3 - 35 \times 10^6$, y luego de analizar el flujo para los puntos de mayor número de Reynolds, determinan la ecuación 1.41.

$$k_s = 3 \cdot Rq \quad (\text{Ec. 1.41})$$

Esta ecuación es validada por M. A. Shockling (2006) y J. J. Allen et al (2007), bajo experimentaciones en tuberías pulidas ($Rq = 2.46 \mu m$), evaluadas también con aire comprimido el *Superpipe*, para un rango de número de Reynolds de $57 \times 10^3 - 21 \times 10^6$. Se puede observar la data experimental en la figura 1.16.

L. I. Langelandsvik et al. (2008) realizaron pruebas en una tubería de acero con costura, de diámetro nominal igual a 5 pulgadas - *schedule 40* (diámetro interno promedio: 129.84 mm). Utilizaron como fluido de trabajo aire comprimido en las instalaciones del *Superpipe* de la Universidad de Princeton, logrando el siguiente rango de número de Reynolds: $150 \times 10^3 - 20 \times 10^6$. La superficie interna de la tubería muestra un $Rq = 50 \mu m$ y considerando que el flujo logra la condición de completamente rugoso en $k_s^+ = 18$, la ecuación 1.42 representa la equivalencia entre la rugosidad superficial y la rugosidad hidráulica. Se puede ver la data experimental en la figura 1.22.

$$k_s = (1.6 \pm 0.5) \cdot Rq \quad (\text{Ec. 1.42})$$

K. A. Flack y M. P. Schultz (2010) evaluaron la rugosidad hidráulica para flujo interno en tuberías y el flujo externo en superficies planas, tomando los trabajos de otros autores quienes experimentaron con: esferas aglomeradas, papel lija, gravilla, tuberías pulidas, tuberías comerciales, pirámides aglomeradas y superficies rasgada. Su análisis indica que la rugosidad valor cuadrático medio (Rq) y el *skewness* u oblicuidad de la rugosidad (S_k), definido por la ecuación 1.58, están plenamente ligados con la rugosidad hidráulica.

Al incluir S_k en el análisis es posible caracterizar mejor el fenómeno de rugosidad hidráulica, dado que S_k es un parámetro que mide la variación de la rugosidad. Así, proponen la ecuación 1.43 que se valida con la data experimental según la figura 1.27.

$$k_s = 4.43 \cdot Rq \cdot (1 + S_k)^{1.37} \quad (\text{Ec. 1.43})$$

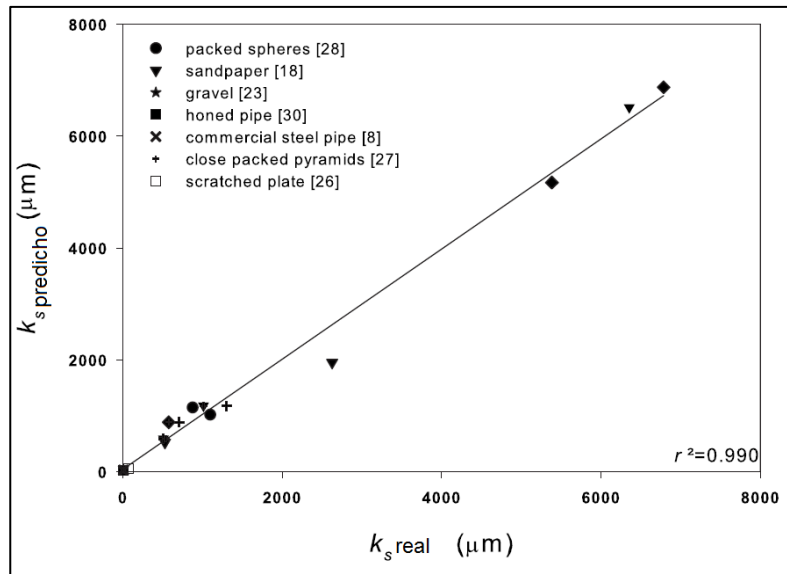


Fig. 1.27: Comparación de predicción de la rugosidad hidráulica y la rugosidad experimental. (Tomado de Flack y Schultz, 2010)

K.A. Flack et al. (2016) continúan con la investigación de Flack y Schultz (2010) evaluando el efecto de la rugosidad hidráulica en flujo externo para superficies con vidrio triturado, granate triturado y oxido de aluminio triturado. Como resultado obtienen la ecuación 1.44 que se valida con la data experimental en la figura 1.28, se puede notar en la figura que no se tienen mejores resultados si se utiliza una ecuación que solo depende de Rq .

$$k_s = 2.91 \cdot Rq \cdot (1 + S_k)^{-0.284} \quad (\text{Ec. 1.44})$$

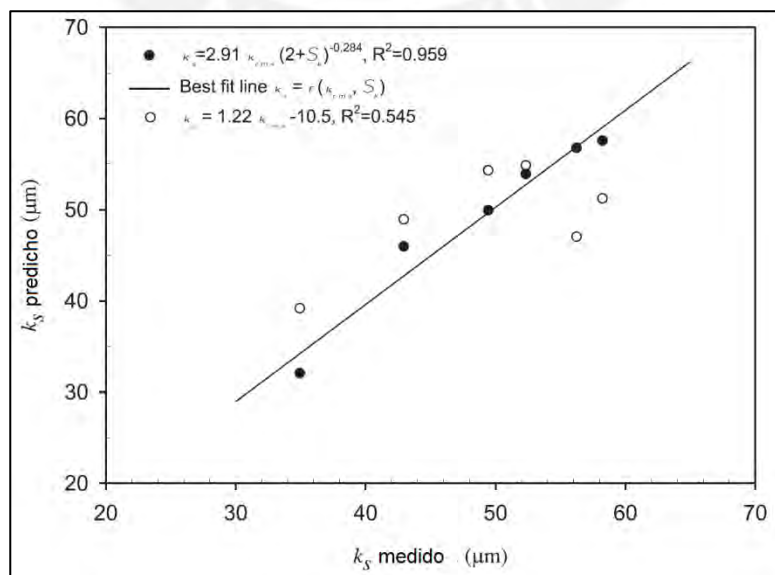


Fig. 1.28: Comparación de predicción de la rugosidad hidráulica y la rugosidad experimental. (Tomado de Flack et al, 2016)

K. K. Botros (2016) realiza un estudio de la rugosidad hidráulica para 13 tuberías de acero al carbono con y sin costura de diferentes grados y utiliza como fluido de trabajo gas natural. Para cada tubería evalúa niveles altos de número de Reynolds, entre 7×10^6 a 12×10^6 . En su análisis determina la rugosidad hidráulica de dos maneras, utilizando el modelo de Colebrook y utilizando el modelo de Nikuradse. Para cada modelo, expone una correlación en función de la rugosidad de valor cuadrático medio, la ecuación 1.45 corresponde al modelo de Colebrook y la ecuación 1.46 al modelo de Nikuradse. Estas dos ecuaciones se muestran en las figuras 1.29 y 1.30.

$$k_s (\text{Colebrook}) = 1.306 \cdot Rq + 0.078 \cdot Rq^2 \quad (\text{Ec. 1.45})$$

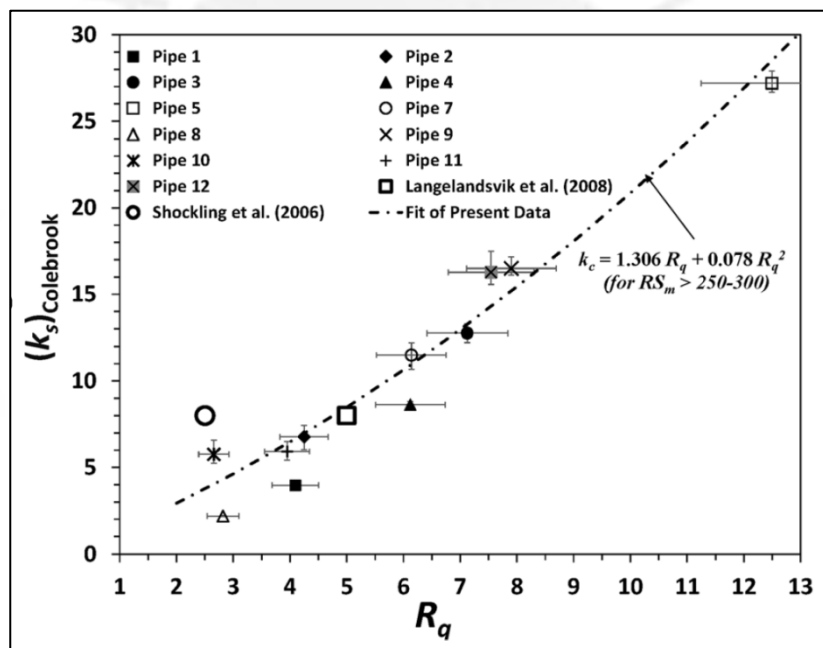


Fig. 1.29: Resultados experimentales de la rugosidad equivalente según el modelo de Colebrook (k_s) y el parámetro de rugosidad de superficie (Rq). (Tomado de Botros, 2016)

$$k_s (\text{Nikuradse}) = 2.294 \cdot Rq \quad (\text{Ec. 1.46})$$

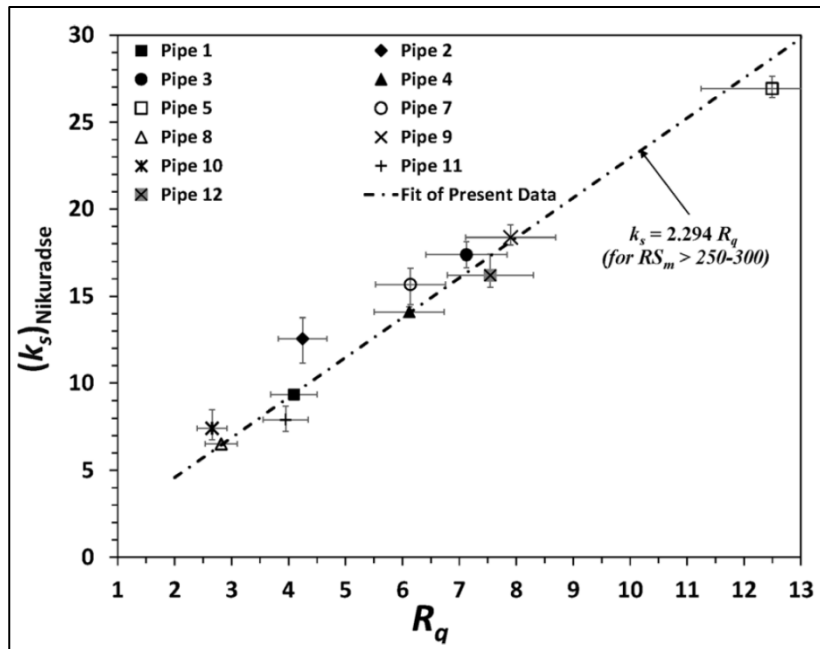


Fig. 1.30: Resultados experimentales de la rugosidad equivalente según el modelo de Nikuradse (k_s) y el parámetro de rugosidad de superficie (R_q). (Tomado de Botros, 2016)

K. K. Botros y A. Shouman (2016) extienden la investigación de K. K. Botros (2016) para 07 tuberías de acero inoxidable, utilizando también gas natural como fluido de trabajo y número de Reynolds de 8×10^6 a 23×10^6 . En este caso, la rugosidad hidráulica se analiza solo con el modelo Colebrook, llegando a la ecuación 1.47 que se verifica en la figura 1.31.

$$k_s (\text{Colebrook}) = 2.2907 \cdot R_q + 0.1029 \cdot R_q^2 \quad (\text{Ec. 1.47})$$

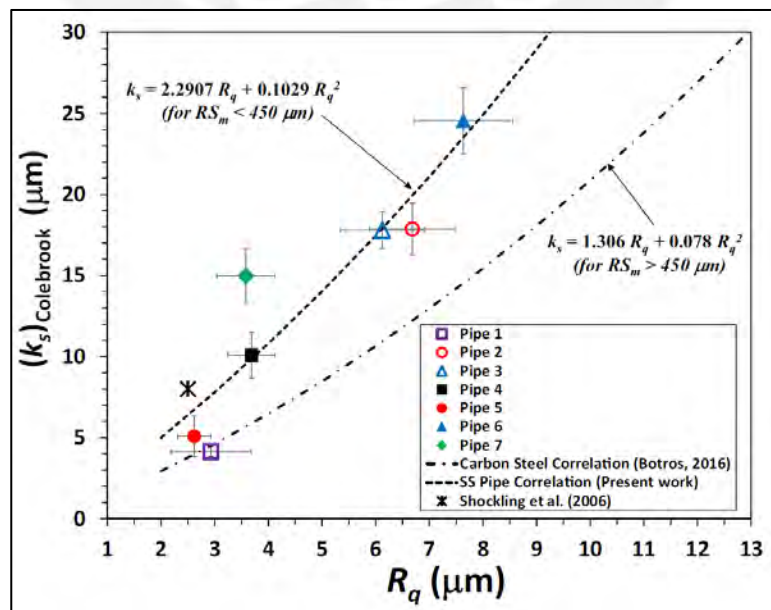


Fig. 1.31: Resultados experimentales de la rugosidad equivalente según el modelo de Colebrook (k_s) y el parámetro de rugosidad de superficie (R_q). Tomado de Botros y Shouman (2016)

F. Farshad et al. (2001) realiza experiencias sobre tuberías revestidas, donde indica que la rugosidad hidráulica (k_s) es igual a la rugosidad superficial de pico y valle (Rz), ecuación 1.48. Presenta además, un diagrama que permite determinar la rugosidad hidráulica para ese tipo de tuberías en función de diámetro, figura 1.32. Luego, F. Farshad y H. H. Rieke (2005), realizan las mismas experiencias pero con tuberías de materiales modernos, los resultados se muestran en la figura 1.33.

$$k_s = Rz \quad (\text{Ec. 1.48})$$

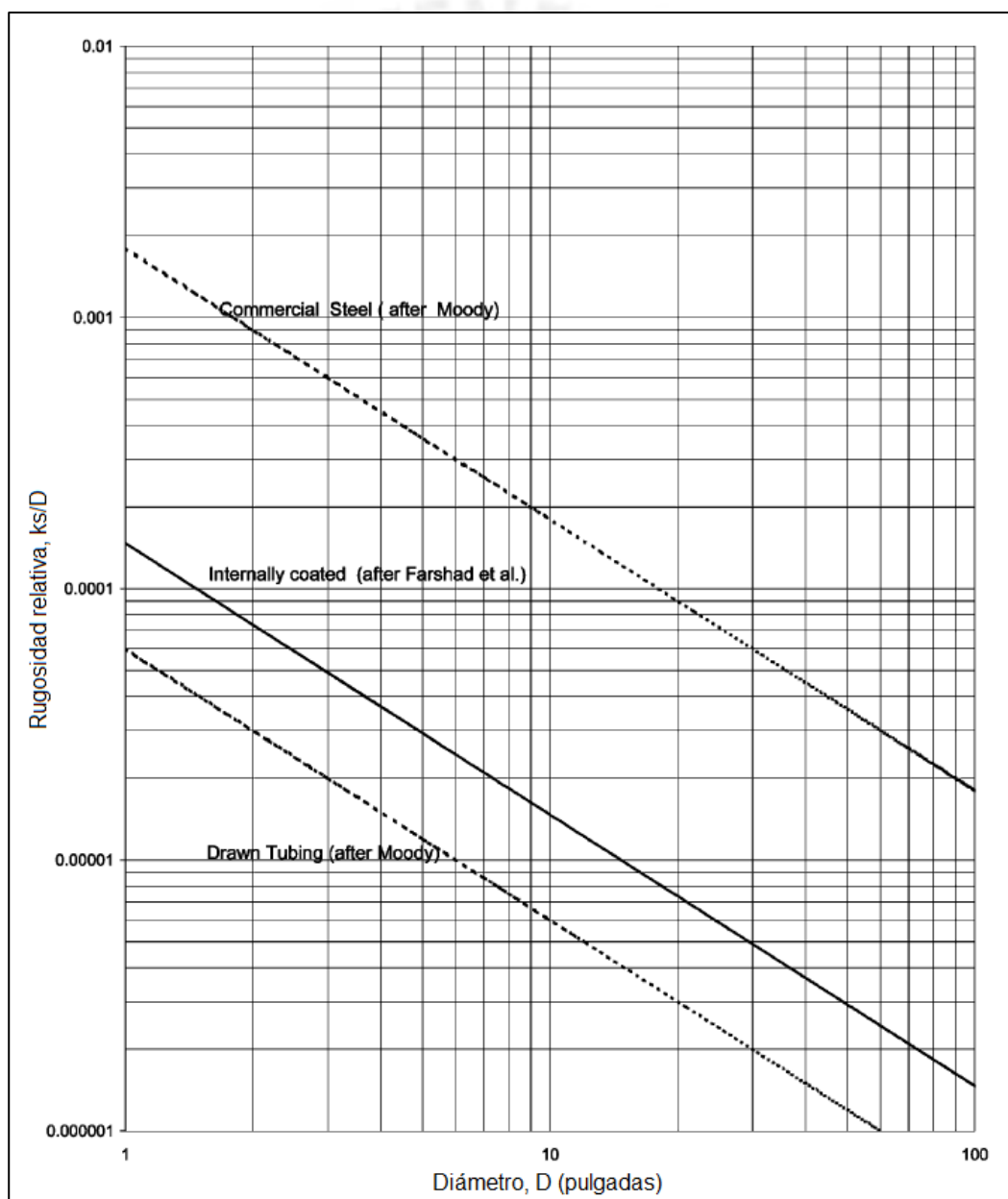


Fig. 1.32: Comparación de la rugosidad hidráulica relativa para tuberías revestidas, tuberías comerciales y tuberías laminadas. (Tomado de F. Frashad et al., 2016)

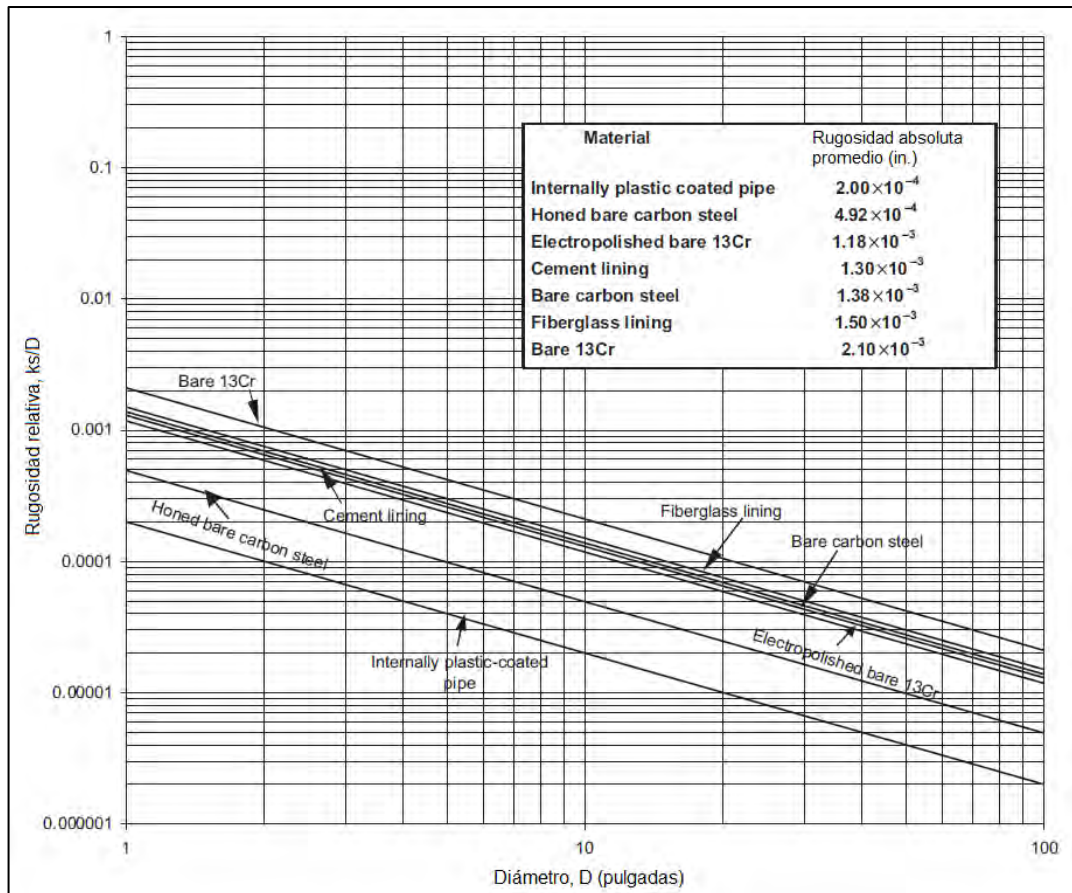


Fig. 1.33: Nuevo gráfico de rugosidad hidráulica de Farshad para tuberías comunes. (Tomado de Frashad y Rieke, 2005)

N. Afzal (2007) y N. Afzal et al. (2011) utilizan la data obtenida por Sletfjerdings y Gudmundson (2003) y concluye tres correlaciones en función de los parámetros de rugosidad superficial, ecuaciones 1.49, 1.50 y 1.51. E. Sletfjerdings y J. S. Gudmundson (2003) trabajan con tuberías para gas en condiciones completamente rugosas. Se puede ver la data en la figura 1.34.

$$k_s = 1.244 \cdot Rz \quad (\text{Ec. 1.49})$$

$$k_s = 5.333 \cdot Rq \quad (\text{Ec. 1.50})$$

$$k_s = 6.450 \cdot Ra \quad (\text{Ec. 1.51})$$

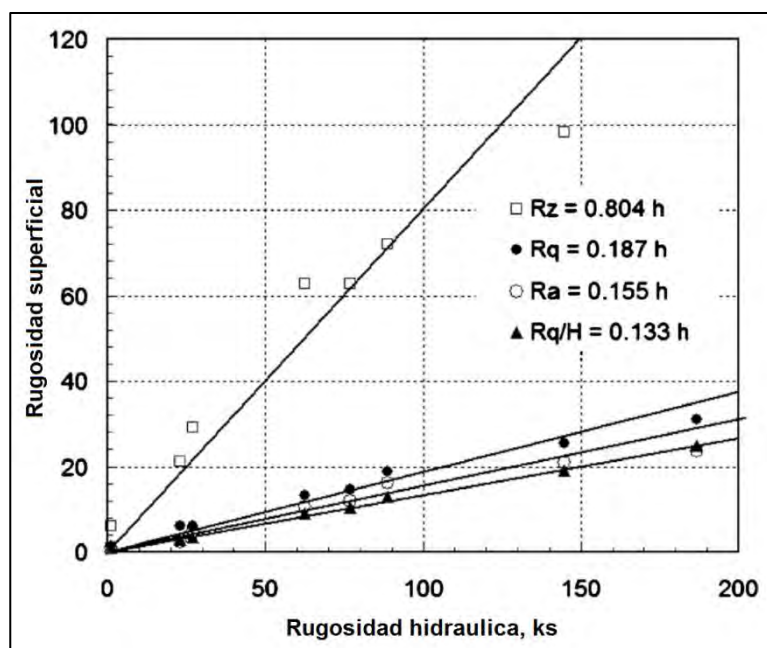


Fig. 1.34: Predicción de la rugosidad hidráulica según N. Afzal y rugosidad superficial, utilizando la data de Sletfjetding y Gudmundson (2003). (Tomado de Afzal, 2005)

T. Adams y C. Grant (2012) proponen un algoritmo lineal bajo la idea que una superficie rugosa cualquiera puede ser representada, geoméricamente equivalente, como una superficie rugosa constituida por esferas del mismo diámetro, tal como una superficie de granos de arena. Esta equivalencia significa que las dos superficies tendrían el mismo Ra , Rq , Rz y el diámetro de las esferas sería igual a la rugosidad hidráulica (k_s). El algoritmo de este modelo relaciona este diámetro de la esfera (k_s) con los parámetros de rugosidad superficial (Ra , Rq y Rz) y es sustentado bajo experimentaciones con tuberías de cobre, aluminio, acero al carbono, acero galvanizado liso y acero galvanizado rugoso. Sus resultados, indican que la mejor equivalencia para determinar la rugosidad hidráulica es igualarlo con el Rq o utilizar las ecuaciones 1.53 y 1.54.

$$k_s = 0.978 \cdot Rz \quad (\text{Ec. 1.52})$$

$$k_s = 3.100 \cdot Rq \quad (\text{Ec. 1.53})$$

$$k_s = 5.863 \cdot Ra \quad (\text{Ec. 1.54})$$

1.5 Rugosidad superficial:

Se define como una característica geométrica que tiene una superficie que ha sido manufacturada. Su caracterización puede darse según la superficie nominal que es la que se exige en un plano en forma y dimensión sin considerar las irregularidades; o según el perfil real que es una representación que se obtiene replicando la geometría con instrumentos ópticos o mecánicos. Estas caracterizaciones pueden ser medibles con parámetros de amplitud de textura de superficie que son considerados en la norma ISO 13465-2:1997.

1.5.4 Rugosidad media aritmética - Ra :

Es el parámetro más popular en los procesos de manufactura y resulta de una desviación alrededor de una línea central en el tramo de evaluación.

Se calcula según la ecuación 1.55 y gráficamente el área de integración se representa según la figura 1.35:

$$Ra = \frac{1}{m} \int_0^m |Z(x)| dx \quad (\text{Ec. 1.55})$$

Donde:

m = Número de puntos evaluados en el tramo de prueba.

Z = Amplitud de la rugosidad.

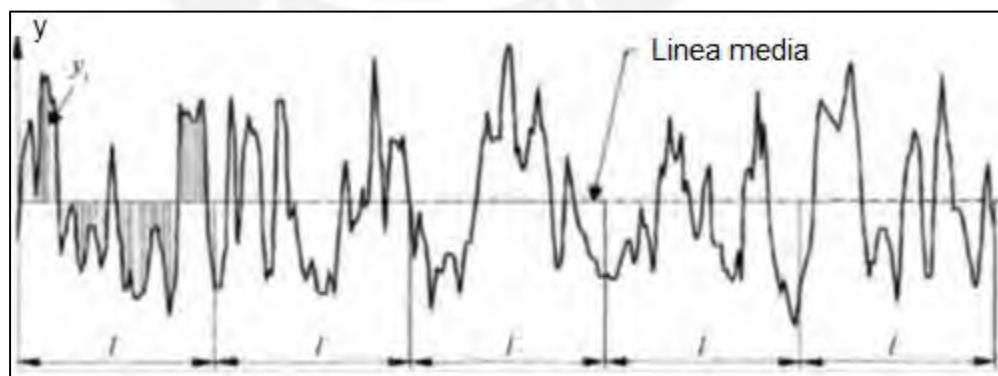


Fig. 1.35: Rugosidad media aritmética. (Tomado de Petropoulos et al, 2010)

1.5.5 Rugosidad media de pico y valle - Rz :

Resulta de promediar las diferencias entre máximo pico y valle en el tramo de pruebas según la ecuación 1.56. Este parámetro alisa las desviaciones pronunciadas que no son representativas.

$$Rz = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{i=m} \frac{Z_p(i) + Z_v(i)}{2} \quad (\text{Ec. 1.56})$$

Donde:

Z_p = Pico de rugosidad en el punto evaluado
 Z_v = Valle de rugosidad en el punto evaluado

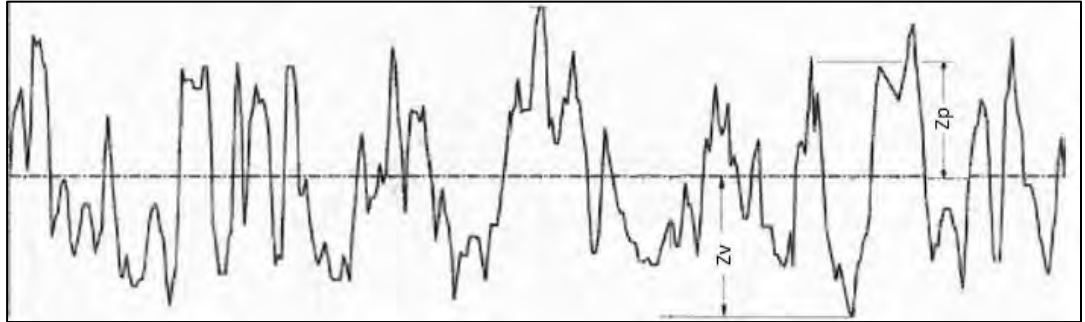


Fig. 1.36: Rugosidad media pico y valle. (Tomado de Petropoulos et al, 2010)

1.5.6 Rugosidad valor cuadrático medio (RMS) – Rq :

Este parámetro de rugosidad es más sensible que Ra , a los picos y valles. Se determina según la ecuación 1.57.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{m} \int_0^m Z^2(x) dx} \quad (\text{Ec. 1.57})$$

1.5.7 Skewness u oblicuidad de rugosidad – S_k :

Es un parámetro que define la asimetría de la distribución de rugosidad en una determinada longitud de prueba.

$$S_k = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left(\frac{1}{m} \cdot \sum_0^m z(x)^3 \right) \quad (\text{Ec. 1.58})$$

CAPÍTULO 2

Metodología

En el presente capítulo se detallará de qué manera se obtiene el factor de fricción, la rugosidad hidráulica y la rugosidad superficial de las dos tuberías de acero al carbono con y sin costura. Se justificarán los parámetros de ensayo como el diámetro, longitud y material de las tuberías a ensayar, así como las condiciones del flujo. Así también, se mostrará el diseño del banco de ensayos, la selección de equipos, instalaciones e instrumentación requerida.

2.1. Parámetros de ensayo:

2.1.1. Diámetro y material de las tuberías:

El comercio de tuberías en el país se realiza comúnmente con medidas en pulgadas según UNE EN 10255. De todo el abanico de medidas existentes, la medida más común es la de diámetro nominal 1 in. Este fue el criterio para la selección del diámetro de las tuberías. Sin embargo, no es una limitante para que los resultados, producto de los ensayos, sean válidos para otros diámetros, ya que se considera la rugosidad relativa como un parámetro de estandarización.

Los materiales a ensayar deberían ser también de uso frecuente, por tanto se pensó en los más comerciales, acero al carbono con y sin costura.

2.1.2. Fluido de prueba:

Dado que el estudio se enfoca en la rugosidad hidráulica, para la selección del fluido, se consideró que el flujo debía encontrarse en régimen de flujo totalmente turbulento, es decir se debe cumplir la desigualdad de la ecuación 1.37. Las condiciones de flujo para lograr dicho régimen deberían ser posibles

de generar en un sistema implementable en el laboratorio, además de asegurar que los parámetros de ensayo sean medibles. En la tabla 2.1 se muestran los resultados para tres posibles fluidos: agua, vapor y aire, que fluyen en 11.5 m de tubería de acero al carbono de 1 in con rugosidad hidráulica nominal (k_s) de 0.05 mm.

Tabla 2.1: Condiciones de ensayo para diferentes flujos.

Fluido	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/s)	Presión (bar)	Número de Reynolds	$\frac{Re \cdot \sqrt{f}}{D/k_s}$	Δp Tubería (kPa)
Agua	55	27.4	38	7.3 E5	209.1	3773.9
Vapor	160	79.7	10	7.3 E5	208.3	164.3
Aire	105	52.3	8	7.3 E5	208.1	129.1

Analizando los resultados del cálculo con los tres fluidos, se puede ver que utilizando agua, el caudal y la presión necesarias son tan altas que no sería posible un sistema de bombeo de esa magnitud en un laboratorio, otro detalle es que la velocidad en la línea es tan alta que podrían provocar falla en los componentes ante un eventual cambio de dirección dada la cantidad de movimiento que posee. Para el caso del vapor, el caudal resulta mayor a la capacidad que se dispone en la caldera del Laboratorio de Energía, además del problema que implica la condensación del vapor en las tuberías, que cambiaría el fenómeno que se pretende ensayar por volverse un flujo bifásico. Por último, si se toma al aire como fluido de ensayo, existe la posibilidad de conseguir el flujo de aire comprimido con la ayuda de un compresor y recipientes de almacenamiento, la velocidad y la presión se muestran manejables para un gas como el aire. El detalle de la implementación y el diseño del banco de ensayos utilizando aire como fluido de trabajo se muestra en los siguientes puntos.

2.1.3. Longitud de la tubería de prueba:

La longitud de la tubería se ha determinado por la magnitud de la pérdida de presión para un rango de caudal, de manera que sea medible para todo el rango de número de Reynolds. En la tabla 2.2 se muestra un cálculo tentativo

con valores referenciales para un rango de caudal (25 - 105 m³/h), considerando una longitud de tubería de acero al carbono de 11.5 m y se puede ver que la caída de presión es medible. Esta longitud se logra al unir dos tuberías de longitud comercial (6 m aproximadamente cada una) pero considerando que se secciona 0.5 m para tomar muestras representativas de rugosidad superficial.

Tabla 2.2: Condiciones referenciales de ensayo para diferentes flujos

Condición de caudal	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/s)	Re	Δp Tubería (kPa)
Máximo	105	52.3	7.3 E5	129.1
Mínimo	25	12.5	1.7 E5	7.6

2.2. Variables para la determinación del factor de fricción:

La finalidad de la presente metodología es determinar la rugosidad hidráulica, la cual se calcula a partir del factor de fricción. Para obtener este valor es necesario realizar un ensayo de pérdida de presión, donde se obtiene el gradiente de presión ocasionado por el paso del fluido. Este gradiente, además de la velocidad media del fluido, el diámetro y longitud de la tubería, así como la densidad del fluido, permite usar la ecuación de Darcy Weisbach (Ec. 1.11) para despejar el factor de fricción según la ecuación 2.1.

$$\lambda = \frac{2 \cdot d \cdot \Delta p}{L \cdot v^2 \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Esta ecuación se puede expresar en función del caudal en la ecuación 2.2.

$$\lambda = \frac{\Delta p \cdot \pi^2 \cdot d^5}{8 \cdot L \cdot \dot{V}^2 \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

- λ = Factor de fricción.
- Δp = Pérdida de presión (Pa)
- L = Longitud de la tubería (m).
- d = Diámetro interior de la tubería (m).
- \dot{V} = Flujo volumétrico (m³/s).
- ρ = Densidad del fluido (kg/m³).

En síntesis, las variables que se necesitan medir en la experimentación son las siguientes:

- Pérdida de presión en la tubería.
- Diámetro de la tubería
- Longitud de la tubería
- Flujo volumétrico

Para caracterizar el fluido según sus propiedades termofísicas (densidad y viscosidad dinámica) también será necesario medir:

- Presión al inicio de la tubería de prueba
- Temperatura al inicio de la tubería de prueba

2.3. Banco de ensayos para determinación de rugosidad hidráulica:

Con los parámetros de ensayo definidos, se procede a seleccionar los equipos y acondicionar las instalaciones que requiere el banco de ensayos. Se debe tener como premisa que se requiere un flujo de aire próximo a $105 \text{ m}^3/\text{h}$ con una presión de ensayo de hasta 7 bar manométrico, de manera que el flujo fluya a través de dos tuberías (5.5 m y 6 m) unidas en serie.

2.3.1. Instalación:

Se procederá a describir la estación de compresión de aire, de donde se obtiene aire filtrado y seco y el arreglo de válvulas y tuberías que permiten regular la presión y el flujo de ensayo.



Fig. 2.1: Estación de compresión

A. Compresor de tornillo:

Se trata de un compresor de tornillo que genera aire comprimido sin modificar significativamente la temperatura del aire. Este compresor tiene la posibilidad de trabajar cíclicamente en función a la presión de descarga, de manera que comprime aire hasta 12.5 bar manométrico, apaga el motor y dispone esa presión a la salida hasta que, por la demanda, la presión disminuya progresivamente hasta 7 bar manométrico, luego enciende el motor y vuelve a comprimir hasta 12.5 bar manométrico, repitiendo el ciclo. Las especificaciones técnicas de este equipo se muestran en la tabla 2.3:

Tabla 2.3: Datos técnicos del compresor de tornillo Atlas Copco.

Compresor de tornillo	
Denominación	Compresor de tornillo GA15
Marca	Atlas Copco
Presión máxima	12.5 barg
Caudal nominal	29.3 l/s – Aire libre disponible



Fig. 2.2: Compresor de tornillo.

B. Secador de aire:

Para asegurar que el fluido de prueba disminuya su contenido de vapor de agua y no genere condensado a su paso por las tuberías, se dispone de un secador de aire de marca Atlas Copco a la salida del compresor.

Este secador opera con un sistema de refrigeración por compresión de vapor, con R404 A.

Tabla 2.4: Datos técnicos del secador de aire Atlas Copco.

Secador de aire	
Denominación	Air Dryer FX6
Marca	Atlas Copco
Presión máxima	13 barg
Temperatura máxima	55 °C
Caudal nominal	83 cfm – Aire libre disponible
Punto de rocío	5 °C



Fig. 2.3: Secador de aire.

C. Filtros:

Con el objetivo de mejorar la calidad del aire comprimido, liberándolo de contaminantes como condensado y aceite, se han instalado filtros antes y después del secador, según el arreglo de la figura 2.4.

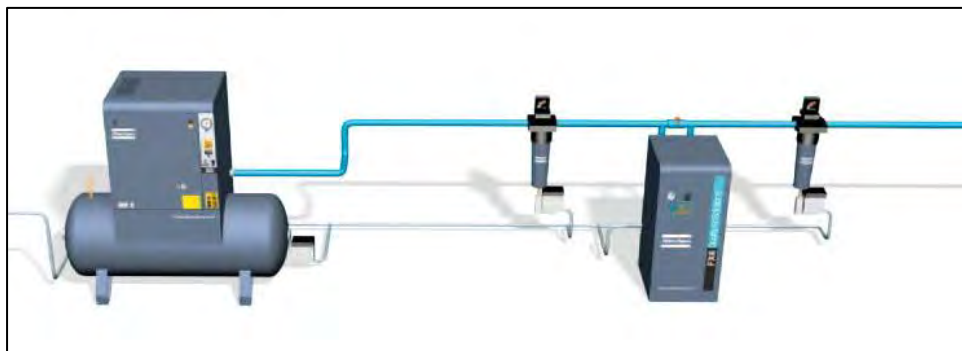


Fig. 2.4: Arreglo de filtros y secador. (Tomado de Atlas Copco)

Tabla 2.5: Datos técnicos de los filtros

Filtros de aire	
Denominación	DD50 y PD50
Marca	Atlas Copco
Conexión	3/4" NPT
Tipo de filtro	Coalescencia
Contaminantes	Condensado, aceite hasta 0.1 ppm
Tamaño de partícula	Menor a 1 μm



Fig. 2.5: Filtro DD50.

D. Tanques de almacenamiento y sistema de tuberías:

Dado el caudal requerido, se ha optado por almacenar la mayor cantidad de aire que luego sea descargado hacia la línea de pruebas. Así, se tienen dos tanques de 1 m^3 y 0.7 m^3 (figuras 2.6 y 2.7.), los cuales se conectan en paralelo y descargan hacia la línea de pruebas, como lo indica el esquema de la figura 2.8.



Fig. 2.6: Tanque de 1.0 m^3 .



Fig. 2.7: Tanque de 0.7 m³.

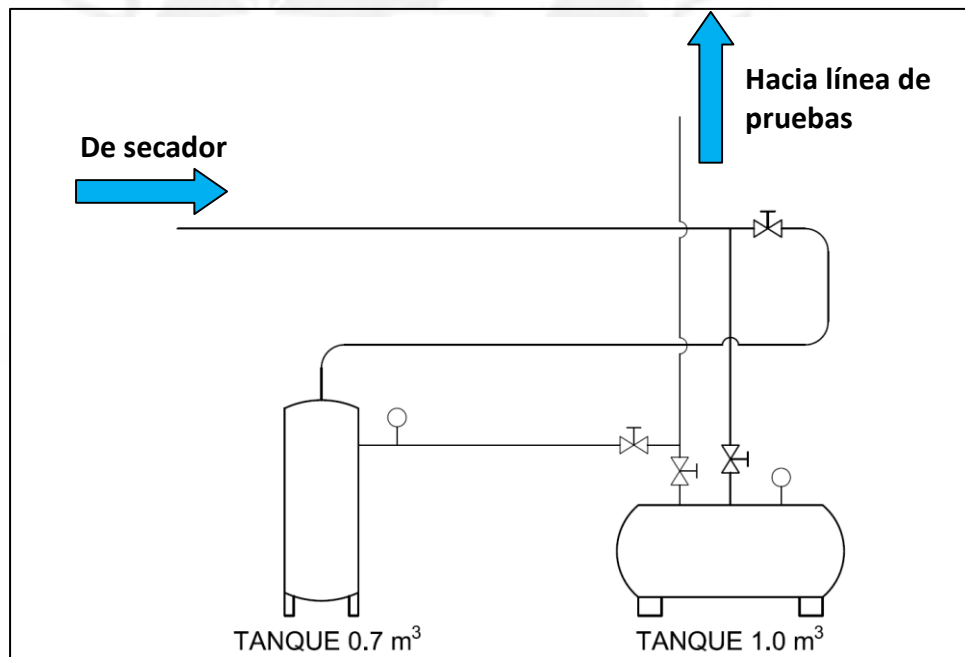


Fig. 2.8: Esquema del arreglo de tanques. (Elaboración propia)

El sistema de tuberías se ha realizado en acero galvanizado de distintas dimensiones de acuerdo al emplazamiento del sistema, se puede ver la figura 2.9.



Fig. 2.9: Tanques y sistema de tuberías

E. Regulación de presión:

Dado que los parámetros de ensayo requieren una presión de 7 bar manométrico en la línea de pruebas, se ha dispuesto de dos reguladores de presión que recibirán aire a 12.5 bar almacenado en los tanques. Estos se han colocado en paralelo, tal como lo muestran las figuras 2.11 y 2.12, debido a que el flujo supera la capacidad de diseño individual. En la figura 2.10 se muestran las curvas de regulación en función de caudal que circula por cada regulador, se presenta la conversión del flujo actual requerido en unidades de l/min normales:

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= 105 \text{ m}^3/h \\ P_a &= 8 \text{ bar} \\ T_a &= 24 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_N &= 1 \text{ bar} \\ T_N &= 25 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\dot{V}_N = \frac{P_a \cdot \dot{V}_a \cdot T_N}{T_a \cdot P_N} = 842.8 \frac{\text{m}^3}{h} = 14047.13 \text{ l/min}$$

De manera que trabajando cada regulador con la mitad del flujo (7023.5 l/min) es posible lograr una regulación correcta. Nótese que la curva que

presenta el fabricante es en base a una presión de entrada de 8 barg y la presión de entrada que se desea regular es 12.5 barg. Esto deja como evidencia que la regulación de presión va a mantener su estabilidad por un corto periodo de tiempo aunque suficiente para lograr un muestreo correcto de los parámetros.

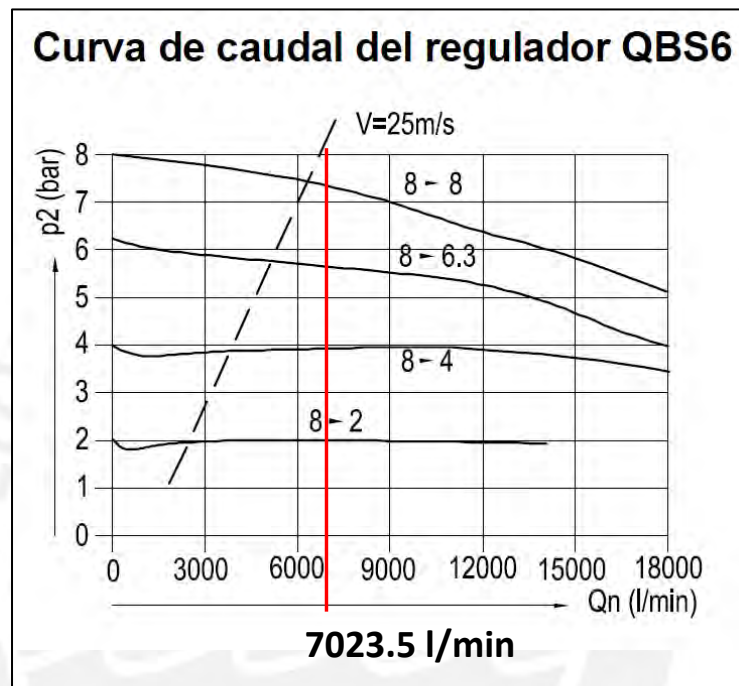


Fig. 2.10: Curva de caudal para regulador de presión.

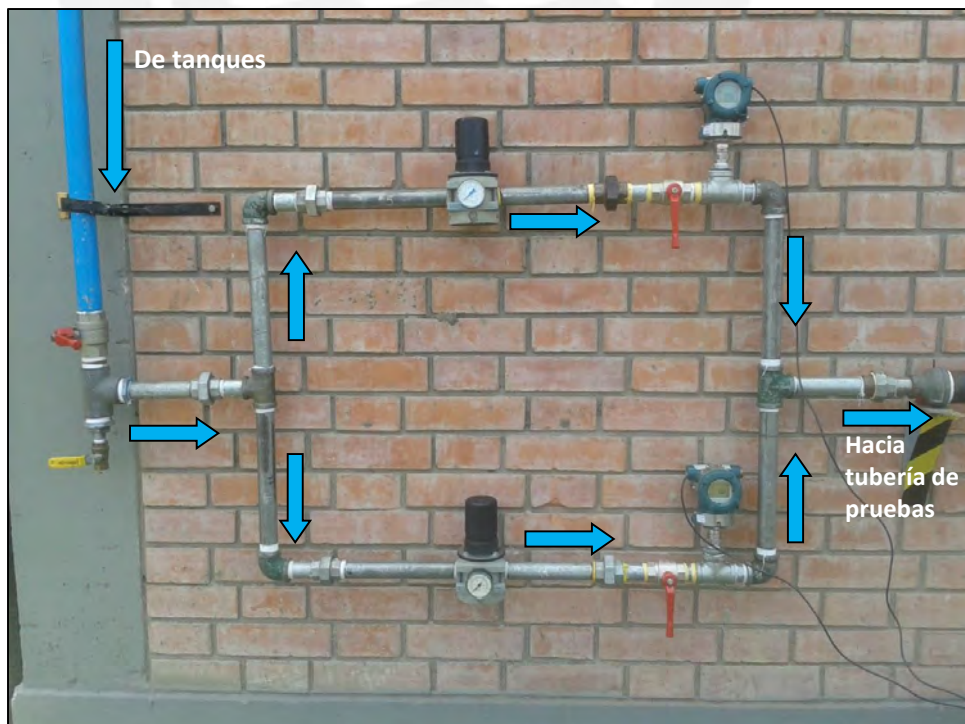


Fig. 2.11: Instalación de regulación de presión.

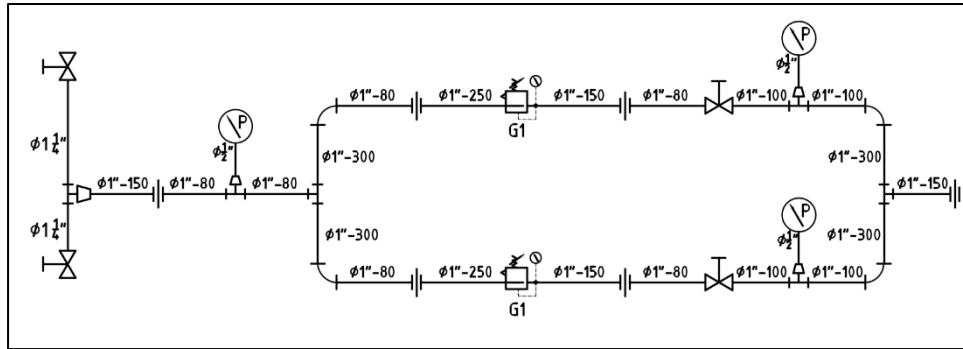


Fig. 2.12: Esquema de instalación de regulación de presión.

F. Línea de pruebas:

Inicia con la medición de la temperatura (figura 2.16) y presión del fluido de trabajo luego de la regulación de presión y antes de ingresar a las tuberías de prueba. Luego, el fluido atraviesa por las dos tuberías que son conectadas mediante una unión universal. Se inicia con la longitud de desarrollo (figura 2.17), existe una toma de presión tipo anillo (figura 2.18) que es bifurcada hacia un sensor de presión manométrica (figura 2.19) y hacia la toma de mayor presión de un sensor de presión diferencial (figura 2.20). Al final de la segunda tubería se tiene la segunda toma de presión que conduce hacia la toma de menor presión del sensor de presión diferencial. Finalmente, está la zona de medida de flujo mediante una placa orificio (figura 2.22) y la regulación de caudal (figura 2.14).

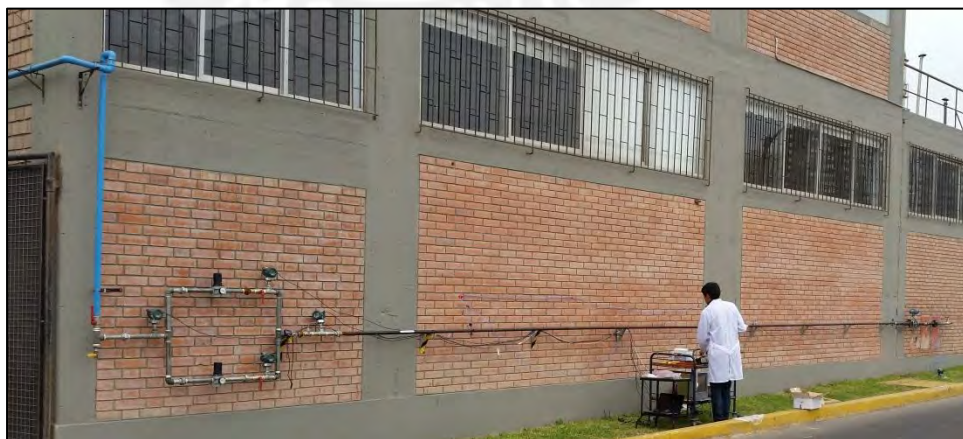


Fig. 2.13: Línea de pruebas

G. Regulación de caudal:

La regulación se va a realizar con una válvula de globo de diámetro nominal 1 ¼" al final de la línea.

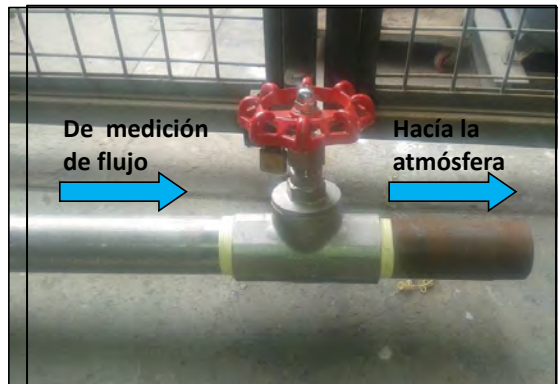


Fig. 2.14: Válvula de globo.

En la figura 2.15 se puede ver la instalación de línea de pruebas completa, desde la regulación de presión, pasando por la instalación de instrumentación, la línea de pruebas, hasta la regulación de caudal. En el anexo 1 se puede ver el esquema general de la instalación.



Fig. 2.15: Instalación de línea de pruebas

2.3.2. Instrumentación

Con la información sobre los parámetros de ensayo se procede a seleccionar la instrumentación para todas las variables

A. Medición de temperatura:

El sensor de temperatura (figura 2.16) se ha instalado al inicio de la línea de pruebas, de manera que permita caracterizar la viscosidad y densidad del fluido. La información técnica del instrumento se puede ver en la tabla 2.6, así como su hoja técnica en el anexo 2 y certificado de calibración en el anexo 3.



Fig. 2.16: Sensor de temperatura instalado.

Tabla 2.6: Datos técnicos del sensor de temperatura. (Omega)

Variable: Temperatura	
Denominación	Sensor de temperatura resistivo – RTD – 100 Ω
Marca	Omega
Rango	0 – 230 $^{\circ}\text{C}$
Precisión ²	Clase A: (0.15 +0.022 T) $^{\circ}\text{C}$

² El valor de la incertidumbre será determinado en el capítulo 3, punto 3.1.1.

B. Medición de presión manométrica:

Con la finalidad de completar la caracterización del fluido, se utiliza un sensor de presión manométrica al inicio del flujo desarrollado. El flujo desarrollado se calcula según la ecuación 1.39 para condición de mayor número de Reynolds estimada con el diámetro correspondiente a una tubería de diámetro nominal igual a 1 pulgada.

$$l_e = 4.4 \cdot Re^{\frac{1}{6}} \cdot d = 4.4 \cdot (7.27 \cdot 10^5)^{\frac{1}{6}} \cdot 0.0266 = 1.10$$

Para mantener un valor conservador, en este banco de ensayos se ha considerado 1.5 m (ver figura 2.17), superando la longitud de desarrollo estimada con el cálculo, de manera que se asegure las condiciones del fluido.

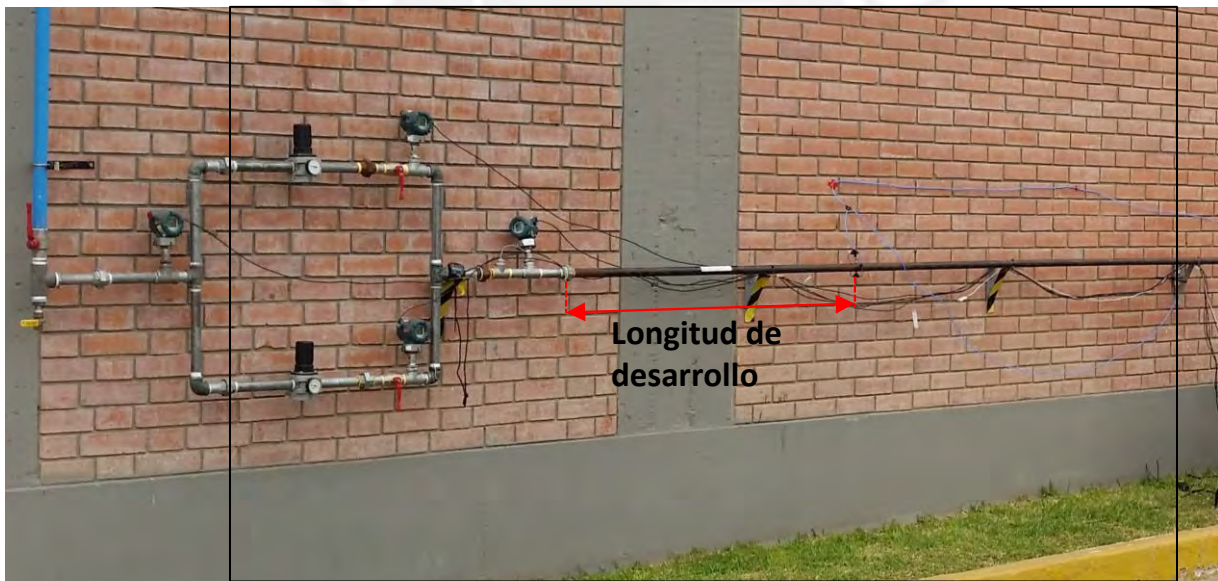


Fig. 2.17: Longitud de desarrollo.

La toma de presión se ha diseñado como un anillo que permite obtener una presión media entre cuatro puntos equidistantes en el perímetro de la sección de la toma, se puede ver en la figura 2.18. Esto permite una mejor medida de la presión estática en dicha sección.



Fig. 2.18: Toma de presión.

El sensor que permite la medida de la presión manométrica, toma la medida justo después de la longitud de desarrollo (toma de presión 1) como lo muestra la figura 2.19. El sensor y sus datos técnicos se pueden ver en la tabla 2.7, así como su hoja técnica en el anexo 4 y certificado de calibración en el anexo 5.

Tabla 2.7: Datos técnicos del sensor de presión manométrica (Omega)

Variable: Presión manométrica	
Denominación	Transmisor de presión PX01
Marca	Omega
Rango	0 – 20.7 bar
Precisión	0.05 % FSO
Tiempo de respuesta	4 ms



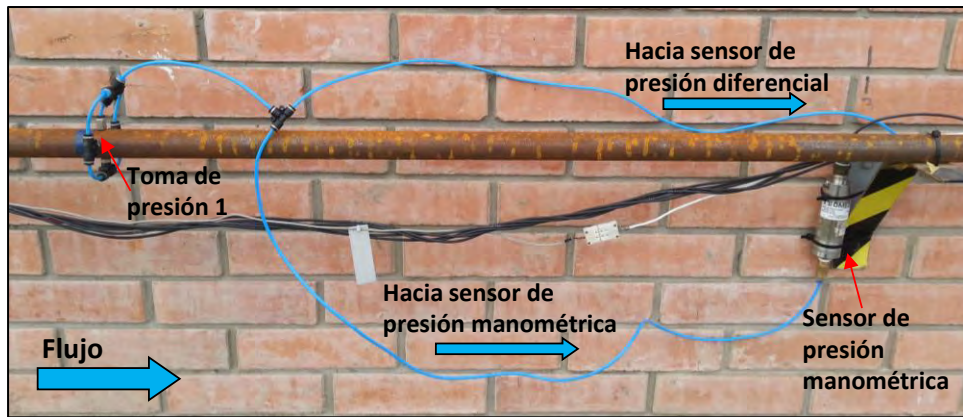


Fig. 2.19: Toma de presión del sensor de presión manométrica.

C. Medición de presión diferencial:

La caída de presión a lo largo de la tubería se considera desde la toma luego de la longitud de desarrollo (figura 2.19) hasta el final de la segunda tubería. El ingreso de mayor presión en el sensor se obtiene de la toma de luego de la longitud de desarrollo y el ingreso de menor presión, de la toma al final de la tubería. Esta última toma también es de tipo anillo (figura 2.18). El sensor de presión diferencial se puede ver en la figura 2.20, sus datos técnicos se muestran en la tabla 2.8, así como su hoja técnica en el anexo 6 y certificado de calibración en el anexo 7.

Tabla 2.8: Datos técnicos del sensor de presión diferencial. (Omega)

Variable: Diferencia de presiones	
Denominación	Transmisor de presión diferencial
Marca	Omega
Rango	0 – 30 psi
Precisión	0.08 % BSL
Tiempo de respuesta	< 1 ms



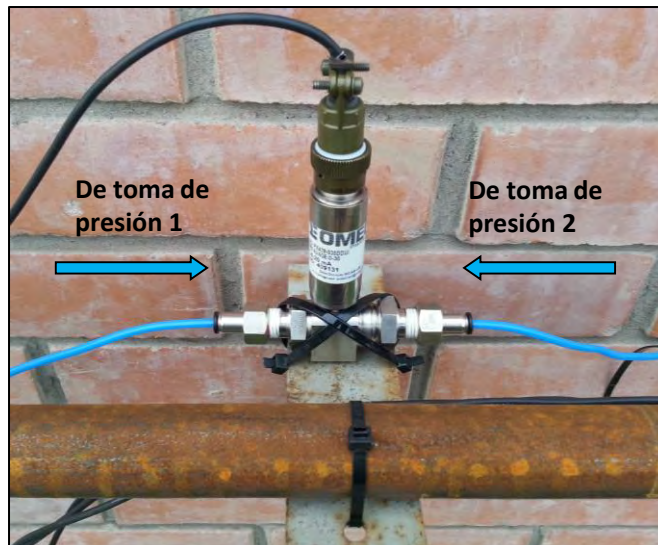



Fig. 2.20: Sensor de presión diferencial instalado.

D. Medida de flujo en la placa orificio.


Luego las tuberías de prueba se coloca una placa orificio que permite medir el flujo volumétrico. La placa ha sido diseñada siguiendo la norma BS en ISO 5167-1:2003 y cuenta con las características descritas en la tabla 2.9. Se puede ver el detalle del plano de fabricación en el anexo 8.

Tabla 2.9: Datos técnicos de la placa orificio.

Variable: Flujo volumétrico	
Denominación	Placa orificio
Marca	Diseño propio ³
Precisión	Determinado según norma ⁴
Diámetro de orificio	26.0 mm
Diámetro de tubería en la que se aloja	40.37 mm



Corriente arriba



Corriente abajo

³ El diseño se realizó según la norma ISO 5167 y la fabricación estuvo a cargo del Laboratorio de Manufactura de la PUCP. Ver plano en el anexo 8.

⁴ La incertidumbre se determinará en el capítulo 3, punto 3.2.3.

Las medidas de los diámetros del orificio y el diámetro interior de la tubería que aloja a la placa, se ha utilizado un calibre de Vernier con las siguientes características.

Tabla 2.10: Datos técnicos del calibre de Vernier. (Mitutoyo, 2015)

Variable: Flujo volumétrico	
Denominación	Calibre de Vernier digital
Marca	Mitutoyo
Rango	0 a 150 mm
Precisión	± 0.0254 mm



Dado que la placa orificio es un instrumento de obstrucción al flujo, se requiere medir la diferencia de presión ocasionada. Para esto se ha colocado un sensor de presión diferencial con características según la tabla 2.11, así como su hoja técnica en el anexo 9.

Tabla 2.11: Datos técnicos del transmisor de presión diferencial. (Yokogawa, 2015)

Variable: Flujo volumétrico	
Denominación	Sensor de presión diferencial para placa orificio
Marca	Yokogawa
Rango	-100 a 100 kPa
Precisión	0.04% FS
Tiempo de respuesta	90ms



Este sensor de presión diferencial es conectado a las tomas de presión corriente arriba y corriente debajo de la placa orificio. Estas están

ubicadas a l_1 y l_2 de distancia, respectivamente, de la cara corriente arriba de la placa orificio, tal como se puede ver en la figura 2.21.

La norma indica que para no alterar el coeficiente de descarga, los valores de l_1 y l_2 deben tener las siguientes restricciones:

$$0.9 \cdot d_{PL} \leq l_1 \leq 1.0 \cdot d_{PL}$$

$$0.48 \cdot d_{PL} \leq l_2 \leq 0.52 \cdot d_{PL}, \text{ para } \beta \leq 0.6$$

$$0.49 \cdot d_{PL} \leq l_2 \leq 0.51 \cdot d_{PL}, \text{ para } \beta > 0.6$$

Para este diseño se ha considerado:

$$l_1 = 40.3; 0.9 \cdot d_{PL} \leq l_1 \leq 1.0 \cdot d_{PL}$$

$$l_2 = 20.5; 0.49 \cdot d_{PL} \leq l_2 \leq 0.51 \cdot d_{PL}, \text{ para } \beta > 0.6$$

Cumpliendo dichas restricciones, la norma indica que se debe considerar los siguientes valores para L_1 y L'_2 .

$$L_1 = \frac{l_1}{d_{PL}} = 1; L'_2 = \frac{l'_2}{d_{PL}} = 0.47$$

Donde l'_2 corresponde a la distancia de la toma de presión aguas abajo hasta la cara agua abajo de la placa.

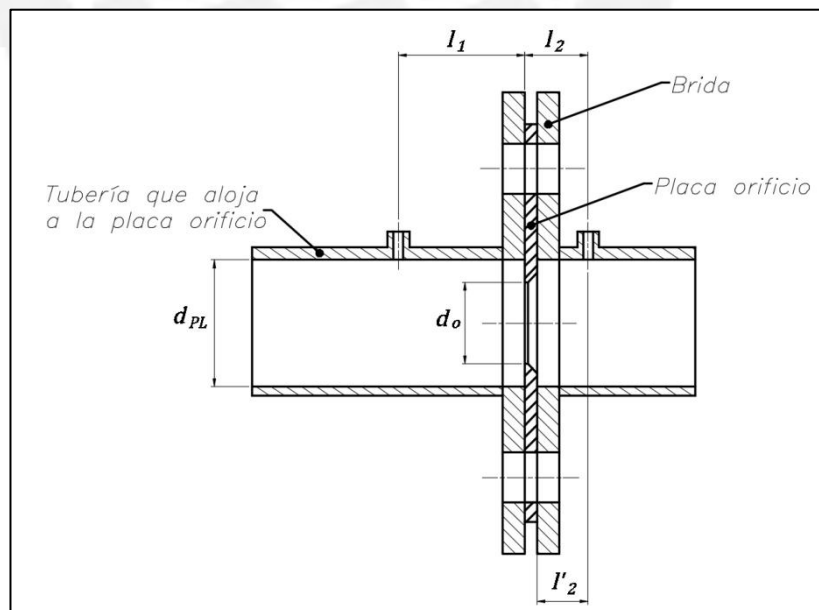


Fig. 2.21: Longitudes a las tomas de presión.

Se puede ver en la figura 2.22 la instalación de la placa orificio para la medición de flujo.

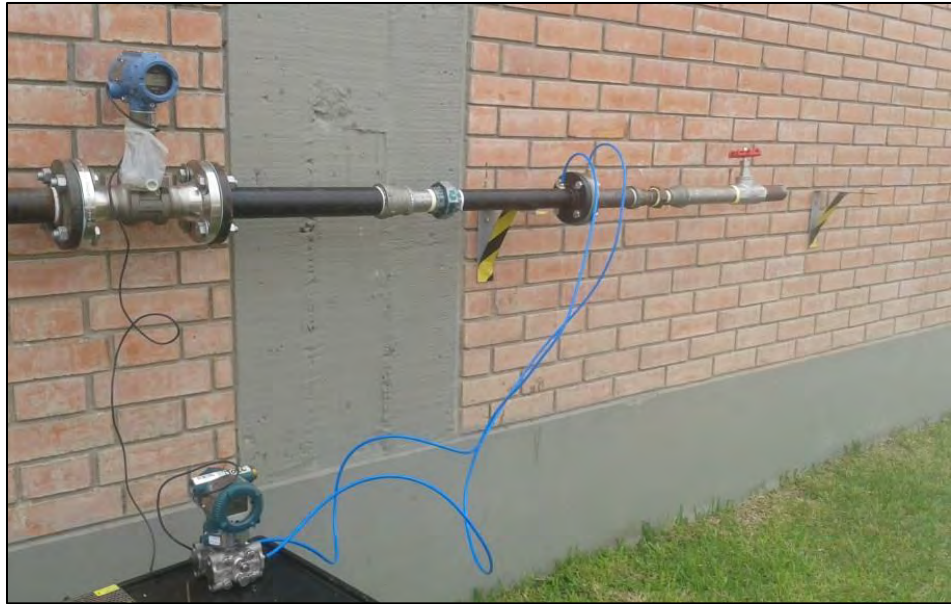


Fig.2.22: Instalación de placa orificio.

E. Sensores de presión manométrica para regulación de presión:

La instalación de regulación cuenta con 04 sensores de presión manométrica, estos se utilizan de manera referencial para lograr una correcta regulación. Los datos técnicos se muestran en la tabla 2.12, así como su hoja técnica en el anexo 10.

Tabla 2.12: Datos técnicos del sensor del sensor de flujo. (Yokogawa, 2015)

Variable: Presión manométrica de regulación	
Denominación	Transmisor de presión EJX530A
Marca	Yokogawa
Rango	0 – 20 bar
Precisión	0.04 % FS
Tiempo de respuesta	90 ms




2.3.3. Sistema de adquisición de datos

Todos los sensores generan señales análogas de 4-20 mA, esta señal es dispuesta hacia un registrador de datos que almacena la información y permite extraer data en formato CVS. El registrador de datos es de marca Honeywell, sus características se muestran en la tabla 2.13.

Tabla 2.13: Datos técnicos del registrador de datos. (Honeywell)

Variable: Presión manométrica de regulación	
Denominación	Registrador de datos Multitrend
Marca	Honeywell




2.3.4. Medida de diámetro interno de tuberías:

Para determinar el diámetro interno de las tuberías de prueba se ha utilizado las probetas mostradas en la figura 2.25, 05 probetas para cada material, donde se ha medido tres diámetros para cada probeta. La instrumentación se describe en la tabla 2.14.

Tabla 2.14: Datos técnicos del micrómetro de interiores.

Variable: Diámetro interno de la tubería	
Denominación	Micrómetro de interiores
Marca	M & W
Rango	25 – 50 mm
Precisión⁵	$(6+d/50) \mu\text{m}$



⁵ La incertidumbre se determinará en el capítulo 3, punto 3.2.5.

2.3.5. Medida de longitud de tuberías:

Respecto a la longitud del tramo de pruebas comprendido entre tomas de presión, se ha utilizado un flexómetro que se describe en la tabla 2.15.

Tabla 2.15: Datos técnicos del flexómetro

Variable: Longitud del tramo de pruebas	
Denominación	Flexómetro
Marca	Stanley
Rango	20 m
Precisión ⁶	Clase II: $(0.3 + 0.2 L)$ mm



2.3.6. Procedimiento de ensayos:

- 1) Asegurarse de que la válvula de bola a la descarga del compresor se encuentra cerrada.
- 2) Asegurarse de que la válvula de bola al inicio de la línea de pruebas se encuentra cerrada.
- 3) Encender el compresor de tornillo Atlas Copco y el secador de aire.
- 4) Asegurarse que las válvulas de descarga de los dos tanques (1 m^3 y 0.7 m^3) se encuentran cerradas.
- 5) Abrir las válvulas que permitan admitir aire en los tanques.
- 6) Realizar la disposición de válvulas para que la descarga de ambos tanques se realice en paralelo hacia la línea de pruebas.
- 7) Realizar el llenado de los tanques hasta lograr la presión de servicio de 12.5 barg.
- 8) Asegurarse que las válvulas de descarga de los reguladores se encuentran cerradas.

⁶ La incertidumbre se determinará en el capítulo 3, punto 3.2.6.

- 9) Abrir la válvula de bola al inicio de la línea de pruebas de tal manera que el aire comprimido se desplazase hasta los reguladores de presión colocados en la línea.
- 10) Realizar la regulación de los dos reguladores hasta la presión de ensayo, la cual podría ser 1 bar.
- 11) Colocar el registrador Honeywell en modo de grabado de datos. Este se encuentra conectado a todos sensores colocados en el sistema (sensor de temperatura, sensores de presión manométrica, sensor de presión diferencial en la tubería, sensor de presión diferencial en la placa orificio y).
- 12) Colocar la apertura de la válvula de globo ubicada al final de la línea según corresponda el ensayo (ver tabla 2.16).
- 13) Abrir las válvulas ubicadas luego de los reguladores de presión para liberar el flujo de aire y así circule por el sistema a través de la tubería a ensayar.
- 14) Observar que el registro de datos se desarrolle con normalidad mientras la presión de regulación es estable.⁷
- 15) Luego de que los tanques se hayan descargado y se encuentren por debajo de la presión regulada anteriormente, se procede a obstruir el paso del flujo de aire cerrando las válvulas de los reguladores.
- 16) Repetir los pasos, desde el 7 hasta el 15, para las diferentes aperturas que indica la tabla 2.16.
- 17) Repetir los pasos, desde el 7 hasta el 16, para diferentes condiciones de presión manométrica de ensayo, tales como: 1 bar, 3 bar, 5 bar y 7 bar.

⁷ En algunas medidas fue necesario realizar un ajuste manual y progresivo de los reguladores de presión durante el muestreo. Eso sucede debido a que el flujo podría resultar muy alto para los reguladores de presión.

Tabla 2.16: Aperturas para la válvula reguladora de caudal.

Acero al carbono sin costura (CS – SL)				
N° de dato	Apertura en vueltas para cada presión de línea			
	1 barg	3 barg	5 barg	7 barg
1	1 ½	¾	¾	¾
2	1 5/8	7/8	1	1
3	1 ¾	1	1 ¼	1 ¼
4	2	1 1/8	1 ½	1 ½
5	2 ¼	1 ¼	1 ¾	1 ¾
6	2 ½	1 3/8	2	2
7	2 ¾	1 ½	2 ¼	2 ¼
8	3 ¼	1 ¾	2 ½	-
9	3 ¾	2	2 ¾	-
10	-	2 1/8	-	-
11	-	2 ¼	-	-
12	-	2 ½	-	-
13	-	2 ¾	-	-
14	-	3	-	-
Acero al carbono con costura (CS – WS)				
N° de dato	Apertura en vueltas para cada presión de línea			
	1 barg	3 barg	5 barg	7 barg
1	1 ½	¾	¾	½
2	1 ¾	1	1	¾
3	2	1 ¼	1 ¼	1
4	2 ¼	1 ½	1 ½	1 ¼
5	2 ½	1 ¾	1 ¾	1 ¾
6	2 ¾	2	2	2 ½
7	3	2 ¼	2 ¼	2 ¾
8	-	2 ½	-	-
9	-	2 ¾	-	-

2.4. Determinación de la rugosidad superficial:

La rugosidad superficial se mide con un rugosímetro de superficies marca Mahr, modelo MarSurf PS1 (ver figura 2.23), con indentador deslizante de 2 µm que permite obtener valores de R_a , R_q y R_z .

Para realizar esta medición es necesario definir los siguientes parámetros: La longitud *cutoff*, la longitud de desplazamiento, la longitud de evaluación y el número de longitudes de prueba sobre la longitud de evaluación (n).

La longitud *cutoff* (l_c) es un valor que se debe asignar a los filtros electrónicos o digitales del instrumento y es definido por la norma ISO 4288 (ver tabla 2.17) (ASME B46.1-1995). Para el caso de las probetas a analizar, se conoce a priori que van a tener rugosidades R_a mayores a 2 µm, por tanto se utiliza $l_c = 2.5 \text{ mm}$.



Fig. 2.23: Rugosímetro MarSurf PS1. (Tomado de Mahr)

Tabla 2.17: Determinación del Cutoff (Tomado de ISO 4288, 1996)

Perfiles aperiódicos		Cutoff
R_Z (μm)	R_a (μm)	l_c (mm)
$R_Z \leq 0.5$	$R_a \leq 0.1$	0.25
$0.5 < R_Z \leq 10$	$0.1 < R_a \leq 2$	0.80
$R_Z > 10$	$R_a > 2$	2.50

La longitud de desplazamiento (l_t) es la longitud del perfil por la cual se desplaza el instrumento para establecer un longitud de evaluación representativa (ASME B46.1, 1995), se puede ver en la figura 2.24. Para el presente ensayo se ha tomado $l_t = 17.5 \text{ mm}$.

La longitud de evaluación (l_n) es la longitud exacta sobre la cual los parámetros de superficie son evaluados. Para una estadística apropiada, debe contener un número de longitudes de prueba, como se ve en la figura 2.24 (ASME B46.1, 1995). Para las presentes mediciones se ha utilizado $l_n = 12.5 \text{ mm}$, valor que supera el mínimo requerido por la norma ASME B46.1-1955 ($l_{n,\text{mínimo}} = 7.5 \text{ mm}$) en su tabla 4-2 y que recomienda ISO4288, según la tabla 2.18.

Tabla 2.18: Determinación de la longitud de pruebas (Tomado de ISO4288-1996)

Perfiles aperiódicos		Longitud de evaluación
R_z (μm)	R_a (μm)	l_n (mm)
$R_z \leq 0.5$	$R_a \leq 0.1$	1.25
$0.5 < R_z \leq 10$	$0.1 < R_a \leq 2$	4.00
$R_z > 10$	$R_a > 2$	12.50

La longitud de prueba (l) es una división de la longitud de evaluación, el número (n) de longitudes de prueba contenidas en l_n , depende del instrumento. Dado que esta medición se hace con un instrumento de contacto, ISO4288 recomienda $n = 5$ (ASME B46.1-1995). Así, para esta medición se tiene $l = 2.5 \text{ mm}$.

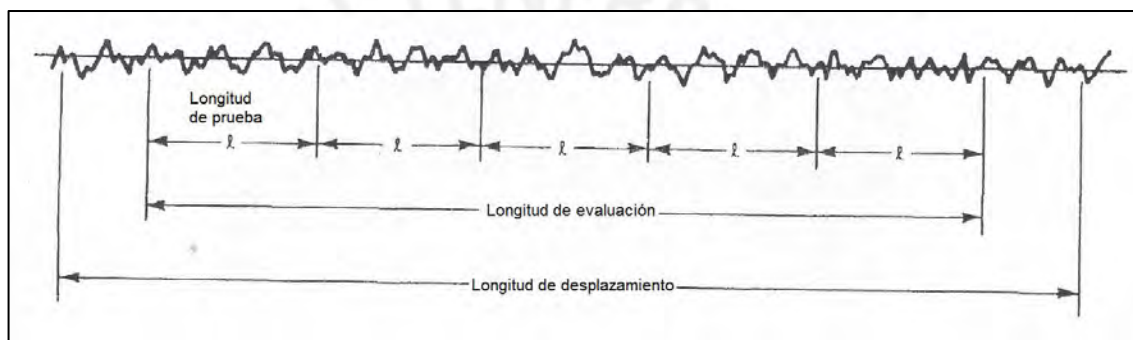


Fig. 2.24: Parámetros de medición de rugosidad superficial. (Tomado de ASME B46.1-1995)

El nivel de incertidumbre para esta medición resulta de la calibración del instrumento. Este tiene un patrón interno y realiza su calibración mostrando el resultado en el visualizador. Todos estos parámetros de medición se resumen en la tabla 2.19.

Tabla 2.19: Resumen de parámetros de medición de rugosidad superficial.

Variable: Rugosidad superficial	
Denominación	Rugosímetro MarSurf PS1
Marca	Mahr
Indentador	2 μm
Longitud <i>Cutoff</i> (l_c)	2.5 mm
Longitud de desplazamiento (l_t)	17.5 mm
Longitud de evaluación (l_n)	12.5 mm
Longitud de prueba (l)	2.5 mm
Número (n) longitudes de prueba	5
Error	9%. $R_{(a,z,q)}$

La medición se ha realizado sobre la superficie interna de las tuberías, para esto se ha tomado 0.5 metros de cada tubería y se ha seccionado en 05 probetas que

se pueden observar en la figura 2.25. La rugosidad se ha medido en 06 zonas, ubicadas 03 en cada extremo de cada probeta, se puede ver las zonas en la figura 2.26.



Fig. 2.25: Izquierda: Probetas de acero al carbono sin costura (CS SL), derecha: Probetas de acero al carbono con costura (CS WS).

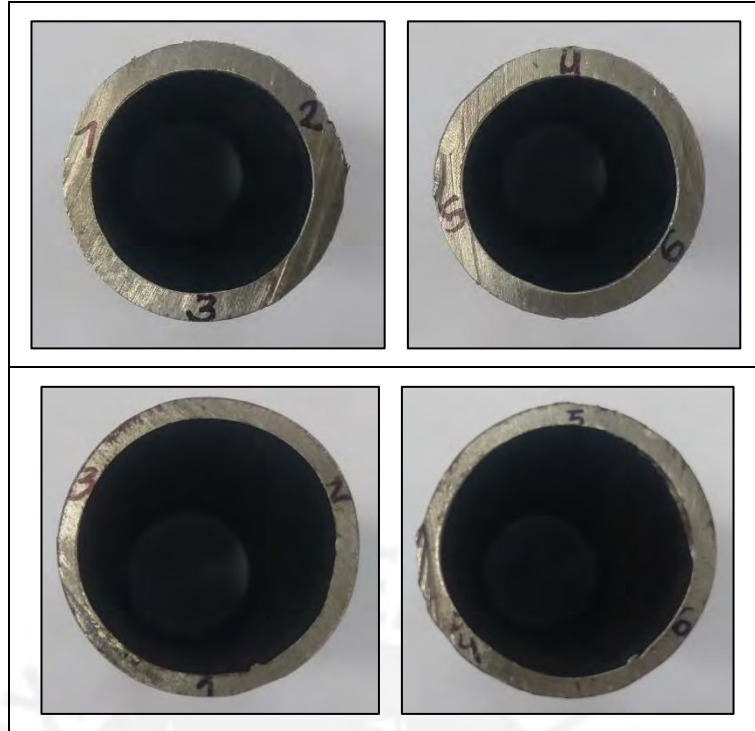


Fig. 2.26: Arriba: Zonas de medida de rugosidad en las tuberías CS SL, abajo: Zonas de medida de rugosidad en las tuberías CS WS.

El procedimiento para realiza esta medición se describe en la siguiente rutina, además se pueden ver imágenes del ensayo en la figura 2.27:

1. Limpiar la superficie interna de la probeta a ensayar con un paño suave de microfibra y alcohol isopropílico.
2. Solo para la primera vez que se realiza la medida, se debe calibrar el instrumento y obtener el valor de la incertidumbre.
3. Configurar el instrumento para que muestre los valores Ra , Rq , Rz .
4. Configurar los parámetro l_c , l_t , l_n y n , según la tabla 2.19.
5. Verificar el estado del indentador.
6. Introducir el cabezal dentro de la tubería, considerando la longitud de desplazamiento del indentador l_t .
7. Posar el indentador sobre la zona que se desea medir (figura 2.26).
8. Iniciar la medición, esperar que el indentador recorra la zona.
9. Tomar nota de la medida que se muestra en el visualizador para los parámetros Ra , Rq , Rz .

10. Retirar el instrumento.

11. Repetir los pasos del 5 al 10 para la siguiente zona.



Fig. 2.27: Imágenes del ensayo de rugosidad superficial.

CAPÍTULO 3

Procesamiento de Datos

En el siguiente capítulo se mostrará la data obtenida durante la experimentación, presentada como valores medios con su respectiva incertidumbre. Se expondrán también, los cálculos realizados para determinar el factor de fricción y rugosidad hidráulica para los dos materiales evaluados. Se evaluará el comportamiento del factor de fricción y se comparará la rugosidad hidráulica con las medidas de rugosidad superficial y los modelos de rugosidad hidráulica existentes.

3.1. Datos obtenidos:

En las siguientes líneas se presentan los datos de temperatura del fluido al inicio de la tubería de pruebas, presión manométrica del fluido al inicio de la tubería de pruebas, pérdida de presión en la tubería de pruebas y diferencia de presión producida por la placa orificio. Todas estas medidas para las dos tuberías estudiadas: acero al carbono sin costura (CS - SL) y acero al carbono con costura (CS - WS).

Cada dato mostrado corresponde a la media de un determinado número de muestras medidas en un lapso de tiempo considerable para la estabilización de los valores. A cada media le corresponde también un error o incertidumbre correspondiente a la medición, en función al error aleatorio y al error sistemático, descrito por la ecuación 3.1.

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{al}^2 + \varepsilon_{sis}^2} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

- ε : Error total de la medición
- ε_{al} : Error aleatorio
- ε_{sis} : Error sistemático

El error aleatorio está en función de la desviación estándar (σ) y número de muestras evaluadas en el lapso de tiempo.

$$\varepsilon_{al} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

- ε_{al} : Error aleatorio
- σ : Desviación estándar
- N : Número de datos

El error sistemático (ε_{sis}) depende del instrumento, su determinación es particular para cada parámetro. Los detalles de la instrumentación utilizada para cada parámetro se pueden ver en el punto 2.3.2.

Para cada parámetro, los datos se presentan diferenciando las cuatro condiciones de presión manométricas en la línea (1 barg, 3 barg, 5 barg y 7barg). La numeración de los datos se incrementa en función de la apertura de la válvula de globo al final de la línea de pruebas, según el procedimiento explicado en el punto 2.3.4. Se puede notar que para cada tubería se han evaluado un número determinado de aperturas, tal como lo resume la siguiente tabla.

Tabla 3.1: Número de aperturas evaluadas para cada material.

Presión de línea (barg)	Símbolo	Color	Número de aperturas evaluadas	
			Acero al carbono sin costura CS-SL	Acero al carbono con costura CS-WS
1	○	Azul	09	07
3	◀	Rojo	14	09
5	◇	Negro	09	07
7	□	Verde	07	07

3.1.1. Temperatura:

En las siguientes figuras, se puede observar que el valor de la temperatura es próximo a la temperatura ambiental dado que el compresor es de tipo tornillo y cuenta con un secador a la salida.

El sensor de temperatura es de tipo resistivo RTD 100 Ω - Clase A, por tanto tiene un error sistemático descrita por IEC 60751:2008⁸, según la ecuación 3.3. (Omega).

$$\varepsilon_{sis,T_{IN}} = 0.15 + 0.002 * |\bar{T}_{IN}| \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

\bar{T}_{IN} : Temperatura media del fluido, °C

La incertidumbre total de la medida de temperatura se determinará según la ecuación 3.1.

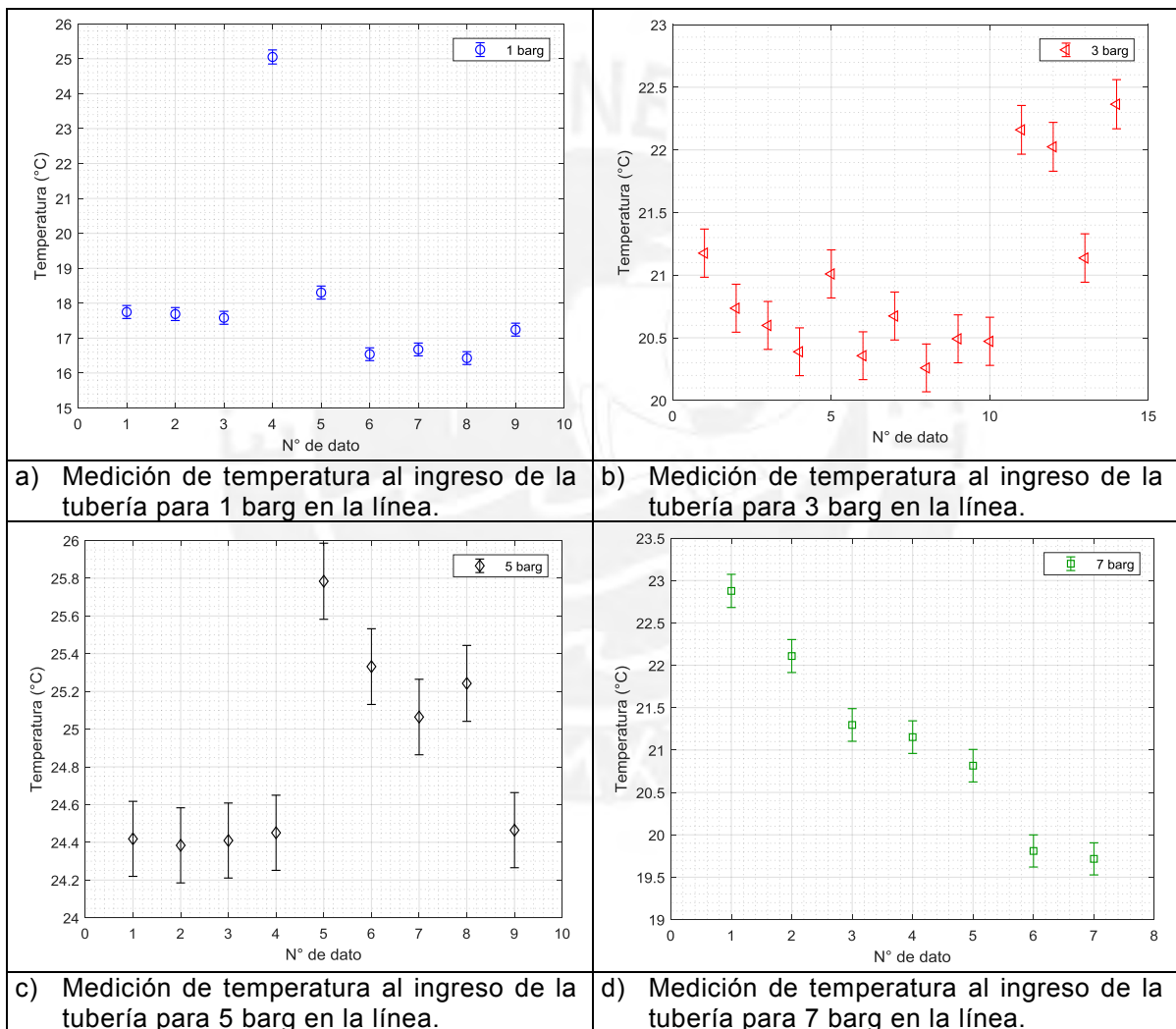


Fig. 3.1: Medición de la temperatura (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

⁸ IEC: International Electrotechnical Commission. IEC 60751: 2008 – *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*.

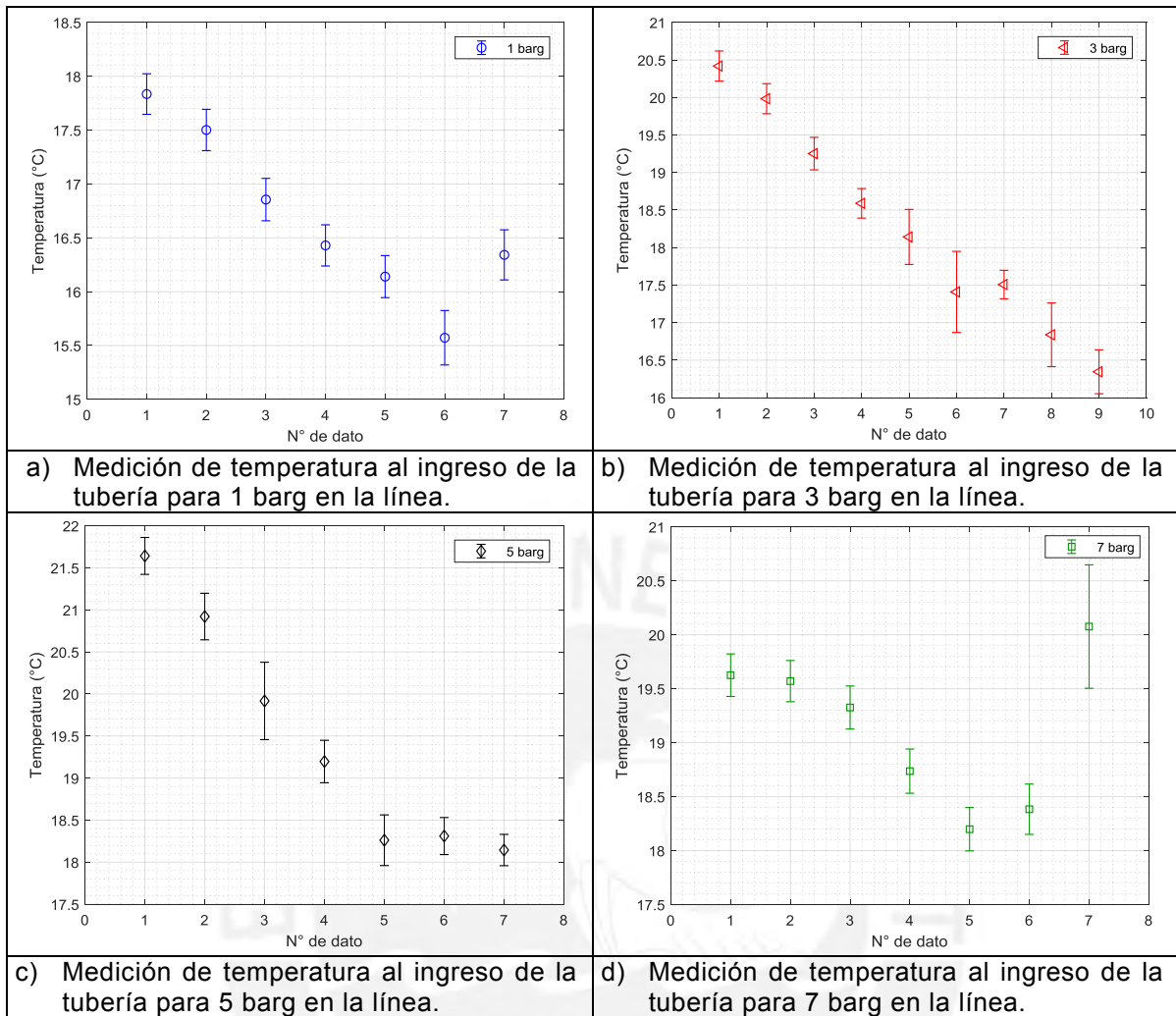


Fig. 3.2: Medición de la temperatura (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.1.2. Presión manométrica al inicio de la tubería:

Esta presión corresponde a la presión de línea, luego de la regulación de presión, al inicio de la tubería de pruebas, luego de la longitud de desarrollo. Tal como se muestra el punto 2.3.2.B.

El sensor utilizado cuenta con la siguiente incertidumbre descrita por el fabricante (Omega).

$$\varepsilon_{sis,P_{IN}} = 0.05\% \cdot F.S \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

$F.S$: Escala completa, bar

$$\varepsilon_{sis,P_{IN}} = \frac{0.05}{100} \cdot (20.7 - 0) = 0.01035 \text{ bar}$$

Este valor es constante para todas la muestra y será incluida en la ecuación 3.1 para determinar la incertidumbre total de cada medida de presión manométrica al inicio de la tubería.

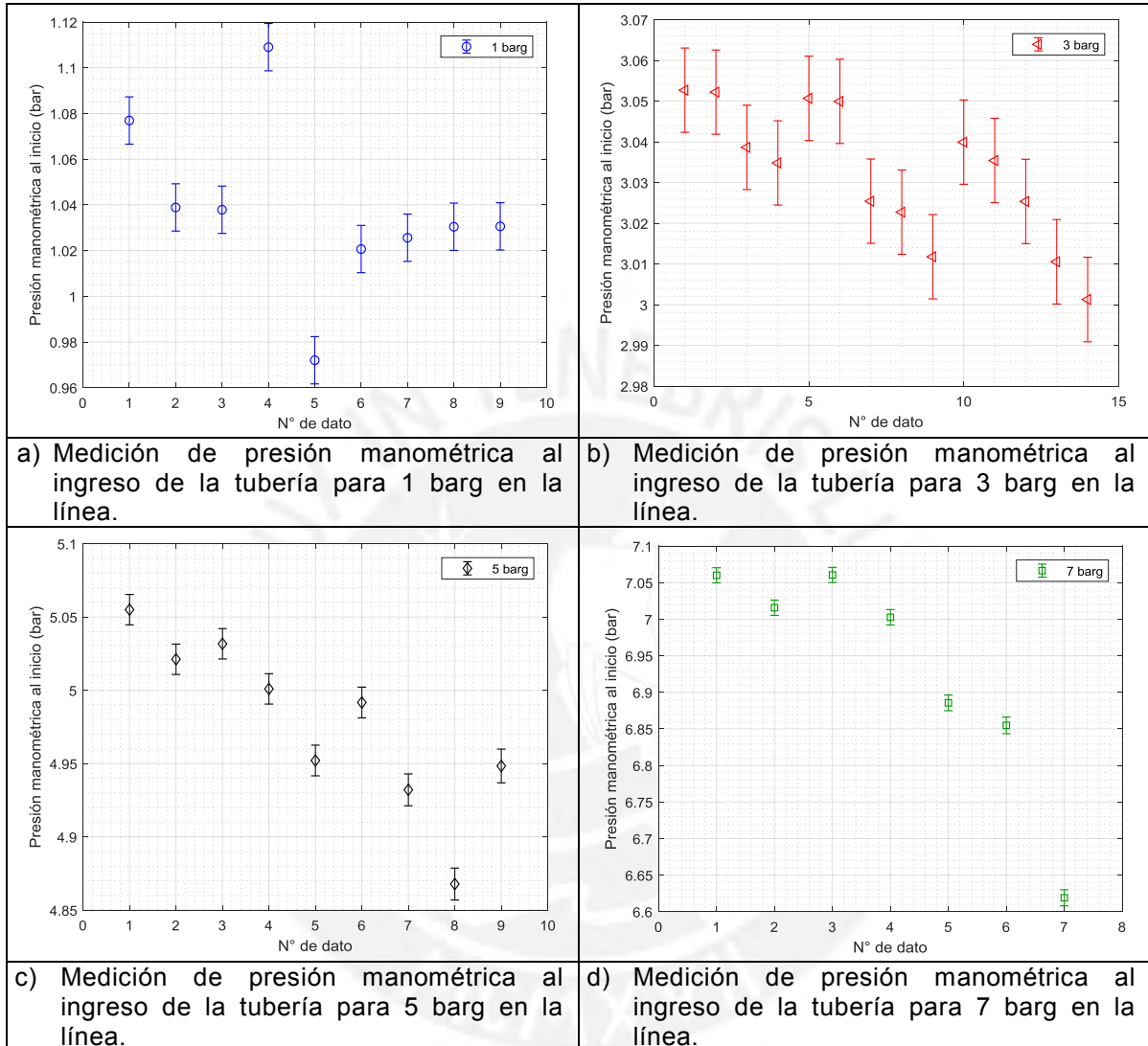


Fig. 3.3: Medición de la presión manométrica al inicio de la tubería (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

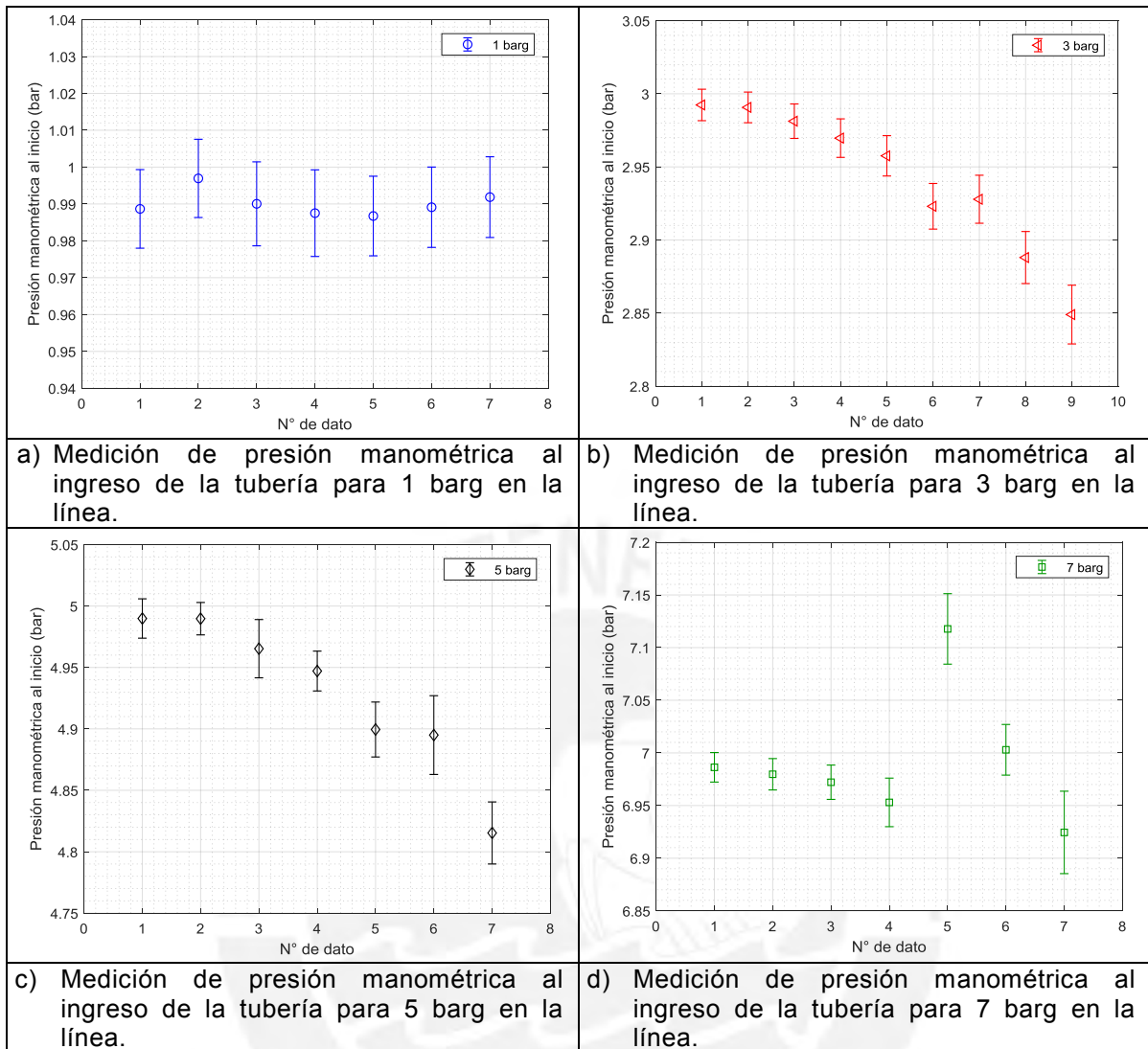


Fig. 3.4: Medición de la presión manométrica al inicio de la tubería (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.1.3. Pérdida de presión en la tubería:

Esta variable representa la diferencia de presión en el fluido al atravesar la tubería, en las figuras se puede notar que a mayor apertura de la válvula reguladora de caudal, mayor es la pérdida de presión debido al incremento del caudal.

La incertidumbre del instrumento utilizado se define según el fabricante (Omega).

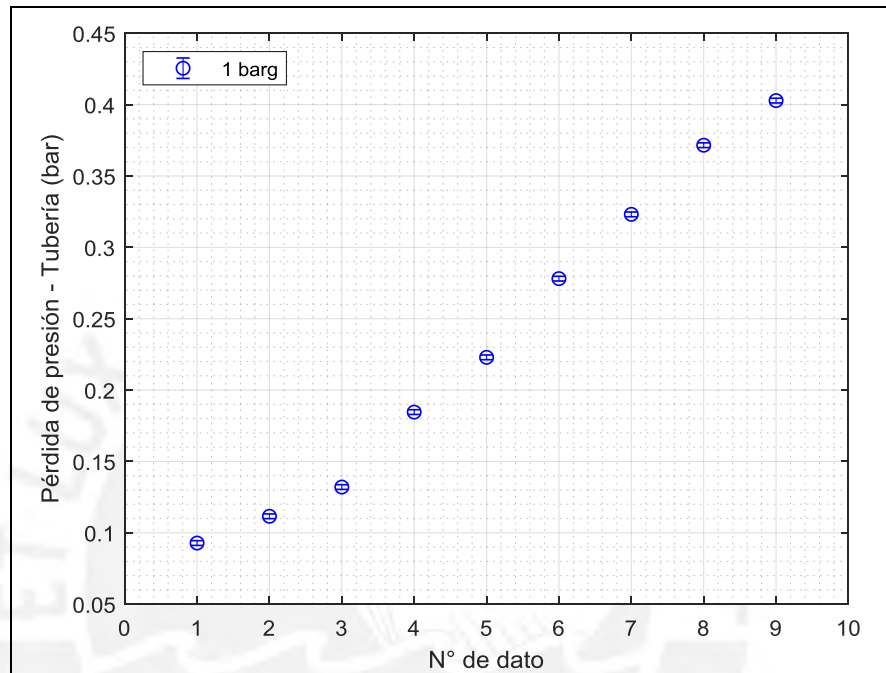
$$\varepsilon_{sis,\Delta P_{Tub}} = 0.08\% \cdot F.S \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

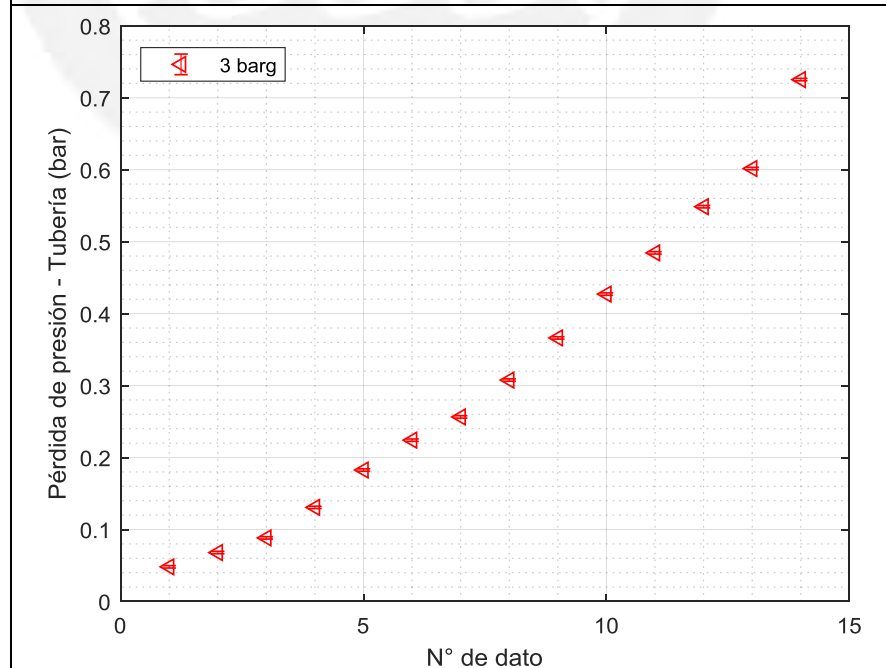
$F.S$: Escala completa, bar

$$\varepsilon_{sis,\Delta P_{Tub}} = \frac{0.08}{100} \cdot (2 - 0) = 0.0016 \text{ bar}$$

Este valor es constante para toda la muestra y será incluida en la ecuación 3.1 para determinar la incertidumbre total de la medida de pérdida de presión en la tubería. Se puede notar en las siguientes figuras que la incertidumbre total, representada por las barras, es más pequeña que el símbolo que marca la media.



a) Medición de la pérdida de presión en la tubería para 1 barg en la línea.



b) Medición de la pérdida de presión en la tubería para 3 barg en la línea.

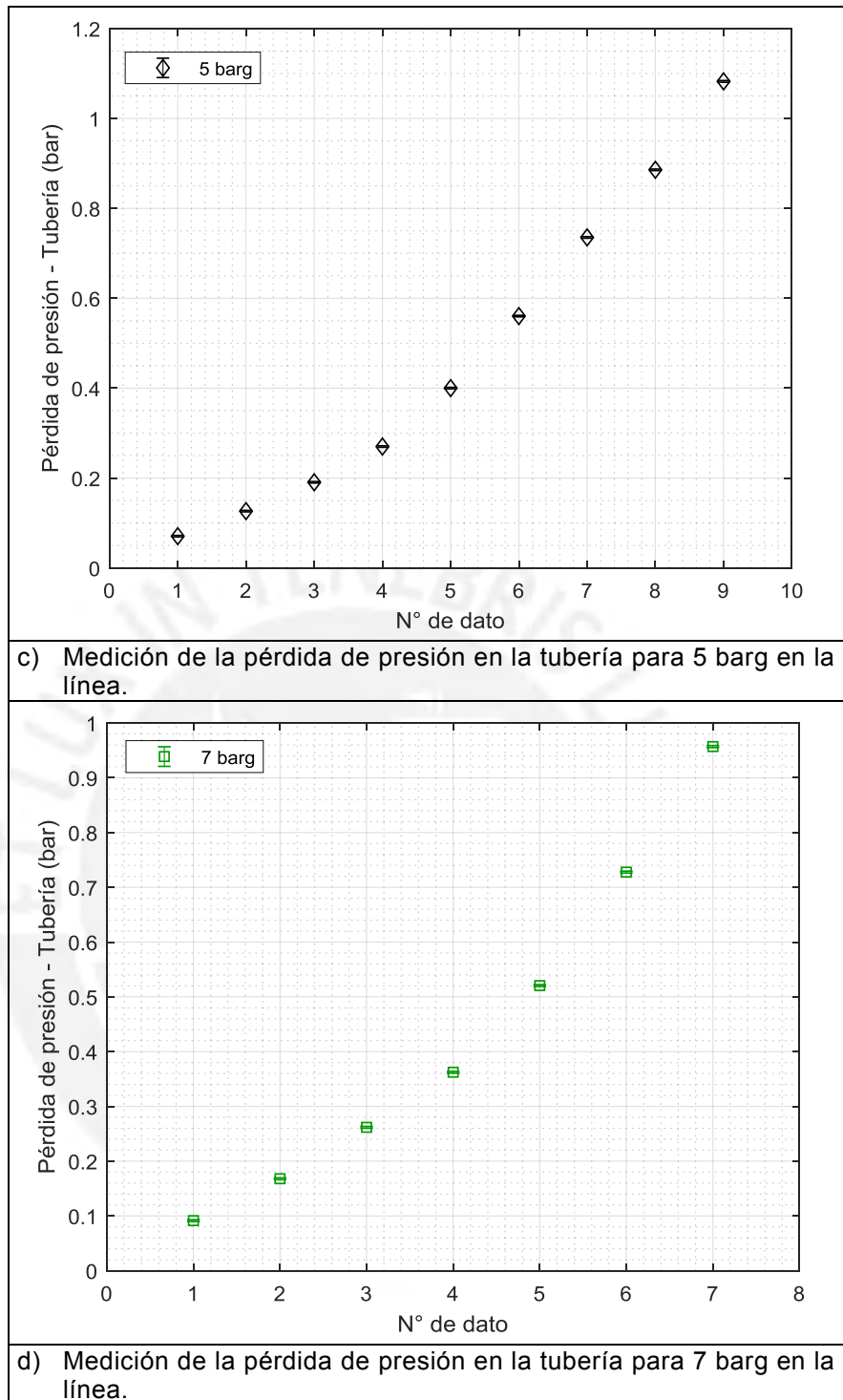
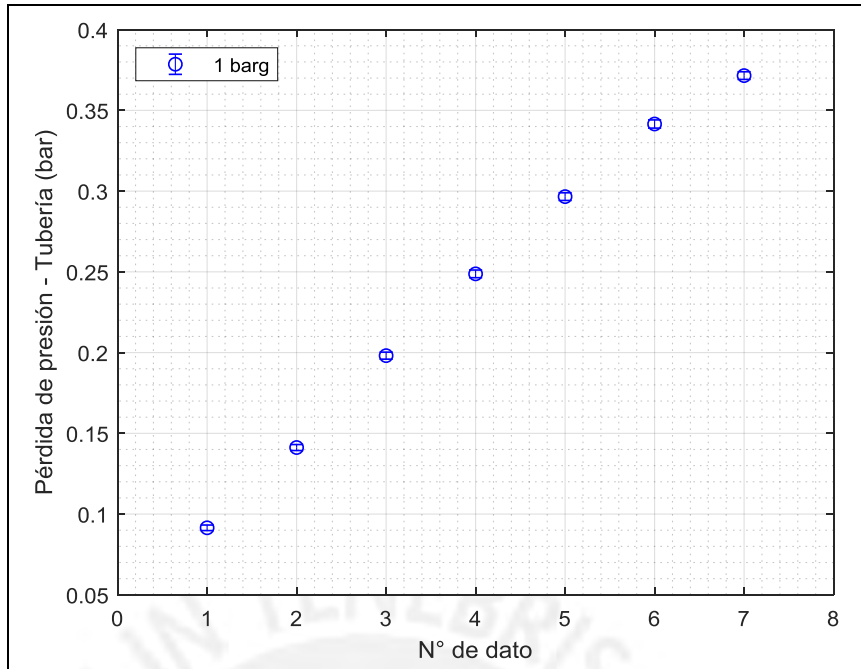
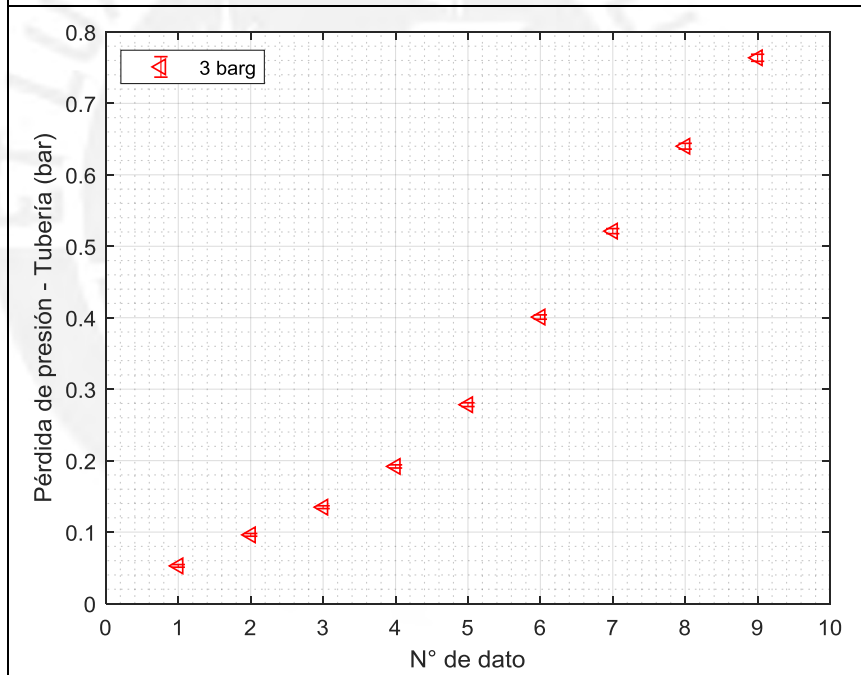


Fig. 3.5: Medición de la presión diferencial en la tubería (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).



a) Medición de la pérdida de presión en la tubería para 1 barg en la línea.



b) Medición de la pérdida de presión en la tubería para 3 barg en la línea.

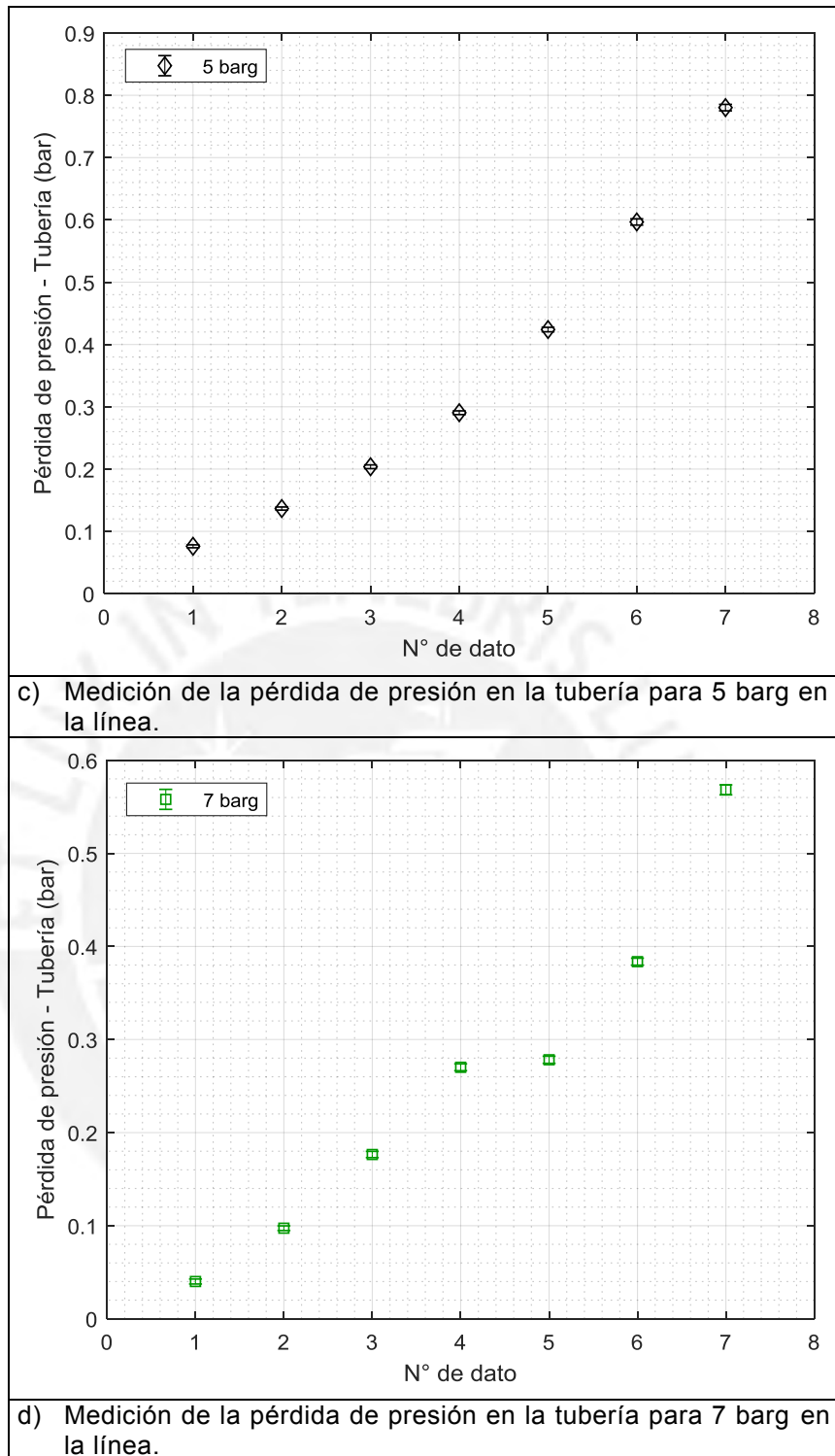


Fig. 3.6: Medición de la presión diferencial en la tubería (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.1.4. Diferencia de presión en la placa orificio:

Esta variable permite cuantificar la diferencia de presión ocasionada por el paso del fluido a través de la placa orificio. Como se puede ver en las

siguientes figuras, el valor se incrementa en función a la apertura de la válvula reguladora de caudal.

La incertidumbre del instrumento utilizado se define según (Yokogawa):

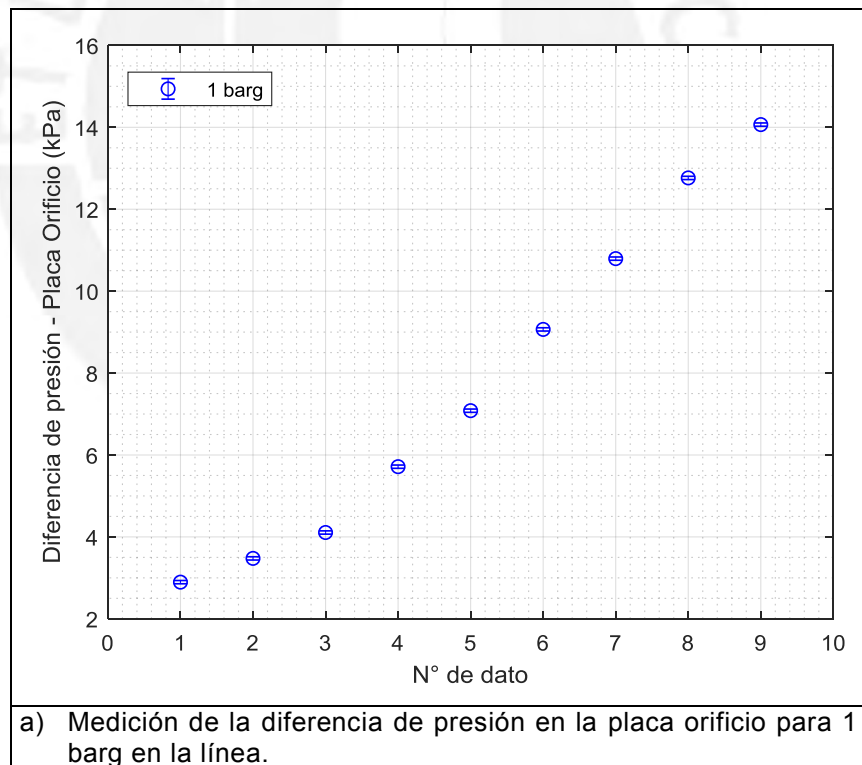
$$\varepsilon_{sis,\Delta P_{Pl}} = 0.04\% \cdot F.S \quad (\text{Ec. 3.6})$$

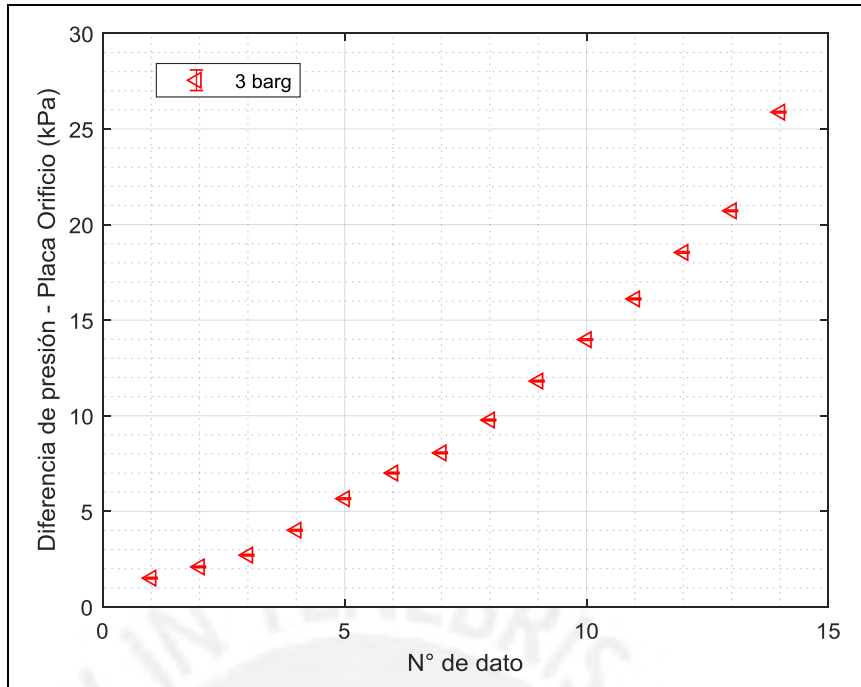
Donde:

$F.S$: Escala completa, kPa

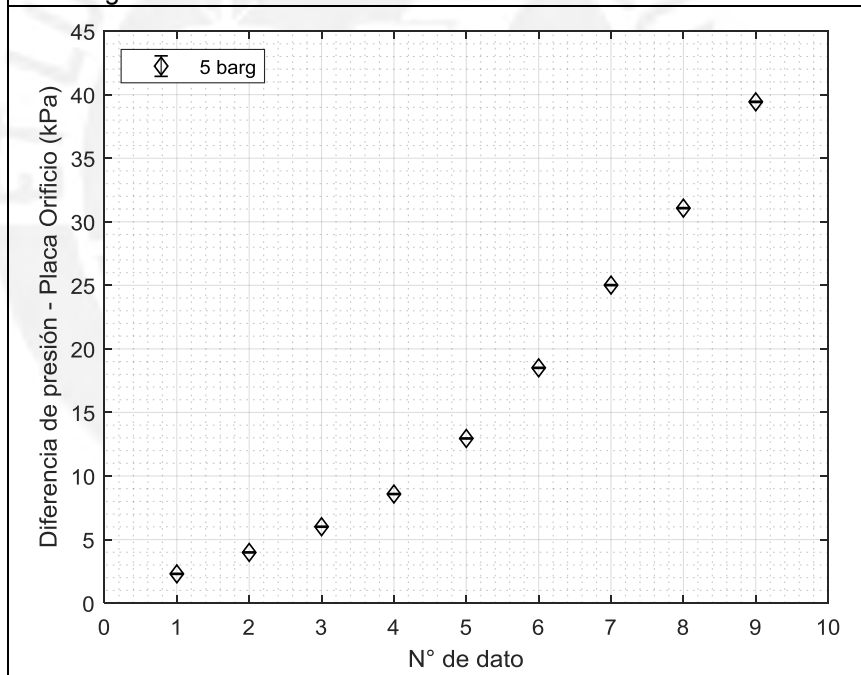
$$\varepsilon_{sis,\Delta P_{Pl}} = \frac{0.04}{100} \cdot (100 - 0) = 0.04 \text{ kPa}$$

Este valor es constante para toda la muestra y será incluida en la ecuación 3.1 para determinar la incertidumbre total de la medida de pérdida de presión en la tubería. Se puede notar en las siguientes figuras que la incertidumbre total, representada por las barras, es más pequeña que el símbolo que marca la media.





b) Medición de la diferencia de presión en la placa orificio para 3 barg en la línea.



c) Medición de la diferencia de presión en la placa orificio para 5 barg en la línea.

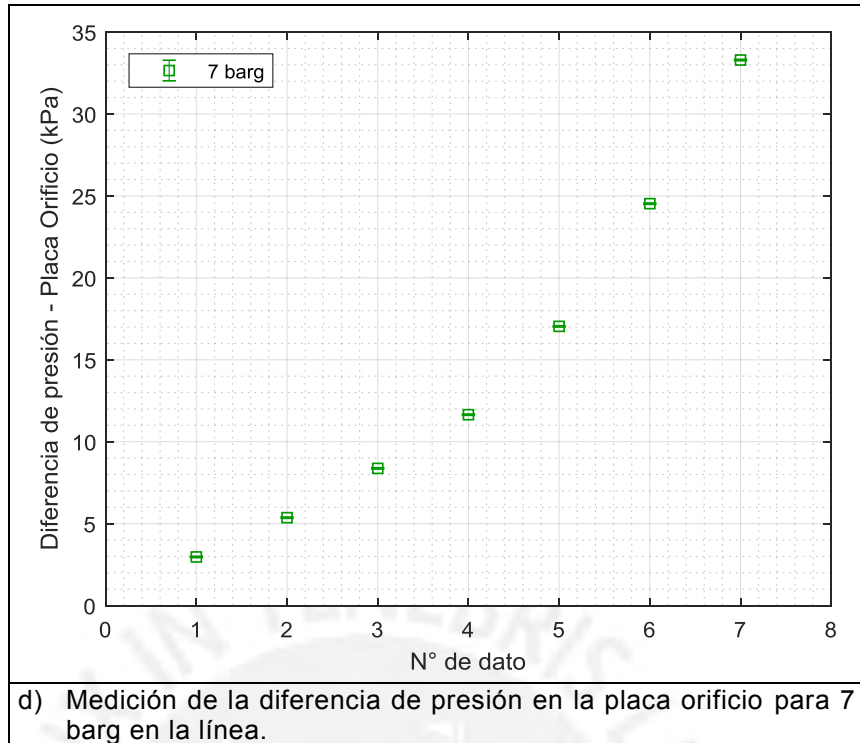
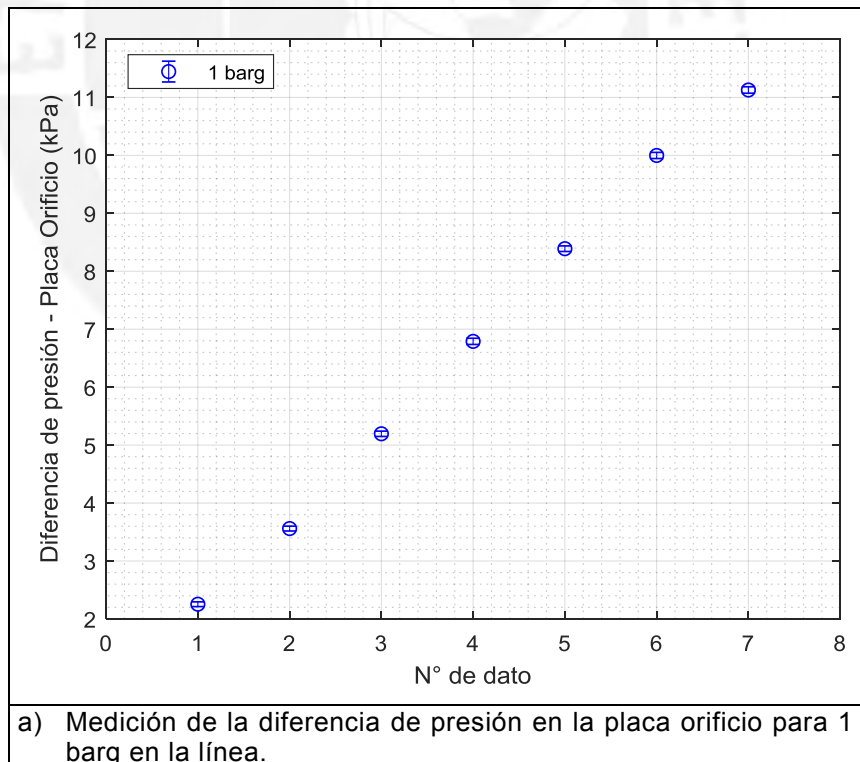
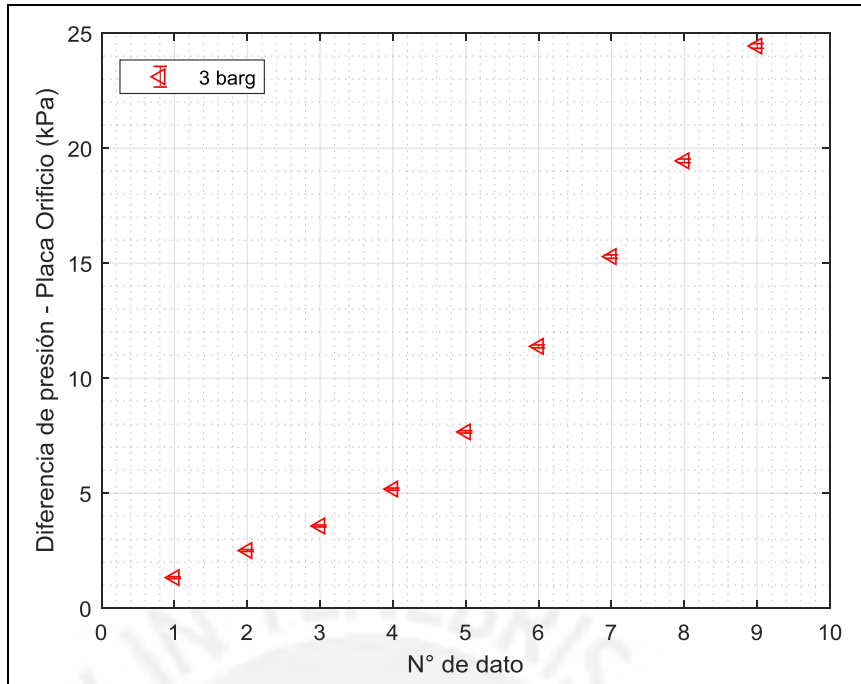
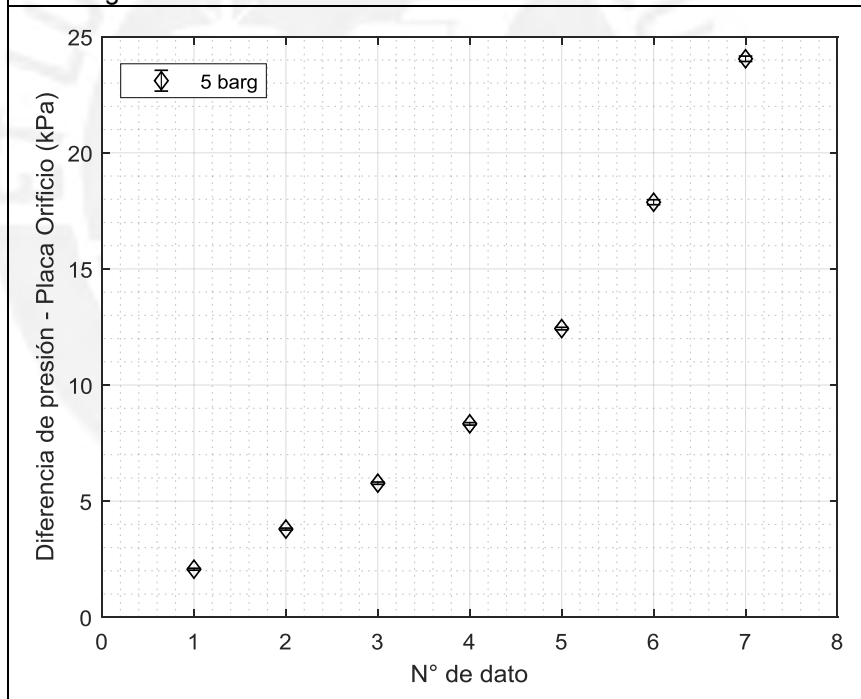


Fig. 3.7: Medición de la presión diferencial en la placa orificio (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).





b) Medición de la diferencia de presión en la placa orificio para 3 barg en la línea.



c) Medición de la diferencia de presión en la placa orificio para 5 barg en la línea.

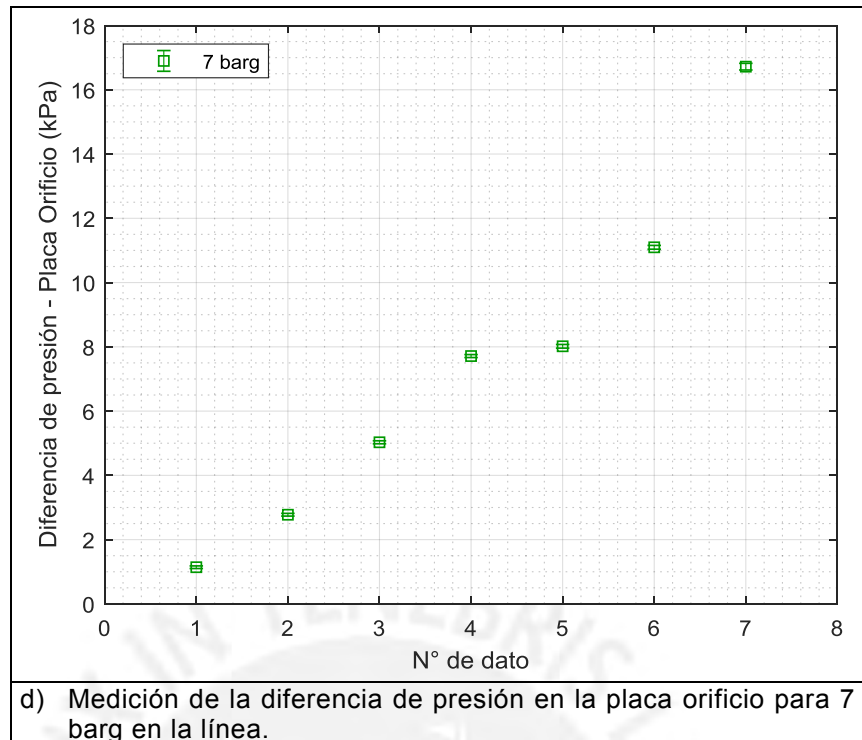


Fig. 3.8: Medición de la presión diferencial en la placa orificio (media y barras de incertidumbre total) para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.1.5. Diámetro interior de la tubería:

La medida del diámetro de la tubería se realizó utilizando las probetas que se muestran en la figura 2.25. Las medidas se muestran en las tablas 3.2 y 3.3 para cada tubería.

La incertidumbre del micrómetro utilizado se define según el fabricante (M&W):

$$\varepsilon_{sis,d} = \left(6 + \frac{d}{50}\right) \mu m \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

d : Diámetro interior medio de la tubería, mm

Para determinar la incertidumbre total de la medida del diámetro se utiliza la ecuación 3.1 para cada caso.

A. Acero al carbono sin costura:

Tabla 3.2: Medida del diámetro de la tubería CS-SL

Probeta	CS-SL 1		
Medida	26.64	26.40	26.25
Probeta	CS-SL 2		
Medida	26.85	26.74	26.83

Probeta	CS-SL 3		
Medida	26.33	26.41	26.27
Probeta	CS-SL 4		
Medida	27.12	26.80	27.20
Probeta	CS-SL 5		
Medida	26.21	26.30	26.35

Media:

$$\bar{d} = 26.58 \text{ mm}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_d = 0.33 \text{ mm}$$

Error aleatorio:

$$\varepsilon_{al,d} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{N_d}} = \frac{0.33}{\sqrt{15}} = 0.085 \text{ mm}$$

Error sistemático:

$$\varepsilon_{sis,d} = \left(6 + \frac{26.58}{50}\right) = 6.53 \text{ } \mu\text{m}$$

Incertidumbre total:

$$\varepsilon_d = \sqrt{\varepsilon_{al,d}^2 + \varepsilon_{sis,d}^2} = \sqrt{0.085^2 + 0.00653^2} = 0.08546 \text{ mm}$$

Medida de diámetro CS-SL:

$$d = 26.58 \pm 0.08546 \text{ mm}$$

B. Acero al carbono con costura:

Tabla 3.3: Medida del diámetro de la tubería CS-WS

Probeta	CS-WS 1		
Medida (mm)	28.74	28.72	28.72
Probeta	CS-WS 2		
Medida (mm)	28.73	28.70	28.45
Probeta	CS-WS 3		
Medida (mm)	28.39	28.80	28.75
Probeta	CS-WS 4		
Medida (mm)	28.36	28.40	28.41
Probeta	CS-WS 5		
Medida (mm)	28.75	28.76	28.98

Media:

$$\bar{d} = 28.73 \text{ mm}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_d = 0.19 \text{ mm}$$

Error aleatorio:

$$\varepsilon_{al_d} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{N_d}} = \frac{0.19}{\sqrt{15}} = 0.049 \text{ mm}$$

Error sistemático:

$$\varepsilon_{sis,d} = \left(6 + \frac{28.73}{50}\right) = 6.57 \mu\text{m}$$

Incertidumbre total:

$$\varepsilon_d = \sqrt{\varepsilon_{al_d}^2 + \varepsilon_{sis,d}^2} = \sqrt{0.049^2 + 0.00657^2} = 0.04949 \text{ mm}$$

Medida de diámetro CS-WS:

$$d = 28.73 \pm 0.04949 \text{ mm}$$

3.1.6. Longitud de la tubería:

La medida de la longitud corresponde al tramo de pruebas de la tubería, comprendido entre las tomas de presión para el diferencial, incluyendo la unión universal. Las medidas se muestran en las tablas 3.4 y 3.5 para cada tubería.

La incertidumbre del flexómetro utilizado se define según su clase II (Stanley, 2015):

$$\varepsilon_{sis,L} = (0.3 + 0.2 \cdot L) \text{ mm} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

L : Longitud media de la tubería, m

Para determinar la incertidumbre total de la medida de la longitud se utiliza la ecuación 3.1 para cada caso.

A. Acero al carbono sin costura:

Tabla 3.4: Medida de la longitud de la tubería CS-SL
Medida de longitud de tubería (m)

10.3000	10.3000	10.3000	10.3000
---------	---------	---------	---------

Media:

$$\bar{L} = 10.3 \text{ m}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_L = 0 \text{ m}$$

Error aleatorio:

$$\varepsilon_{al_L} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{N_d}} = 0 \text{ m}$$

Error sistemático:

$$\varepsilon_{sis,L} = (0.3 + 0.2 \cdot 10.3) = 2.4 \text{ mm}$$

Incertidumbre total:

$$\varepsilon_L = \sqrt{\varepsilon_{al_L}^2 + \varepsilon_{sis,L}^2} = \sqrt{0 + 2.4^2} = 2.4 \text{ mm}$$

Medida de la longitud:

$$L = 10.3 \pm 0.0024 \text{ m}$$

B. Acero al carbono con costura:

Tabla 3.5: Medida de la longitud de la tubería CS-WS
Medida de longitud de tubería (m)

9.7575	9.7525	9.7450	9.7450
--------	--------	--------	--------

Media:

$$\bar{L} = 9.7450 \text{ m}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_L = 0.0020 \text{ m}$$

Error aleatorio:

$$\varepsilon_{alL} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{N_d}} = \frac{0.0020}{\sqrt{4}} = 0.001 \text{ m}$$

Error sistemático:

$$\varepsilon_{sis,L} = (0.3 + 0.2 \cdot 9.7450) = 2.2 \text{ mm}$$

Incertidumbre total:

$$\varepsilon_L = \sqrt{\varepsilon_{alL}^2 + \varepsilon_{sisL}^2} = \sqrt{\left(\frac{0.001}{1000}\right)^2 + 2.2^2} = 2.2 \text{ mm}$$

Medida de la longitud:

$$L = 9.745 \pm 0.0022 \text{ m}$$

3.2. Cálculo del factor de fricción:

En los siguientes puntos se explicará el procedimiento para determinar el factor de fricción, según el diagrama de flujo de la figura 3.9.

3.2.1. Determinación de la densidad:

La densidad del fluido del fluido se determina con temperatura y presión medida al inicio de la tubería de pruebas.

En primer lugar se determina la presión absoluta, en función de la presión manométrica presentada en el punto 3.1:

$$\bar{P}_{IN} = \bar{P}_{IN,man} + P_{atm} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

$P_{IN,man}$: Presión manométrica al inicio de la tubería, bar.

P_{atm} : Presión atmosférica, 1 bar.

Luego, se calcula el coeficiente de compresibilidad Z , según Smits & Zagarola, 2005:

$$Z = 1 + Z_1 \cdot (p_{IN} - 1) + Z_2 \cdot (p_{IN} - 1)^2 + Z_3 \cdot (p_{IN} - 1)^3 \quad (\text{Ec. 3.9.a})$$

$$Z_1 = A_1 + B_1 \cdot T_{IN} + C_1 \cdot T_{IN}^2 + D_1 \cdot T_{IN}^3 \quad (\text{Ec. 3.9.b})$$

$$Z_2 = A_2 + B_2 \cdot T_{IN} + C_2 \cdot T_{IN}^2 + D_2 \cdot T_{IN}^3 \quad (\text{Ec. 3.9.c})$$

$$Z_3 = A_3 + B_3 \cdot T_{IN} + C_3 \cdot T_{IN}^2 + D_3 \cdot T_{IN}^3 \quad (\text{Ec. 3.9.d})$$

Donde:

	$A_{\#}$	$B_{\#}$	$C_{\#}$	$D_{\#}$
Z_1	$-9.5379 \cdot 10^{-3}$	$+5.1986 \cdot 10^{-5}$	$-7.0621 \cdot 10^{-8}$	0
Z_2	$+3.1753 \cdot 10^{-5}$	$-1.7155 \cdot 10^{-7}$	$+2.4630 \cdot 10^{-10}$	0
Z_3	$+6.3764 \cdot 10^{-7}$	$-6.4678 \cdot 10^{-9}$	$+2.1880 \cdot 10^{-11}$	$-2.4691 \cdot 10^{-14}$

La propagación de la incertidumbre para el coeficiente de compresibilidad Z se define de la siguiente manera:

$$\varepsilon_Z = \sqrt{\left(\frac{dZ}{dZ_1} \cdot \varepsilon_{Z_1}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dZ_2} \cdot \varepsilon_{Z_2}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dZ_3} \cdot \varepsilon_{Z_3}\right)^2 + \left(\frac{dZ}{dp_{IN}} \cdot \varepsilon_{p_{IN}}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

$$\varepsilon_{Z_{\#}} = \frac{dZ_{\#}}{dT_{IN}} \cdot \varepsilon_{T_{IN}}$$

$$\varepsilon_{Z_1} = (B_1 + 2 \cdot C_1 \cdot T_{IN}) \cdot \varepsilon_{T_{IN}}$$

$$\varepsilon_{Z_2} = (B_2 + 2 \cdot C_2 \cdot T_{IN}) \cdot \varepsilon_{T_{IN}}$$

$$\varepsilon_{Z_3} = (B_3 + 2 \cdot C_3 \cdot T_{IN} + 3 \cdot D_3 \cdot T_{IN}^2) \cdot \varepsilon_{T_{IN}}$$

$$\frac{dZ}{dZ_1} = (P_{IN} - 1)$$

$$\frac{dZ}{dZ_2} = (P_{IN} - 1)^2$$

$$\frac{dZ}{dZ_3} = (P_{IN} - 1)^3$$

$$\frac{dZ}{dp_{IN}} = Z_1 + 2 \cdot Z_2 \cdot (P_{IN} - 1) + 3 \cdot Z_3 \cdot (P_{IN} - 1)^2$$

Las figuras 3.9 y 3.10 se muestran los resultado del cálculo del factor de compresibilidad con su respectiva incertidumbre entre 0.00045 – 0.0015 %.

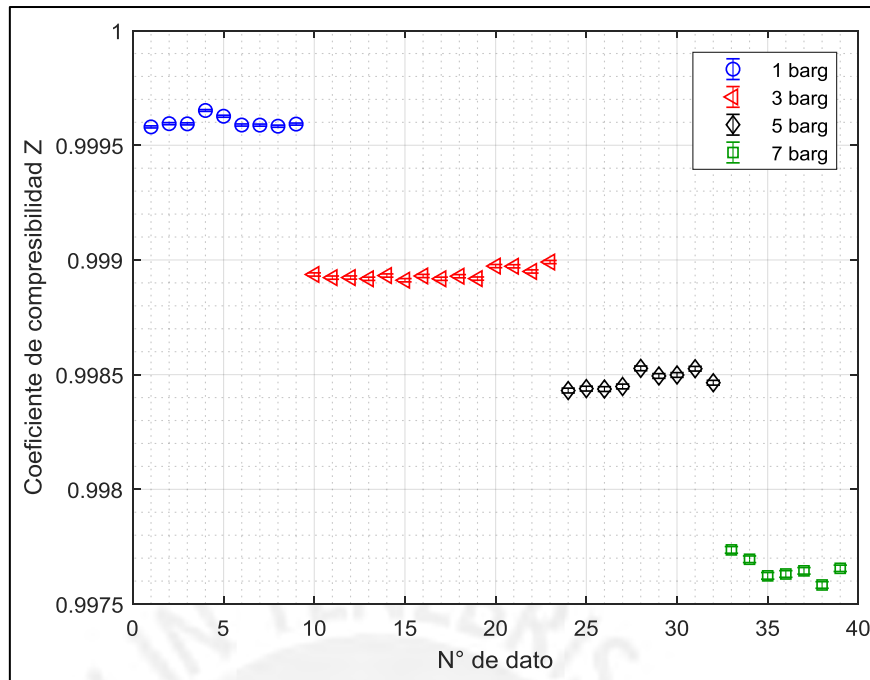


Fig.3.9: Determinación del coeficiente de compresibilidad Z para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

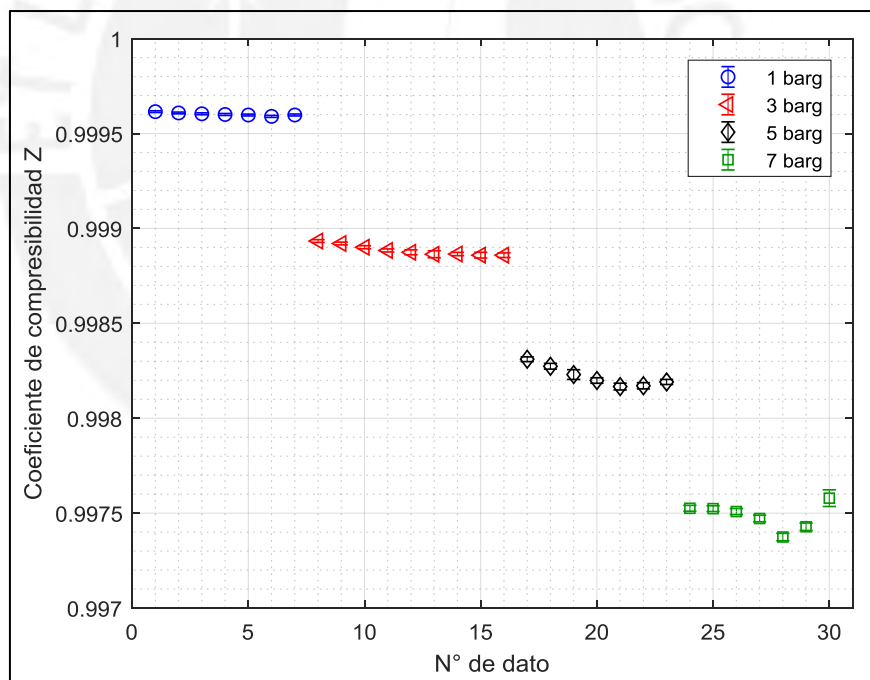


Fig.3.10: Determinación del coeficiente de compresibilidad Z para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

Finalmente, haciendo uso de la ecuación se determina la densidad del fluido en kg/m^3 .

$$\rho = \frac{p_{IN} \cdot 10^5}{Z \cdot R \cdot (T_{IN} + 273)} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

p_{IN} : Presión al inicio de la tubería, bar.

T_{IN} : Temperatura al inicio de la tubería, °C.

Z : Coeficiente de compresibilidad.

R : Constante particular para el aire = 287.1 J/kgK

La propagación de la incertidumbre para la densidad se determina de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dp_{IN}} \cdot \varepsilon_{p_{IN}}\right)^2 + \left(\frac{d\rho}{dZ} \cdot \varepsilon_Z\right)^2 + \left(\frac{d\rho}{dT_{IN}} \cdot \varepsilon_{T_{IN}}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

$$\frac{d\rho}{dp_{IN}} = \frac{10^5}{Z \cdot R \cdot (T_{IN} + 273)}$$

$$\frac{d\rho}{dZ} = \frac{-p_{IN} \cdot 10^5}{Z^2 \cdot R \cdot (T_{IN} + 273)}$$

$$\frac{d\rho}{dT_{IN}} = \frac{-p_{IN} \cdot 10^5}{Z \cdot R \cdot (T_{IN} + 273)^2}$$

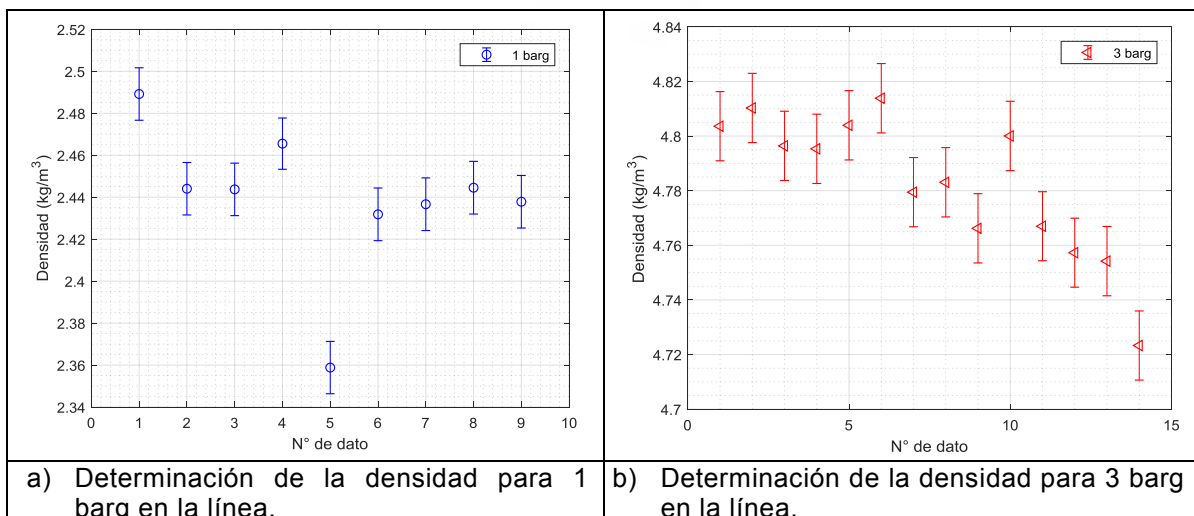
$\varepsilon_{p_{IN}}$: Ver punto 3.1.2.

ε_Z : Ver ecuación 3.10

$\varepsilon_{T_{IN}}$: Ver punto 3.1.1.

Asumiendo flujo incompresible, que luego será verificado al determinar el número de Mach, la densidad es constante a lo largo de la tubería.

Las figuras 3.11 y 3.12 muestran los valores de densidad con su respectiva incertidumbre para los dos materiales evaluados.



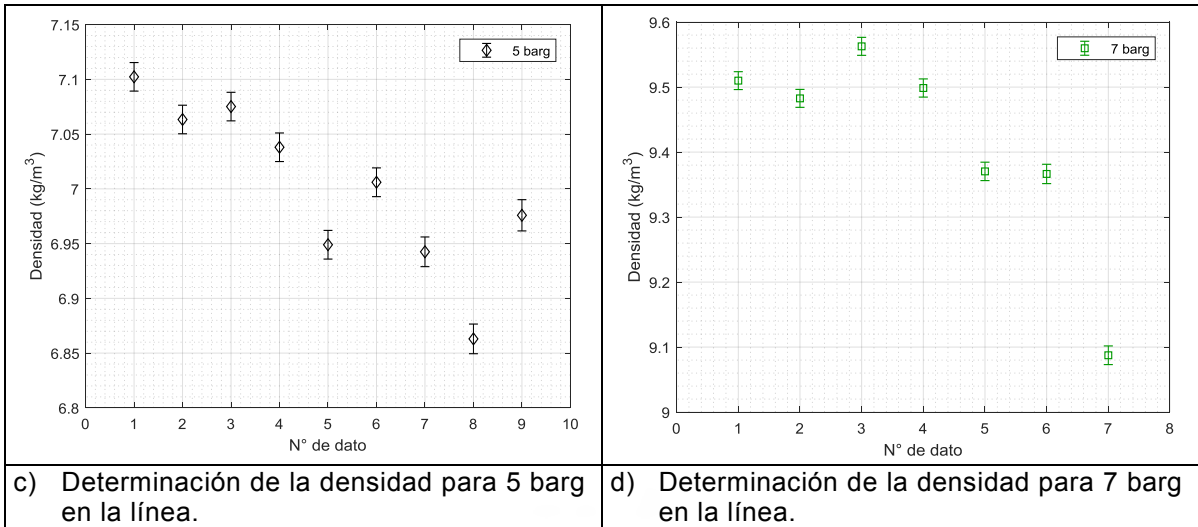


Fig.3.11: Determinación de la densidad para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

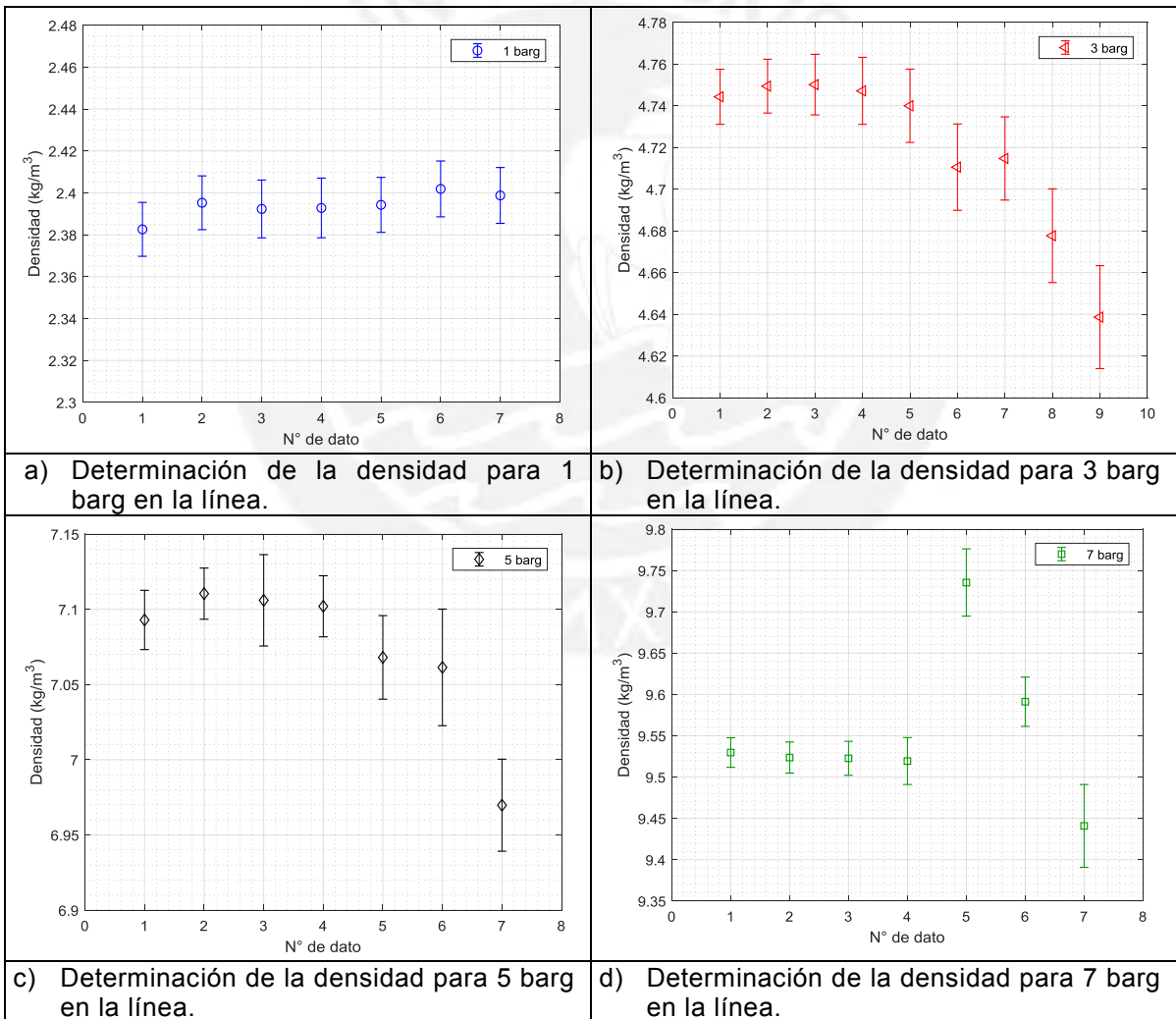


Fig.3.12: Determinación de la densidad para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.2.2. Determinación de la viscosidad:

La viscosidad de dinámica del fluido se determina según la ecuación 3.13

(Smits & Zagarola, 2005).

$$\mu = \mu_o + \mu_1 \quad (\text{Ec. 3.13.a})$$

$$\mu_o = 1.458 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(T_{IN}+273)^{1.5}}{110.4+(T_{IN}+273)} \quad (\text{Ec. 3.13.b})$$

$$\mu_1 = 1.021 \cdot 10^{-8} \cdot \rho + 5.969 \cdot 10^{-11} \cdot \rho^2 \quad (\text{Ec. 3.13.c})$$

La propagación del error en la determinación de la viscosidad dinámica

viene expresada por la ecuación 3.14.

$$\varepsilon_{\mu} = \sqrt{\varepsilon_{\mu_o}^2 + \varepsilon_{\mu_1}^2} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde:

$$\varepsilon_{\mu_o} = \frac{d\mu_o}{dT_{IN}} \cdot \varepsilon_{T_{IN}}$$

$$\frac{d\mu_o}{dT_{IN}} = 1.458 \cdot 10^{-6} \cdot (-110.4 \cdot (T_{IN} + 273)^{-1.5} + (T_{IN} + 273)^{-0.5})^{-2} \cdot (-1.5 \cdot 110.4 \cdot (T_{IN} + 273)^{-2.5} - 0.5 \cdot (T_{IN} + 273)^{-1.5})$$

$$\varepsilon_{\mu_1} = \frac{d\mu_1}{d\rho} \cdot \varepsilon_{\rho}$$

$$\frac{d\mu_1}{d\rho} = 1.021 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 5.969 \cdot 10^{-11} \cdot \rho$$

$$\varepsilon_{T_{IN}} : \text{Ver punto 3.1.1}$$

$$\varepsilon_{\rho} : \text{Ver ecuación 3.12}$$

En las figuras 3.13 y 3.14 se muestra el resultado del cálculo de viscosidad dinámica incluyendo la incertidumbre.

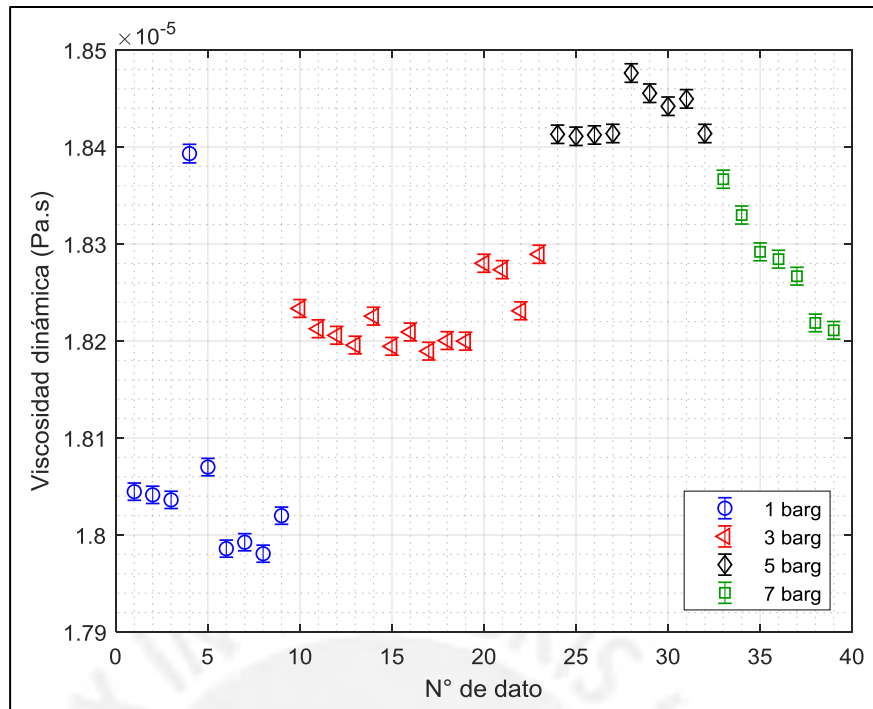


Fig.3.13: Determinación de la viscosidad dinámica para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

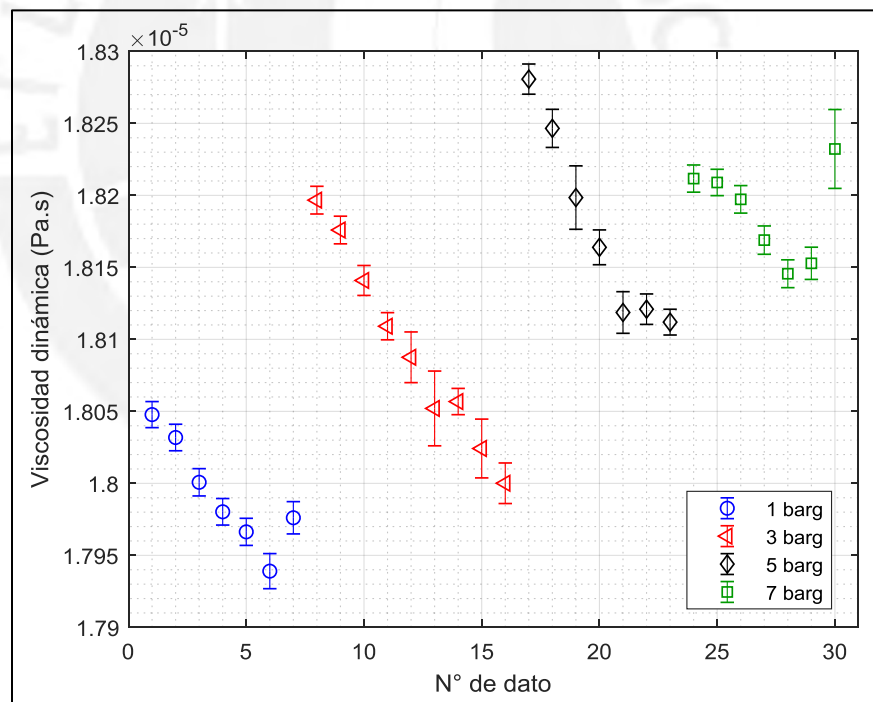


Fig.3.14: Determinación de la viscosidad dinámica para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.2.3. Determinación del flujo volumétrico en la placa orificio:

Este parámetro se obtiene de la medición de presión diferencial en la placa orificio, utilizando el método descrito en la norma ISO 5167-2:2003.

El dimensionamiento de la placa orificio se puede ver en el plano de fabricación del anexo 8 y sus características geométricas principales son las siguientes:

A. Diámetro del orificio:

Se realizó la medida del diámetro del orificio en 08 puntos como se muestra a continuación:

Tabla 3.6: Medición del diámetro del orificio de la placa.

Diámetro del orificio de la placa (mm)			
25.97	25.98	26.04	26.02
26.01	25.96	25.97	26.04

Media:

$$\bar{d}_o = 26.00 \text{ mm}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_{d_o} = 0.03 \text{ mm}$$

Error aleatorio:

$$\varepsilon_{al_{d_o}} = \frac{\sigma_{d_o}}{\sqrt{N_{d_o}}} = \frac{0.03}{\sqrt{8}} = 0.0106 \text{ mm}$$

Error sistemático:

Dado que se ha medido con el calibre de Vernier digital descrito en la tabla 2.10:

$$\varepsilon_{sis_{,d_o}} = 0.0254 \text{ mm}$$

Incertidumbre total:

$$\varepsilon_{d_o} = \sqrt{\varepsilon_{al_{d_o}}^2 + \varepsilon_{sis_{d_o}}^2} = \sqrt{0.0106^2 + 0.0254^2} = 0.0275 \text{ mm}$$

Medida del diámetro del orificio de la placa:

$$d_o = 26.00 \pm 0.0275 \text{ mm}$$

B. Diámetro de la tubería que aloja a la placa:

Se realizó la medida del diámetro interior de la tubería que aloja a la placa orificio, cuyo diámetro nominal corresponde a 1½ in en acero al carbono. A continuación, se muestran 08 puntos de medición:

Tabla 3.7: Medición del diámetro de la tubería 1½ in.

Diámetro de la tubería para placa orificio (mm)			
40.45	40.48	40.31	40.25
40.46	40.31	40.36	40.34

Media:

$$\bar{d}_{PL} = 40.37 \text{ mm}$$

Desviación estándar:

$$\sigma_{d_{PL}} = 0.08 \text{ mm}$$

Error aleatorio:

$$\varepsilon_{al_{d_{PL}}} = \frac{\sigma_{d_{PL}}}{\sqrt{N_{d_{PL}}}} = \frac{0.08}{\sqrt{8}} = 0.0296 \text{ mm}$$

Error sistemático:

Dado que se ha medido con el calibre de Vernier digital descrito en la tabla 2.10:

$$\varepsilon_{sis_{d_{PL}}} = 0.0254 \text{ mm}$$

Incertidumbre total:

$$\varepsilon_{d_{PL}} = \sqrt{\varepsilon_{al_{d_{PL}}}^2 + \varepsilon_{sis_{d_{PL}}}^2} = \sqrt{0.0296^2 + 0.0254^2} = 0.039 \text{ mm}$$

Medida del diámetro de la tubería que aloja a la placa orificio:

$$d_{PL} = 40.37 \pm 0.039 \text{ mm}$$

C. Relación de diámetros:

Corresponde al cociente del diámetro del orificio entre el diámetro interno de la tubería que aloja a la placa orificio:

$$\beta = \frac{d_o}{d_{PL}} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

La norma recomienda para el valor de β :

$$0.10 \leq \beta < 0.75$$

Para este dimensionamiento:

$$\beta = \frac{26}{40.37} = 0.644$$

La incertidumbre correspondiente a la relación de diámetros se determina de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\beta} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{d_o}}{d_{PL}}\right)^2 + \left(\frac{d_o}{d_{PL}^2} \cdot \varepsilon_{d_{PL}}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$\varepsilon_{\beta} = \sqrt{\left(\frac{0.0275}{40.37}\right)^2 + \left(\frac{26.0}{40.37^2} \cdot 0.039\right)^2} = 0.0009$$

D. Coeficiente M'_2 :

Este coeficiente depende de las distancias existentes entre la placa orificio y las tomas de presión, explicadas en el punto 2.3.2.D. Se determina según la ecuación 3.17 e influye en el cálculo del coeficiente de descarga.

$$M'_2 = \frac{2 \cdot L'_2}{1 - \beta} = 2.6408 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

$$L'_2 = 0.47$$

$$\beta = 0.644$$

Así:

$$M'_2 = 2.6408$$

E. Factor de expansión:

Primero se debe hallar el valor de la presión estática próxima a la placa orificio. Dado que la placa ha sido colocada a continuación de la tubería de pruebas, una buena aproximación sería presión al final de dicha tubería, calculada de la siguiente manera:

$$p_{PL} = p_{IN} - \Delta P_{Tub} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde:

p_{IN} : Presión absoluta al inicio de la tubería (bar)

ΔP_{Tub} : Pérdida de presión en la tubería (bar)

La incertidumbre la presión estática antes de la placa se define como:

$$\varepsilon_{p_{PL}} = \sqrt{\varepsilon_{p_{IN}}^2 + \varepsilon_{\Delta P_{Tub}}^2} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Donde las incertidumbres $\varepsilon_{p_{IN}}$ y $\varepsilon_{\Delta P_{Tub}}$ se han calculado en los puntos 3.1.2 y 3.1.3 respectivamente.

El factor de expansión sigue la siguiente ecuación:

$$E = 1 - (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{PL} - \Delta P_{PL}}{p_{PL}}\right)^{1/\kappa}\right] \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Donde:

κ : Exponente isoentrópico del aire = 1.4.

La incertidumbre para este factor se calcula de la siguiente manera:

$$\varepsilon_E = \sqrt{\left(\frac{dE}{d\beta} \cdot \varepsilon_\beta\right)^2 + \left(\frac{dE}{dp_{PL}} \cdot \varepsilon_{p_{PL}}\right)^2 + \left(\frac{dE}{dDP_{PL}} \cdot \varepsilon_{DP_{PL}}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Donde:

$$\frac{dE}{d\beta} = - \left(1 - \left(\frac{p_{PL} - DP_{PL}}{p_{PL}}\right)^{1/\kappa}\right) \cdot (4 \cdot 0.256 \cdot \beta^3 + 8 \cdot 0.93 \cdot \beta^7)$$

$$\frac{dE}{dp_{PL}} = \frac{1}{\kappa} \cdot (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot \left(\frac{p_{PL} - DP_{PL}}{p_{PL}}\right)^{\frac{1}{\kappa}-1} \cdot \left(\frac{2 \cdot p_{PL} - DP_{PL}}{p_{PL}^2}\right)$$

$$\frac{dE}{dDP_{PL}} = -\frac{1}{\kappa} \cdot (0.351 + 0.256 \cdot \beta^4 + 0.93 \cdot \beta^8) \cdot \left(\frac{p_{PL} - DP_{PL}}{p_{PL}}\right)^{\frac{1}{\kappa}-1} \cdot \frac{1}{p_{PL}}$$

ε_β : Ver ecuación 3.16.

$\varepsilon_{p_{PL}}$: Ver ecuación 3.19.

$\varepsilon_{DP_{PL}}$: Ver punto 3.1.4.

En la siguiente figura se puede ver el valor medio para el factor de compresibilidad así como su respectiva incertidumbre para las cuatro presiones de línea y los dos materiales evaluados.

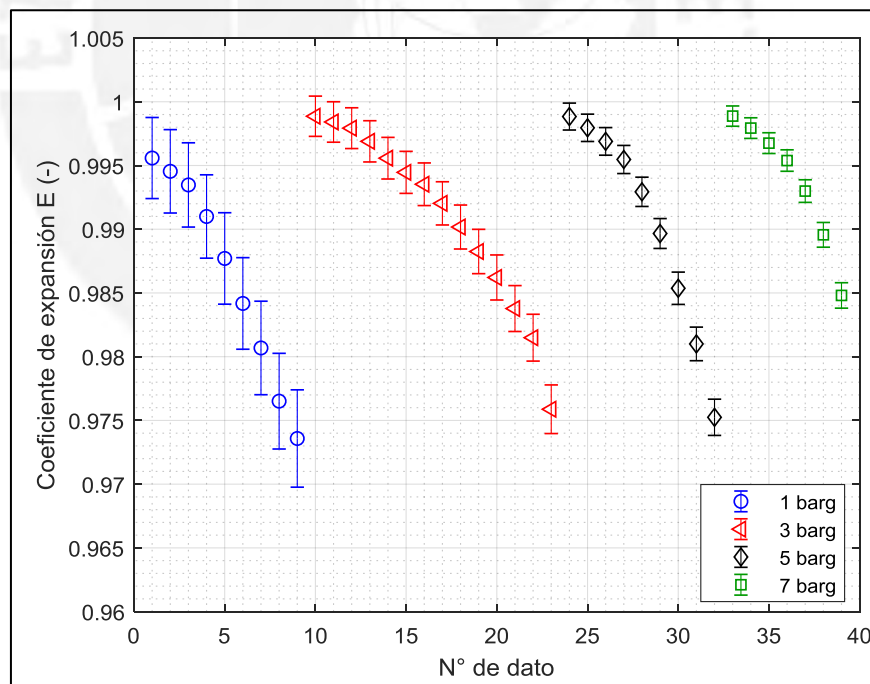


Fig.3.15: Determinación del coeficiente de expansión E para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

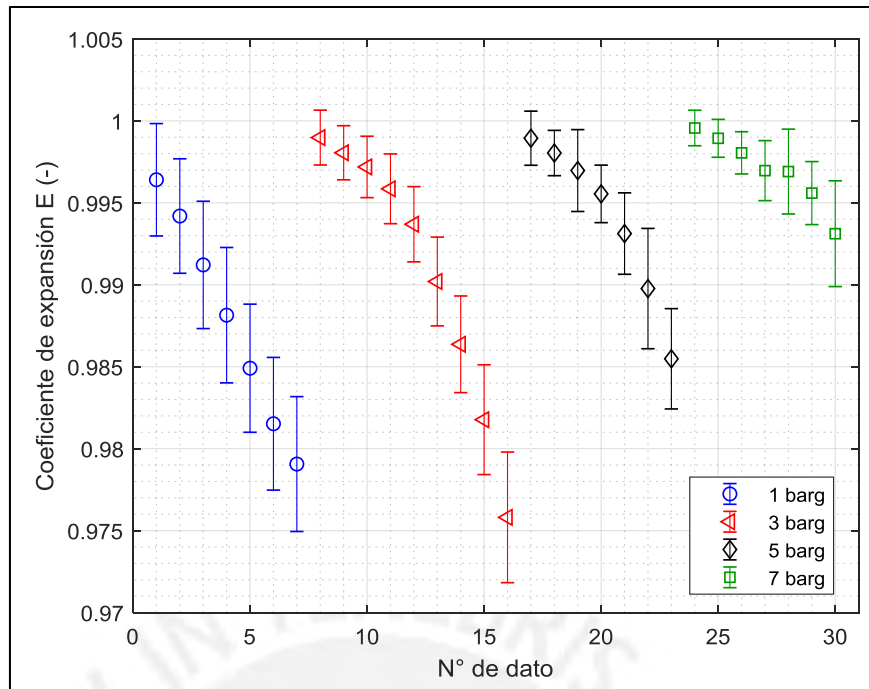


Fig.3.16: Determinación del coeficiente de expansión E para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

F. Coeficiente de descarga:

Este coeficiente se determina según la ecuación 3.22 (Reader-Harris/Gallagher, 1998), citada por la norma.

$$Cd = 0.5961 + 0.0261 \cdot \beta^2 - 0.216 \cdot \beta^8 + 0.000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_{d_{PL}}}\right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063 \cdot A) \cdot \beta^{3.5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{d_{PL}}}\right)^{0.3} + (0.043 + 0.08 \cdot e^{-10 \cdot L_1} - 0.123 \cdot e^{-7 \cdot L_1}) \cdot (1 - 0.11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031 \cdot (M'_2 - 0.8 \cdot M'^{1.1}_2) \cdot \beta^{1.3} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Donde:

β : Relación de diámetros (Ecuación 3.15)

$Re_{d_{PL}}$: Número de Reynolds considerando el diámetro de la tubería que aloja a la placa orificio.

$$Re_{d_{PL}} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot d_{PL}^2 \cdot \mu} \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_{d_{PL}}}\right)^{0.8}$$

L_1 : 1 (Ver punto 2.3.2.D)

M'_2 : 2.6408 (Ecuación 3.17)

Se puede notar que para determinar el valor del coeficiente de descarga se requiere conocer el número de Reynolds ($Re_{d_{PL}}$), para lo cual es necesario conocer, a priori, el flujo másico que atraviesa la placa. Esto

conlleva a realizar un cálculo iterativo, que se muestra en el diagrama de la figura 3.17, en orden de conseguir el coeficiente de descarga que, para un determinado flujo másico, produce la diferencia de presiones medida en la placa orificio.

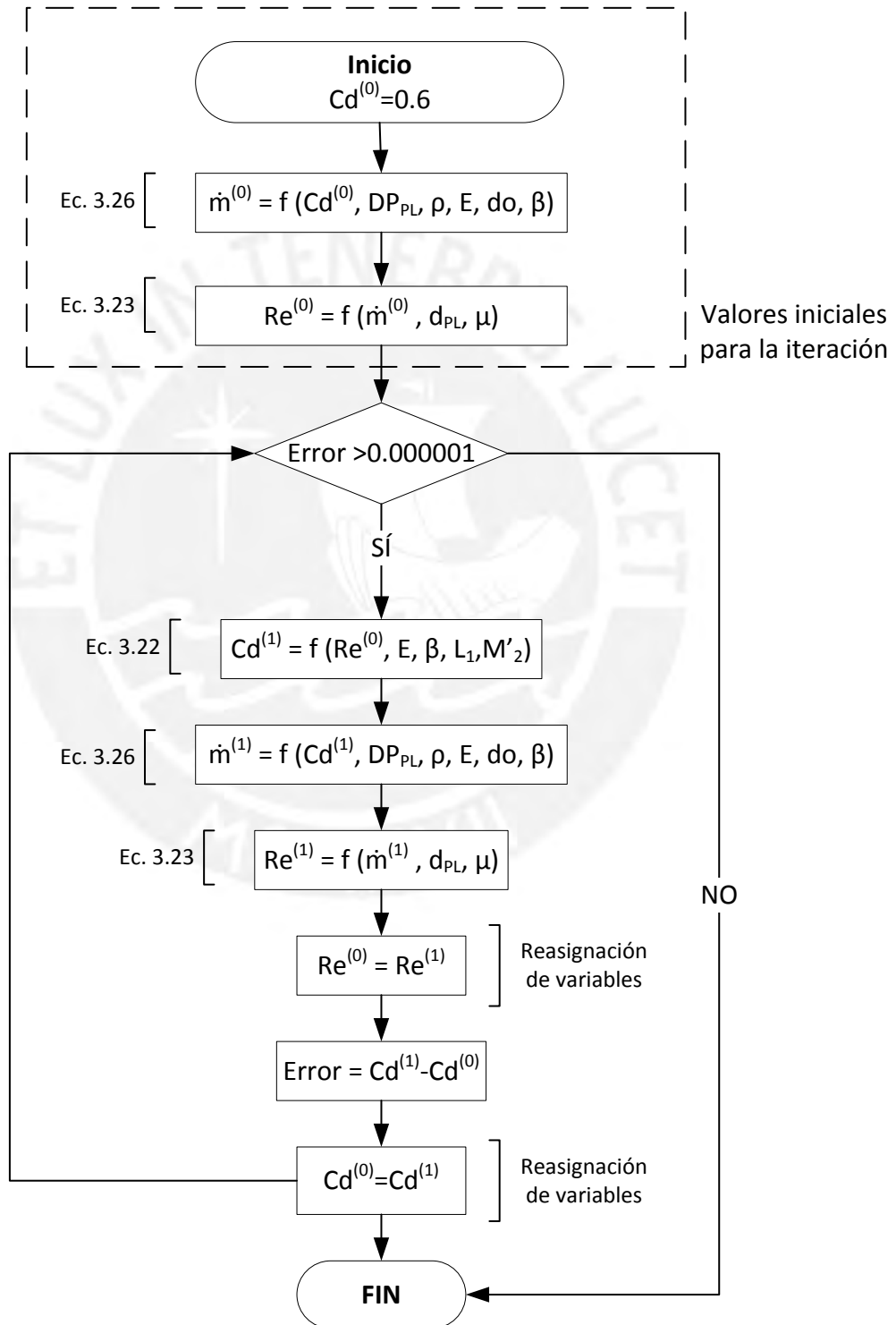


Fig. 3.17: Diagrama de flujo para la determinación de Cd.

La incertidumbre del coeficiente de descarga, según la norma ISO 5167, resulta de suma de dos factores:

$$\varepsilon_{Cd} = (\varepsilon_{Cd,1} + \varepsilon_{Cd,2})\% \cdot Cd \quad (\text{Ec. 3.24})$$

Donde:

$$\varepsilon_{Cd,1} = \begin{cases} 0.7 - \beta & ; \text{para } 0.1 \leq \beta < 0.2 \\ 0.5 & ; \text{para } 0.2 \leq \beta < 0.6 \\ 1.667 \cdot \beta - 0.5; & \text{para } 0.6 \leq \beta < 0.75 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{Cd,2} = 0.9 \cdot (0.75 - \beta) \cdot \left(2.8 - \frac{d_{PL}}{25.4}\right); \text{ si } d_{PL} < 71.12 \text{ mm}$$

Para este caso:

$$\varepsilon_{Cd,1} = 1.667 \cdot 0.644 - 0.5 = 0.574$$

$$\varepsilon_{Cd,2} = 0.9 \cdot (0.75 - 0.644) \cdot \left(2.8 - \frac{40.37}{25.4}\right) = 0.115$$

Por lo tanto, la ecuación 3.24 queda reducida:

$$\varepsilon_{Cd} = 0.689\% \cdot Cd \quad (\text{Ec. 3.25})$$

Las siguientes figuras muestran el valor y la incertidumbre del coeficiente de descarga para las tres condiciones de presión de línea y los dos materiales de tubería evaluados.

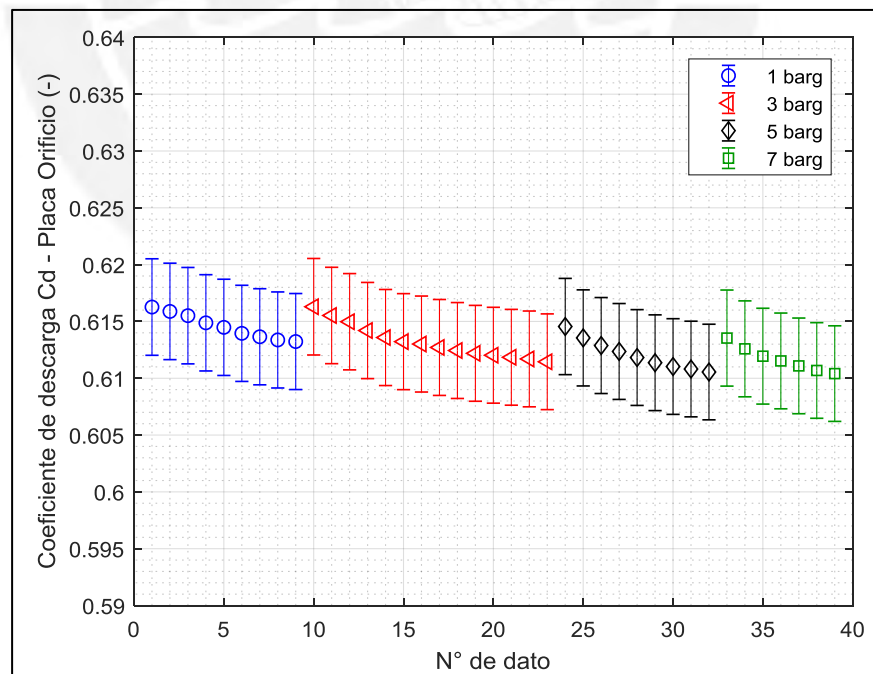


Fig. 3.18: Determinación del coeficiente de descarga Cd para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

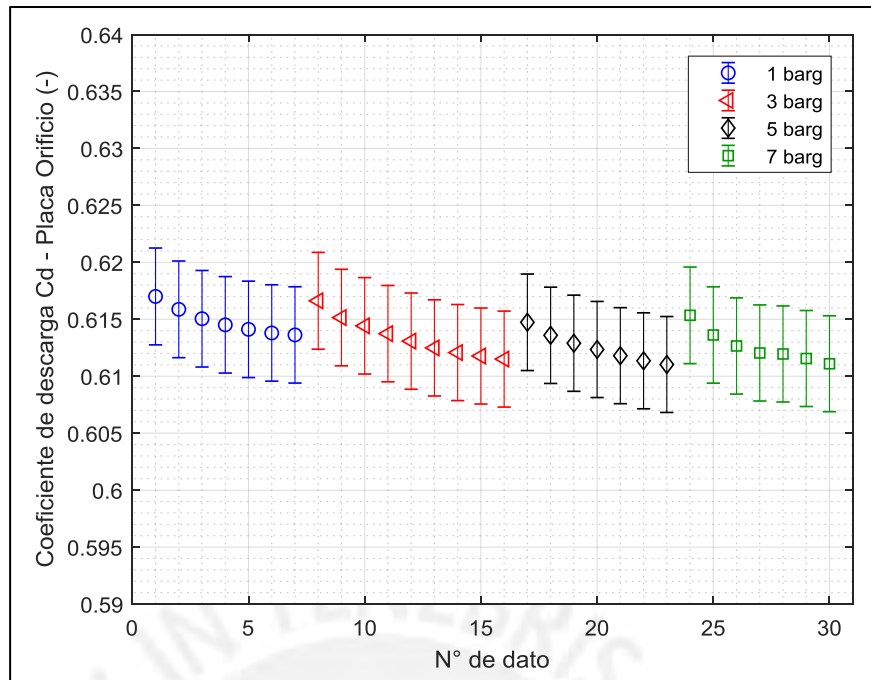


Fig.3.19: Determinación del coeficiente de descarga Cd para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

G. Flujo másico:

Una vez determinado el coeficiente de descarga (Cd), se calcula el flujo másico utilizando la ecuación 3.26.

$$\dot{m} = \frac{Cd}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot E \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \cdot \sqrt{2 \cdot DP_{PL} \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico, kg/s.

Cd : Coeficiente de descarga, adimensional. (Ecuación 3.22)

β : Relación de diámetros, adimensional. (Ecuación 3.15)

d_o : Diámetro del orificio, m.

ΔP_{PL} : Diferencia de presión en la placa orificio, Pa.

ρ : Densidad del fluido, kg/m³.

La incertidumbre para el flujo másico, descrita por la norma ISO 5167, se determina de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\dot{m}} = \left(\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{Cd}}{Cd}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_E}{E}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \beta^4}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\varepsilon_{d_{PL}}}{d_{PL}}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right)^2 \left(\frac{\varepsilon_{d_o}}{d_o}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_{DP_{PL}}}{DP_{PL}}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon_{\rho}}{\rho}\right)^2} \right) \cdot \dot{m} \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Donde todos los valores de incertidumbre (ε_{Cd} , ε_E , ε_{d_o} , $\varepsilon_{\Delta P_{PL}}$, ε_ρ) ya han sido determinados.

En las siguientes figuras, se puede el valor de flujo másico para cada uno de los puntos evaluados.

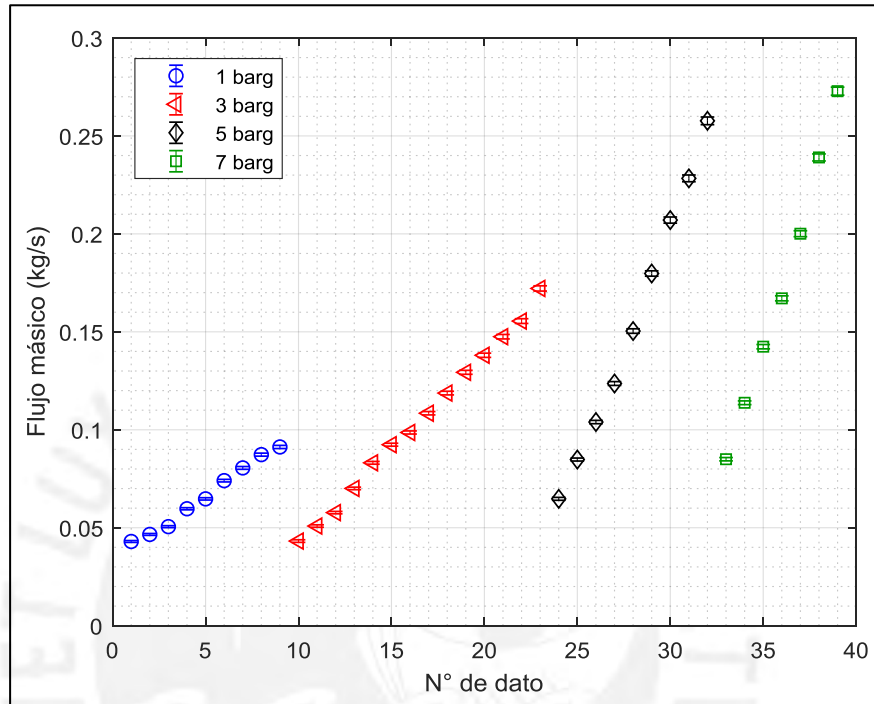


Fig.3.20: Determinación del flujo másico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

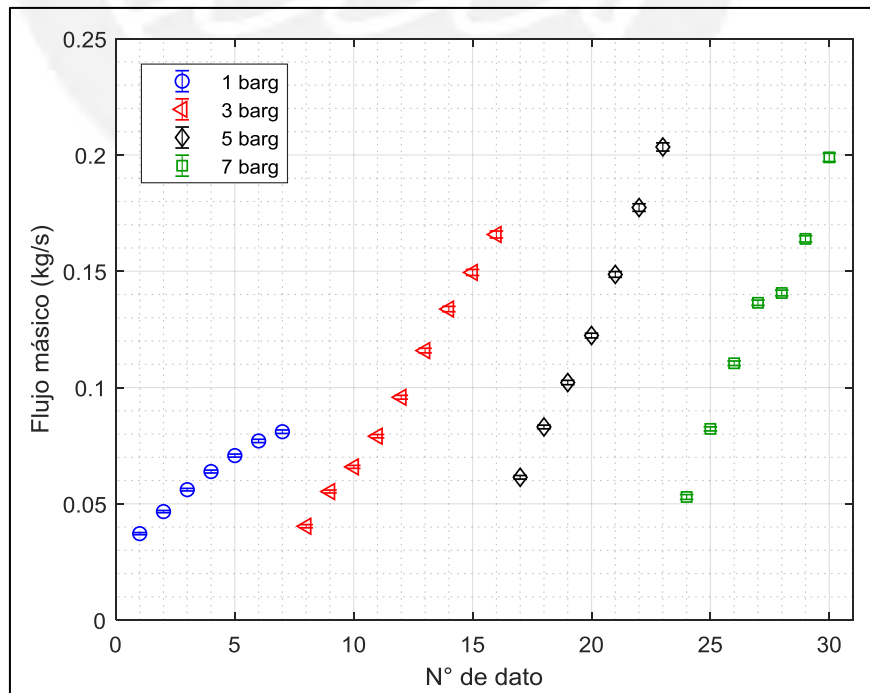


Fig.3.21: Determinación del flujo másico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

H. Flujo volumétrico:

Para determinar el flujo volumétrico (m^3/s) que atraviesa la placa orificio:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (\text{Ec. 3.28})$$

La incertidumbre se determina según:

$$\varepsilon_{\dot{V}} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\dot{m}}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\dot{m} \cdot \varepsilon_{\rho}}{\rho^2}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.29})$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico, kg/s. (Ec.3.26)

$\varepsilon_{\dot{m}}$: Incertidumbre del flujo másico, kg/s. (Ec.3.27)

ρ : Densidad del fluido, kg/m^3 . (Ec.3.11)

ε_{ρ} : Incertidumbre de la densidad, kg/m^3 . (Ec.3.12)

Se muestra los resultados del cálculo para las condiciones de presión y material de tuberías evaluadas.

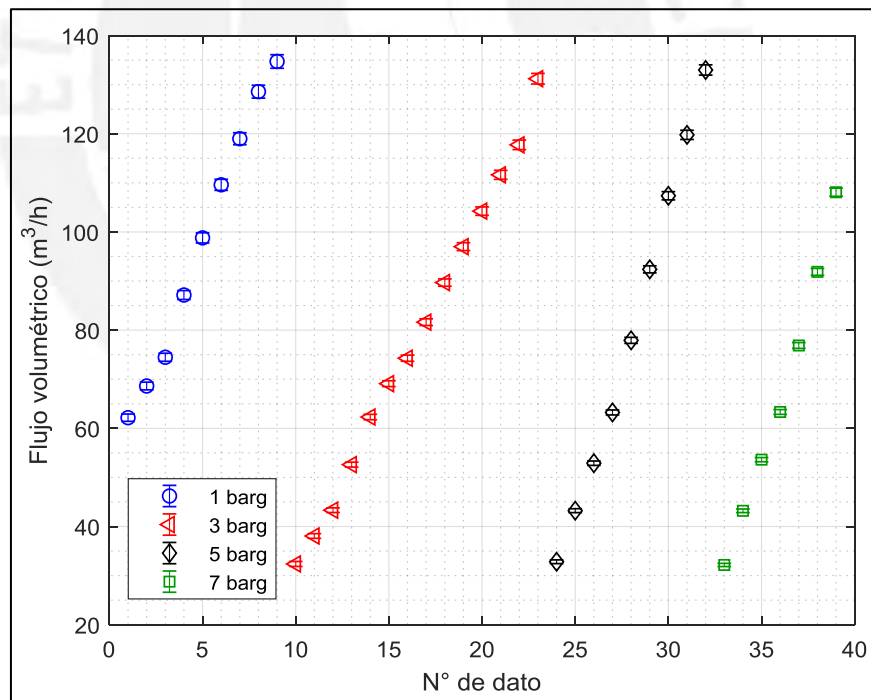


Fig.3.22: Determinación del flujo volumétrico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

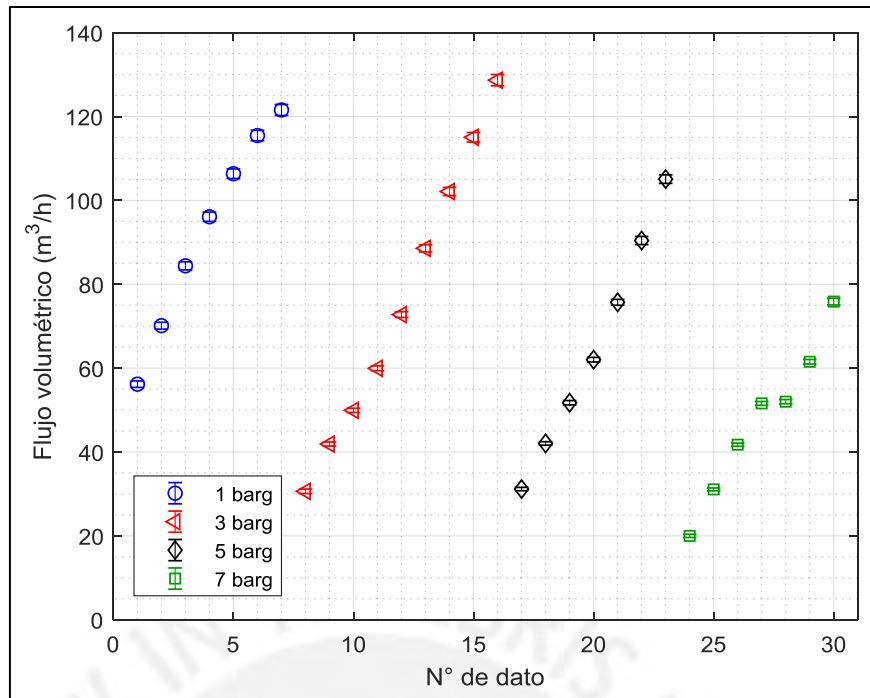


Fig.3.23: Determinación del flujo volumétrico para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

También se puede observar el comportamiento del coeficiente de descarga (C_d), en función del flujo volumétrico y del número de Reynolds.

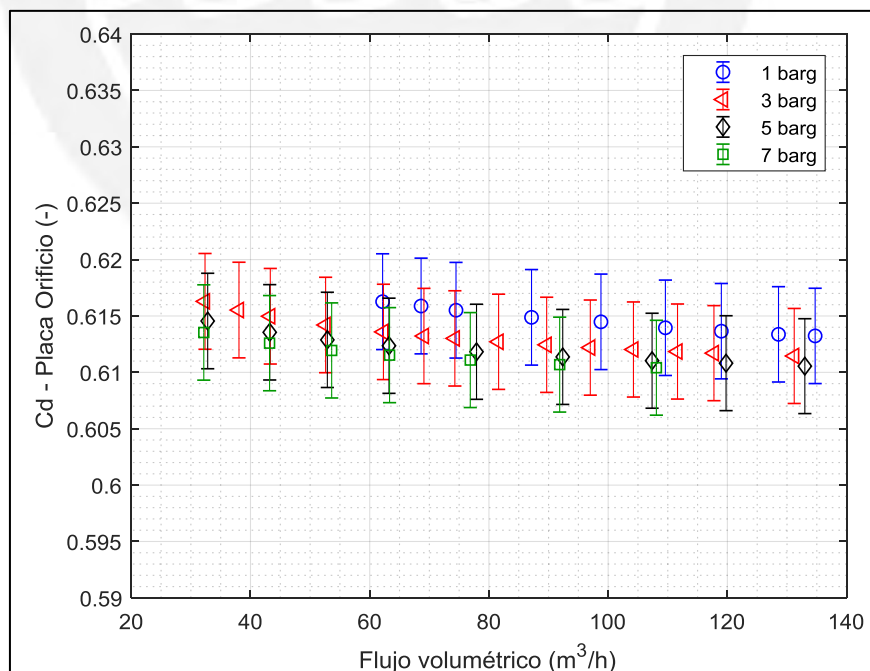


Fig.3.24: Coeficiente de descarga en función del flujo volumétrico utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

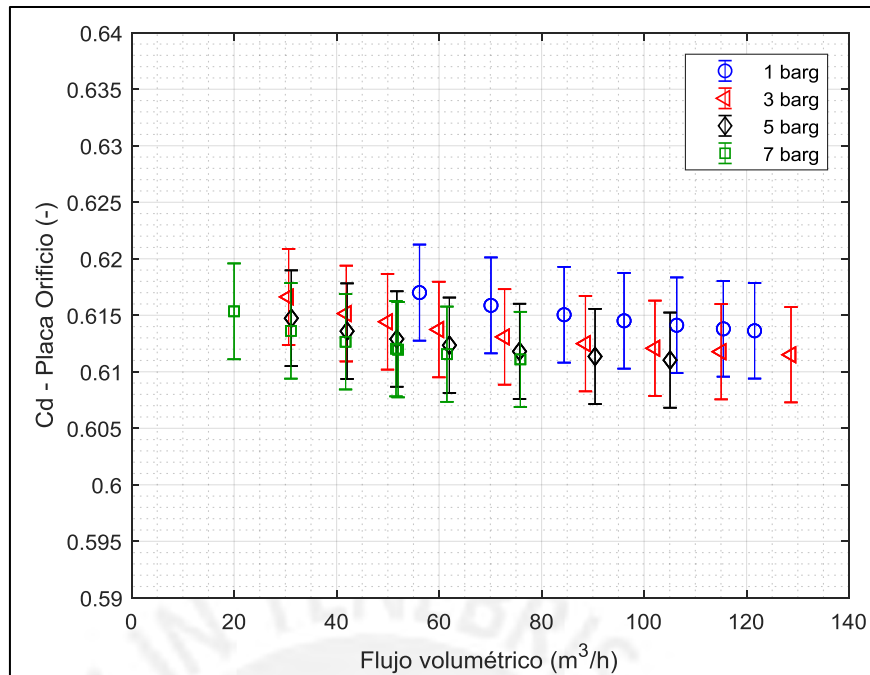


Fig.3.25: Coeficiente de descarga en función del flujo volumétrico utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

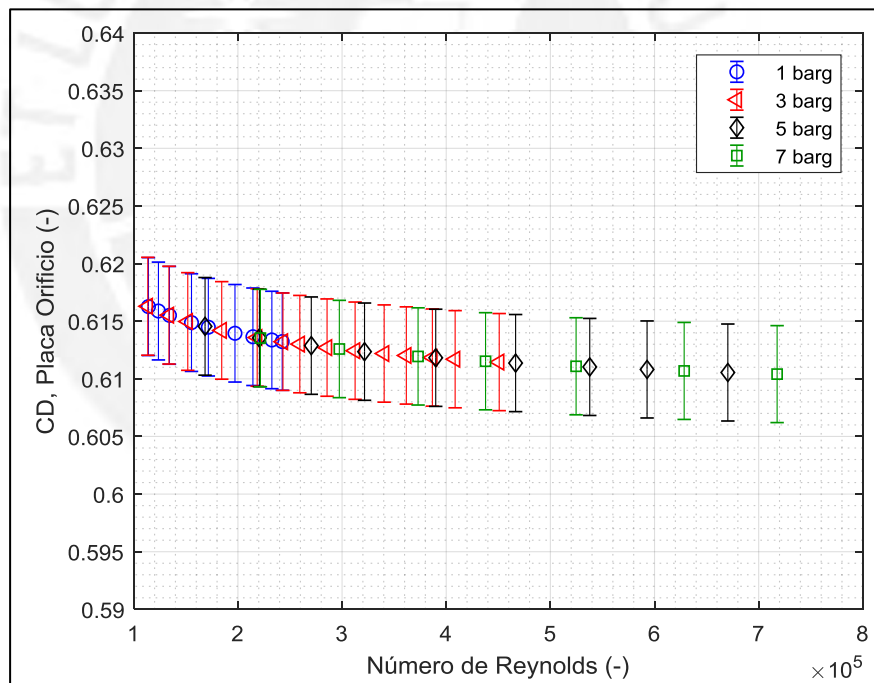


Fig.3.26: Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

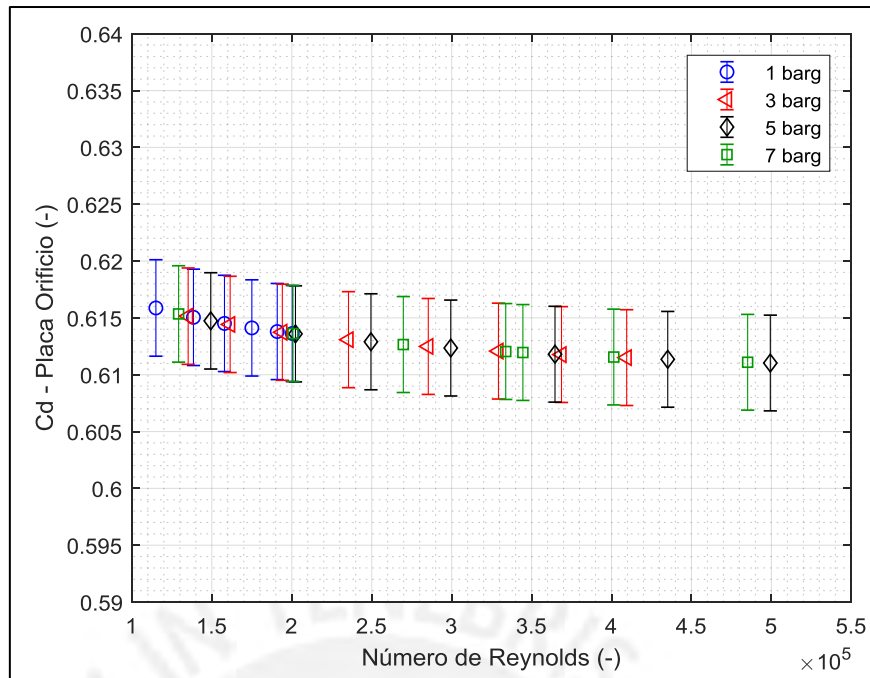


Fig.3.27: Coeficiente de descarga en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.2.4. Determinación de la velocidad media:

Dado que el flujo se considera incompresible, el flujo volumétrico determinado en la placa orificio será igual y constante al que atraviesa la tubería de pruebas. Por tanto el cálculo de la velocidad media (m/s) se obtiene de la ecuación 3.30.

$$v = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d^2} \quad (\text{Ec. 3.30})$$

Donde:

\dot{V} : Flujo volumétrico, m^3/s . (Ec.3.28)

d : Diámetro interno de la tubería de pruebas, m. (Ver punto 3.1.5)

La incertidumbre asociada a la determinación de la velocidad se describe según la ecuación 3.31.

$$\varepsilon_v = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot \varepsilon_{\dot{V}}}{\pi \cdot d^2}\right)^2 + \left(\frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \varepsilon_d}{\pi \cdot d^3}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.31})$$

Donde:

\dot{V} : Flujo volumétrico, m^3/s . (Ec.3.30)

$\varepsilon_{\dot{V}}$: Incertidumbre del flujo volumétrico, m^3/s . (Ec.3.29)

ε_d : Incertidumbre del diámetro interno, m. (Ec.3.29)

Se puede ver el resultado para todos los puntos analizados en la siguiente figura.

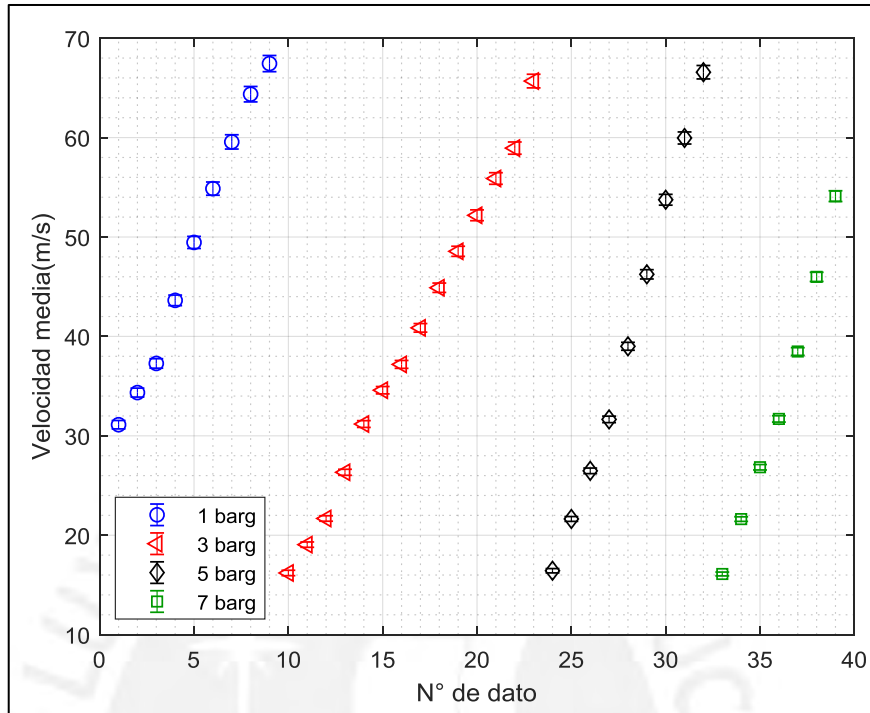


Fig.3.28: Determinación de la velocidad media para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

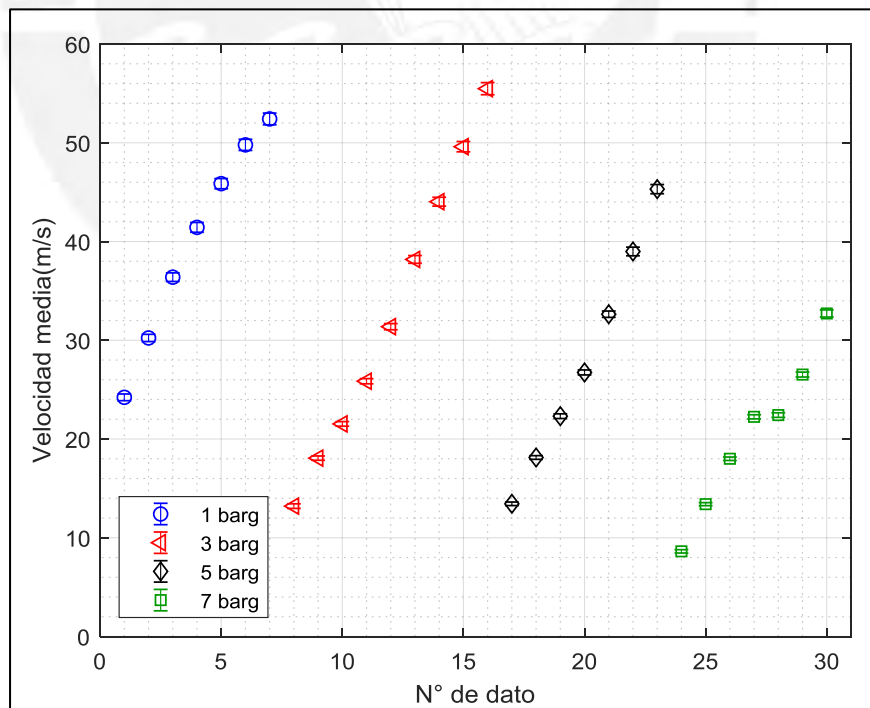


Fig.3.29: Determinación de la velocidad media para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.2.5. Determinación del número de Reynolds:

El número de Reynolds para el flujo que atraviesa la tubería de pruebas, se determina según la ecuación 1.2. Dado que se trata de un flujo incompresible e isotérmico atravesando un diámetro interno constante, el valor de número de Reynolds será constante a lo largo de la tubería.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$$

La incertidumbre para este parámetro se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\varepsilon_{Re} = \sqrt{\left(\frac{v \cdot d}{\mu} \cdot \varepsilon_{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\rho \cdot d}{\mu} \cdot \varepsilon_v\right)^2 + \left(\frac{\rho \cdot d}{\mu} \cdot \varepsilon_d\right)^2 + \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu^2} \cdot \varepsilon_{\mu}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.32})$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido, kg/m³. (Ec.3.11)

ε_{ρ} : Incertidumbre de la densidad, kg/m³. (Ec.3.12)

v : Velocidad media, m/s. (Ec.3.30)

ε_v : Incertidumbre de la velocidad media, m/s. (Ec.3.31)

d : Diámetro interno de la tubería de pruebas, m. (Ver punto 3.1.5)

ε_d : Incertidumbre del diámetro interno, m. (Ec.3.29)

μ : Viscosidad dinámica del fluido, Pa.s. (Ec.3.13)

ε_{μ} : Incertidumbre de la viscosidad, Pa.s. (Ec.3.14)

Se muestra en las siguientes figuras los resultados para el número de Reynolds con su respectiva incertidumbre.

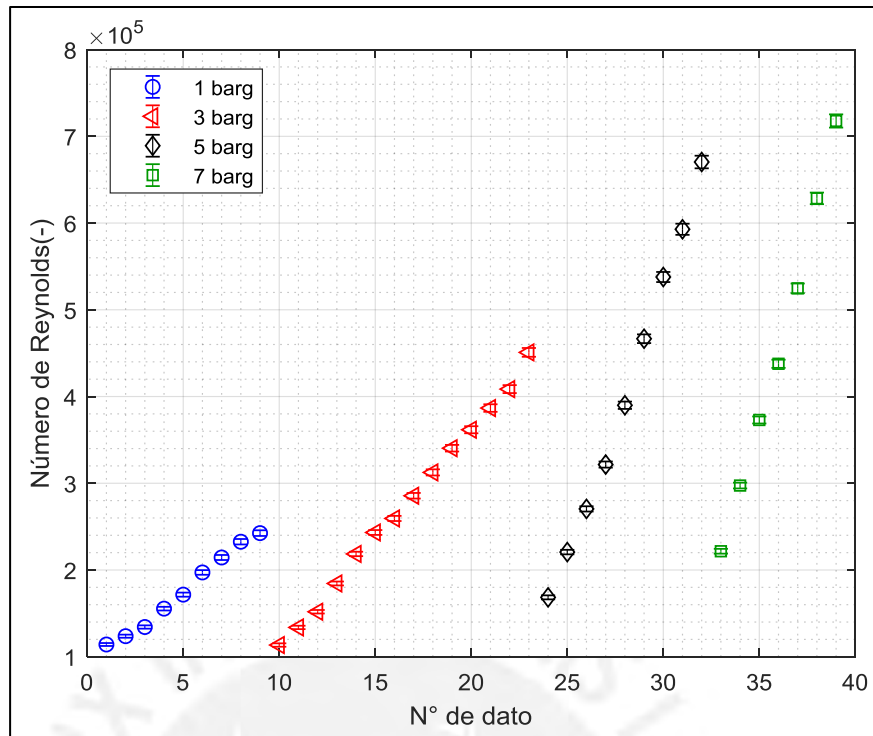


Fig.3.30: Determinación del número de Reynolds para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

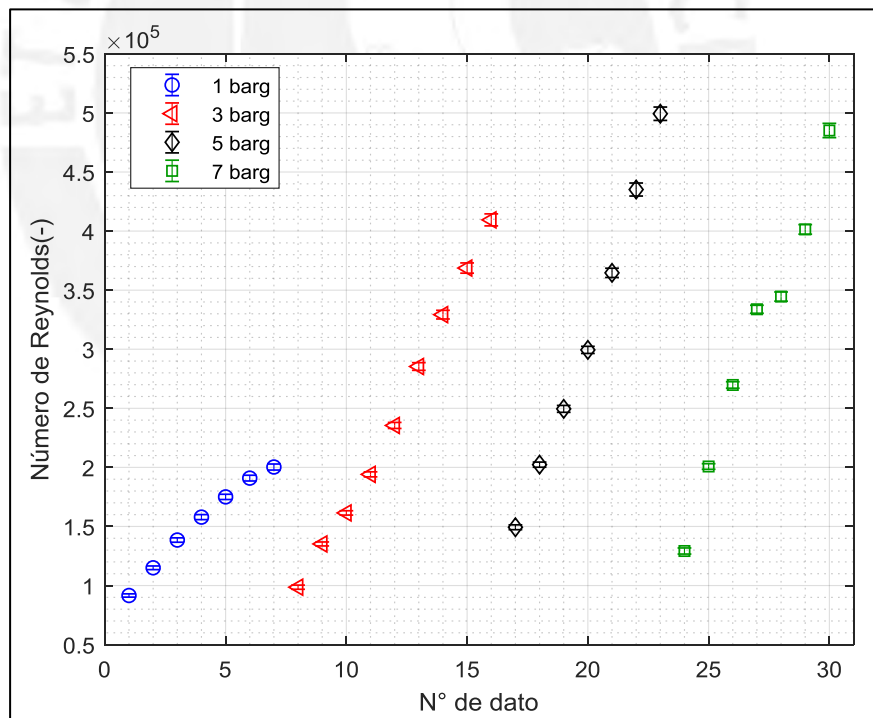


Fig.3.31: Determinación del número de Reynolds para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

También se muestra el desarrollo del número de Reynolds en función del flujo volumétrico.

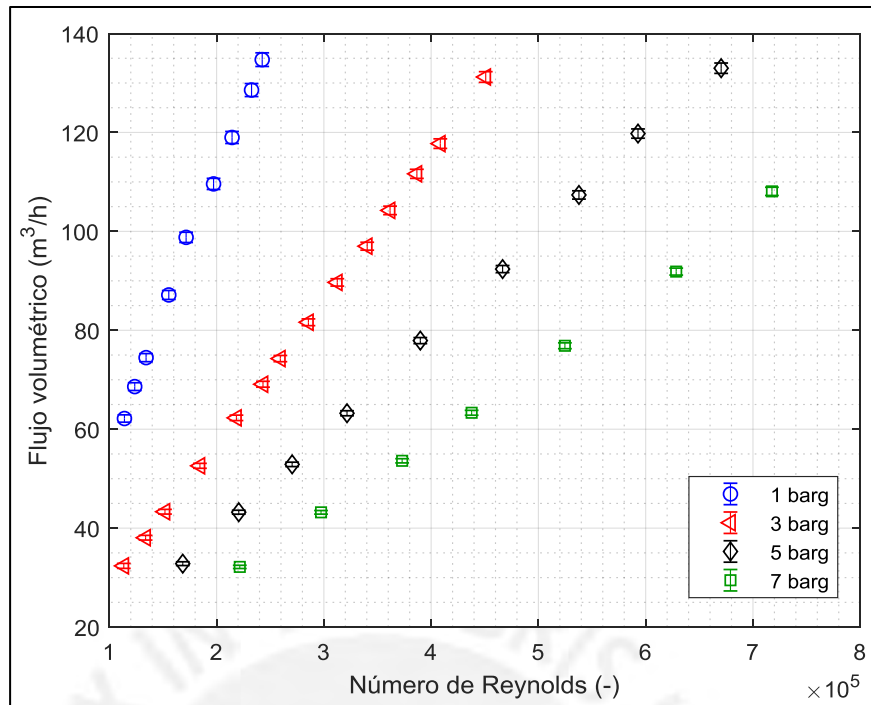


Fig.3.32: Flujo volumétrico en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

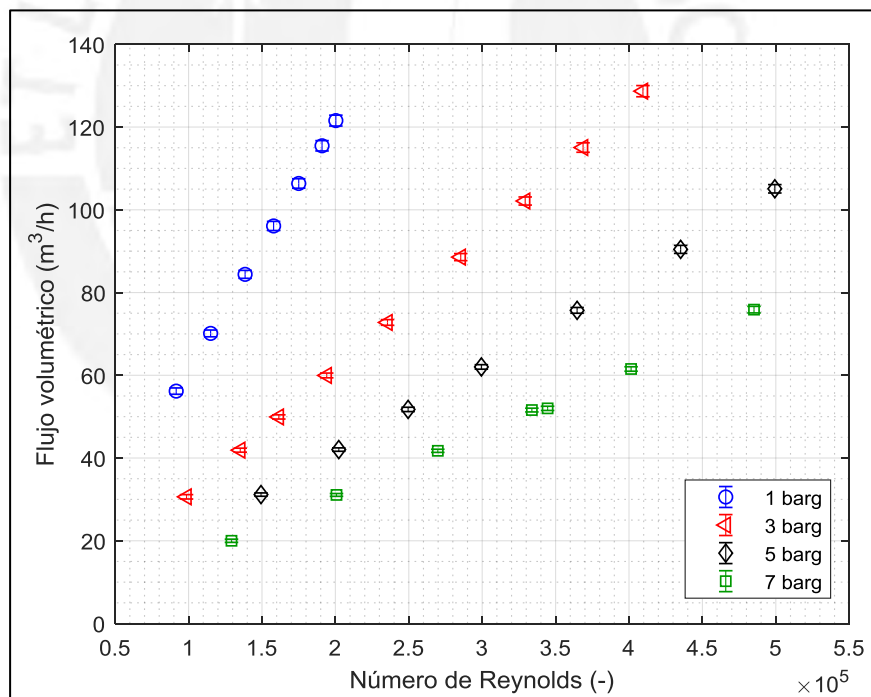


Fig.3.33: Flujo volumétrico en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

A fin de mostrar la tendencia de la caída de presión en la tubería respecto al número de Reynolds, se muestra la siguiente figura.

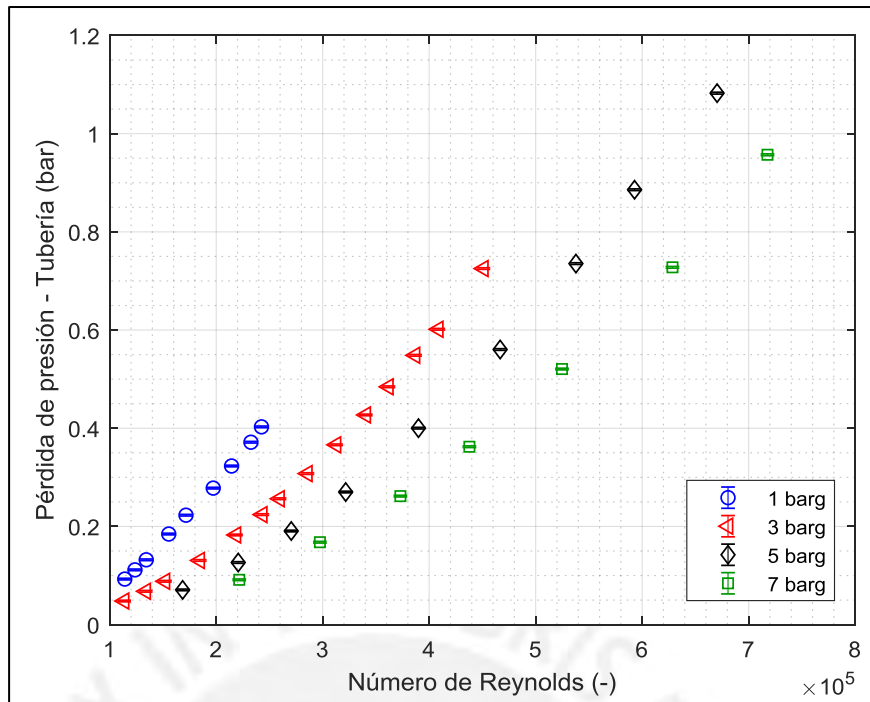


Fig.3.34: Pérdida de presión en la tubería en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

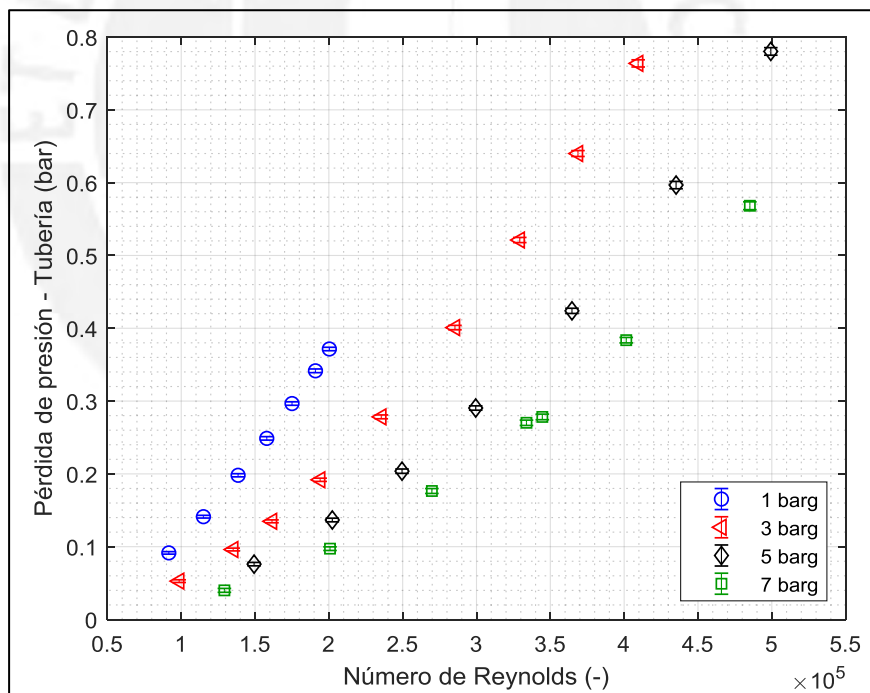


Fig.3.35: Pérdida de presión en la tubería en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.2.6. Determinación del número de Mach:

El número de Mach permitirá confirmar la incompresibilidad del fluido y se determina según la ecuación 3.32.

$$Ma = \frac{v}{\sqrt{R \cdot (T+273) \cdot \kappa}} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

Donde:

v : Velocidad media, m/s. (Ec. 3.30)

R : Constante particular para el aire = 287.1 J/kgK

T : Temperatura del fluido, °C. (Ver punto 3.1.1)

κ : Exponente isoentrópico del aire = 1.4.

La incertidumbre para el número de Mach viene definida por la siguiente ecuación.

$$\varepsilon_{Ma} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{R \cdot (T+273) \cdot \kappa}} \cdot \varepsilon_v\right)^2 + \left(\frac{v \cdot (T+273)}{2 \cdot \sqrt{R \cdot \kappa}} \cdot \varepsilon_T\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.34})$$

Donde:

ε_v : Incertidumbre de la velocidad media, m/s. (Ec.3.31)

ε_T : Incertidumbre de la temperatura, °C. (Ver punto 3.1.1)

Se muestra el valor de número de Mach para cada uno de los puntos evaluados (figuras 3.36 y 3.37), además de su tendencia en función del número de Reynolds (figuras 3.38 y 3.39).

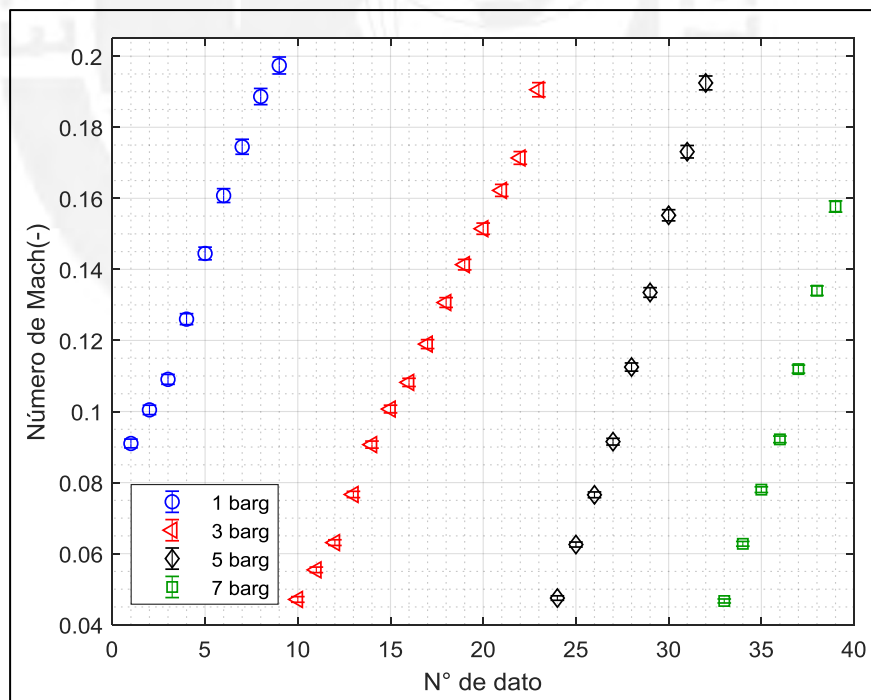


Fig.3.36: Determinación del número de Mach para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

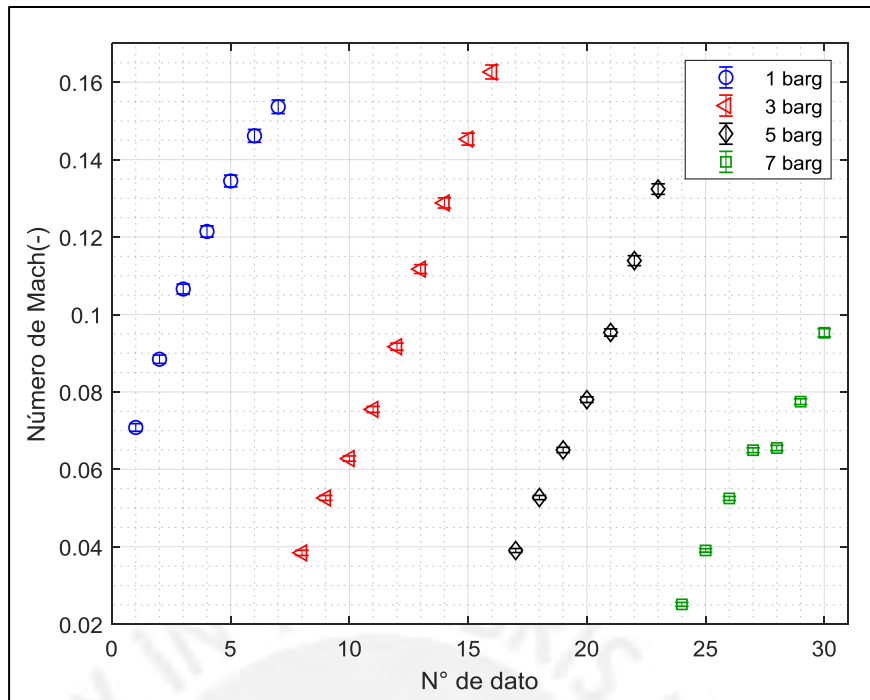


Fig.3.37: Determinación del número de Mach para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

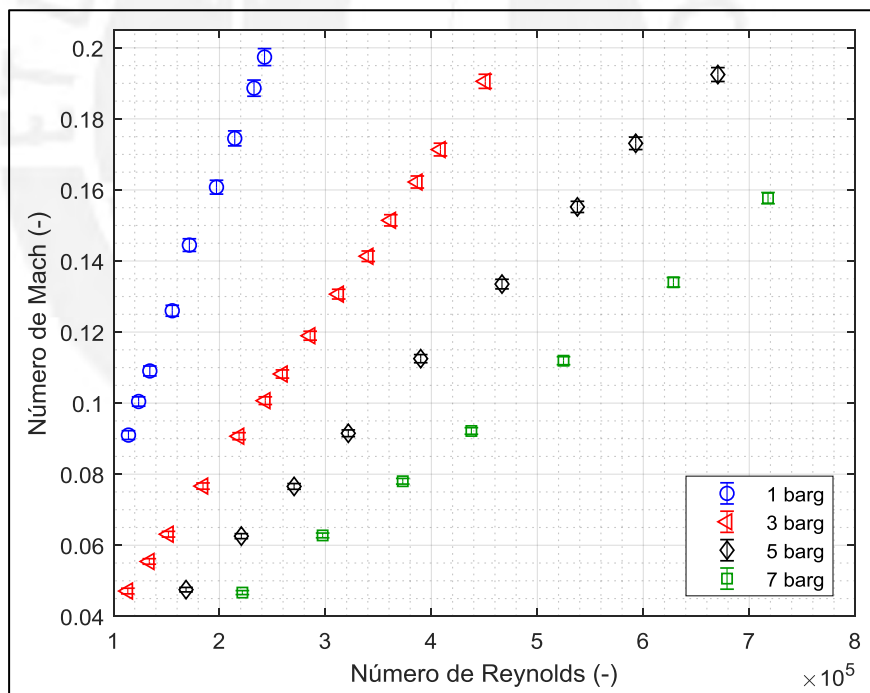


Fig.3.38: Número de Mach en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

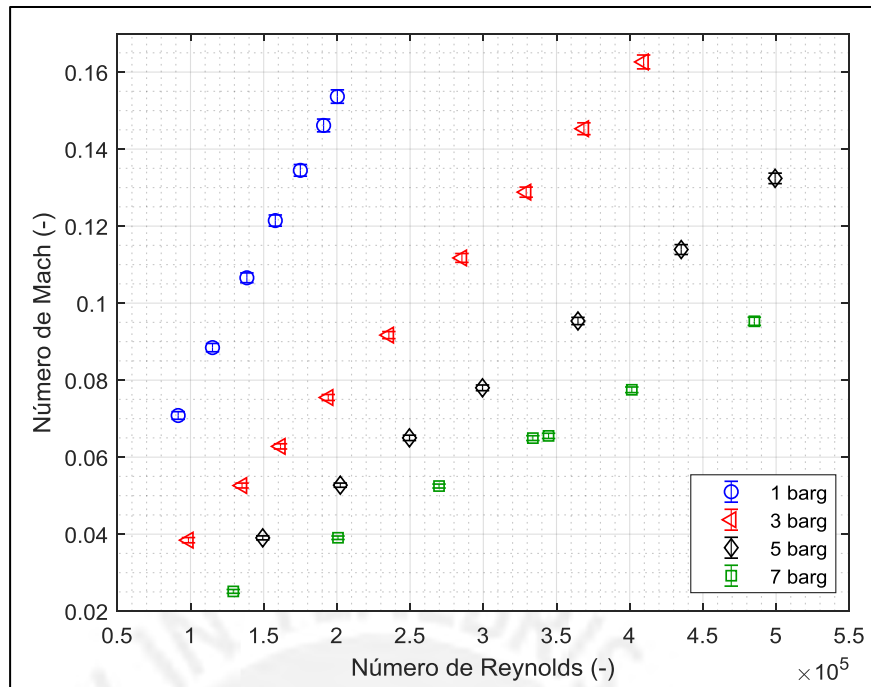


Fig.3.39: Número de Mach en función del número de Reynolds utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.2.7. Determinación del factor de fricción:

El factor de fricción se despeja de la ecuación de Darcy – Weisbach, según la ecuación 1.15:

$$\lambda = \frac{\Delta p_{Tub}}{L} \cdot d \cdot \frac{2}{v^2 \cdot \rho} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Así, la incertidumbre se define según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_\lambda = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot d}{L \cdot v^2 \cdot \rho} \cdot \varepsilon_{\Delta p_{Tub}}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{Tub}}{L \cdot v^2 \cdot \rho} \cdot \varepsilon_d\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{Tub} \cdot d}{L^2 \cdot v^2 \cdot \rho} \cdot \varepsilon_L\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot \Delta p_{Tub} \cdot d}{L \cdot v^3 \cdot \rho} \cdot \varepsilon_v\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{Tub} \cdot d}{L \cdot v^2 \cdot \rho^2} \cdot \varepsilon_\rho\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.35})$$

Donde:

Δp_{Tub} : Caída de presión en la tubería de pruebas, Pa. (Ver punto 3.1.3 para Δp_{Tub})

$\varepsilon_{\Delta p_{Tub}}$: Incertidumbre de la caída de presión en la tubería, Pa. (Ver punto 3.1.3 para $\varepsilon_{\Delta p_{Tub}}$)

d : Diámetro interno de la tubería de pruebas, m. (Ver punto 3.1.5)

ε_d : Incertidumbre del diámetro interno, m. (Ec.3.29)

L : Longitud de la tubería de pruebas, m. (Ver punto 3.1.6)

ε_L : Incertidumbre de la longitud de pruebas, m. (Ver punto 3.1.6)

v : Velocidad media, m/s. (Ec.3.30)

ε_v : Incertidumbre de la velocidad media, m/s. (Ec.3.31)

ρ : Densidad del fluido, kg/m^3 . (Ec.3.11)

ε_ρ : Incertidumbre de la densidad, kg/m^3 . (Ec.3.12)

Las siguientes figuras muestran el valor de factor de fricción para cada condición evaluada. Permite observar el comportamiento del factor de fricción en función del número de Reynolds, en escala logarítmica para los dos ejes, tal como se mostraría el diagrama de Moody. Muestra además la curva correspondiente al comportamiento hidráulicamente liso según la ecuación 1.32 y señala la zona de completamente rugoso, cuyo límite se define con la ecuación 1.40. Estas zonas se pueden diferenciar en la figura 1.7.

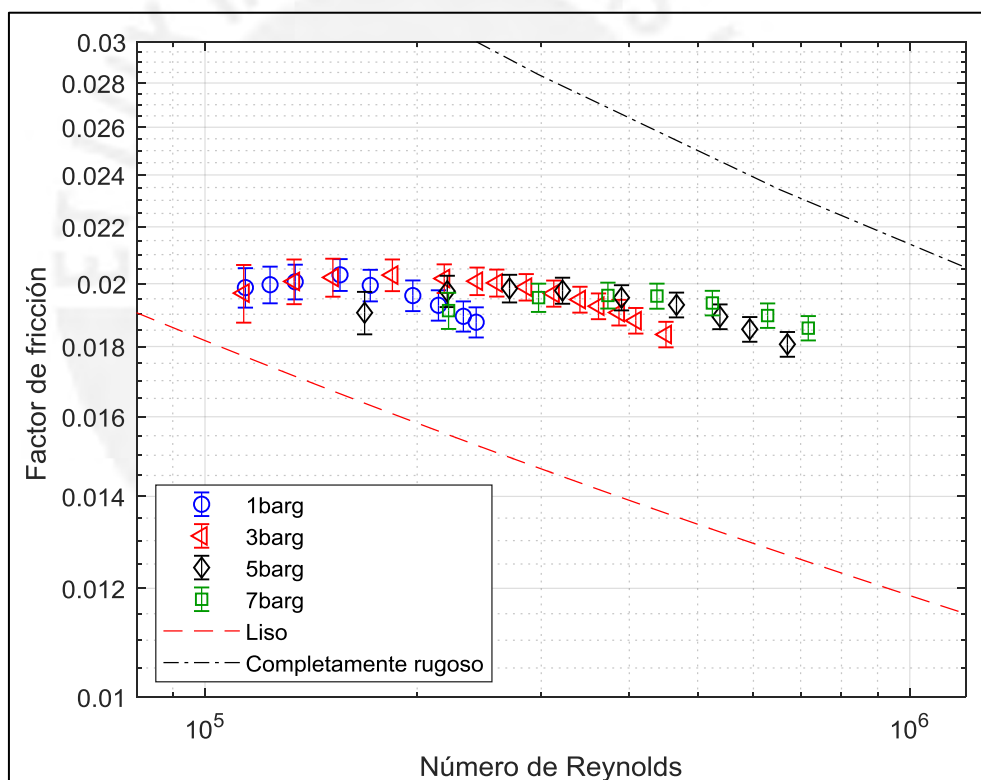


Fig.3.40: Determinación del factor de fricción para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono sin costura (CS-SL).

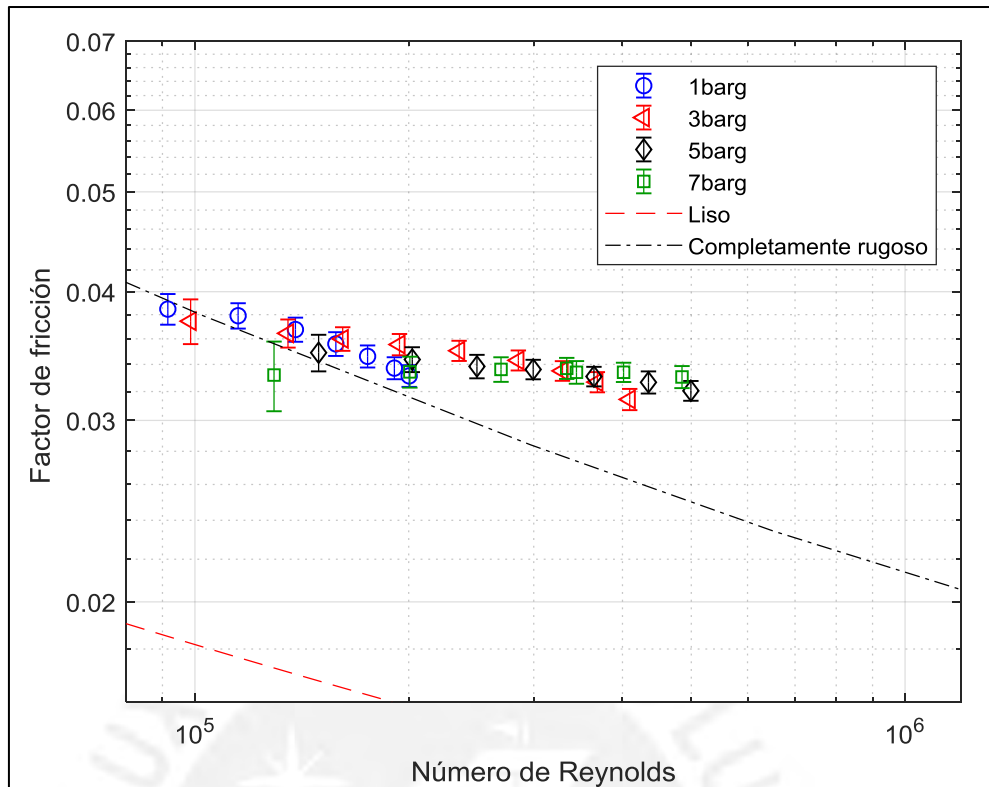


Fig.3.41: Determinación del factor de fricción para las cuatro condiciones de presión de línea utilizando tuberías de acero al carbono con costura (CS-WS).

Se puede observar en la figura 3.40 que los puntos evaluados para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL) se encuentran dentro de la zona de transición rugosa, se puede notar que el comportamiento del factor de fricción presenta una tendencia siempre decreciente respecto al incremento del número de Reynolds lo cual obedece al modelo monótonico.

Respecto a los datos evaluados para la tubería de acero al carbono con costura (CS- WS) en la figura 3.41, se puede observar que los datos se desarrollan desde la zona de transición rugosa hasta la zona de flujo completamente rugoso. Se puede notar que en la zona de transición, el factor presenta una tendencia decreciente respecto al incremento del número de Reynolds, lo cual obedece al modelo monótonico. En la zona de completamente rugoso se puede observar que los valores del factor de fricción tienden al comportamiento asintótico, constante al incremento del número de Reynolds.

3.3. Determinación de la rugosidad hidráulica:

Dado que el análisis, se procederá a comparar la data evaluada para cada material con el modelo monotónico descrito por la ecuación de Colebrook White (ecuación 1.35). Esto significa determinar el valor de rugosidad hidráulica para cada tubería despejado de dicha ecuación, según:

$$k_s = 3.7 \cdot d \cdot \left(10^{-\frac{1}{2\sqrt{f}}} - \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (\text{Ec. 3.35})$$

Se procede a realizar el cálculo para cada punto evaluado, incluyendo la incertidumbre asociada a la medición y a la propagación en el cálculo, según la ecuación 3.36.

$$\varepsilon_{k_s} = \sqrt{\left(\frac{dk_s}{dd} \cdot \varepsilon_d\right)^2 + \left(\frac{dk_s}{d\lambda} \cdot \varepsilon_\lambda\right)^2 + \left(\frac{dk_s}{dRe} \cdot \varepsilon_{Re}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3.36})$$

Donde:

$$\frac{dk_s}{dd} = 3.7 \cdot \left(10^{-1/(2\sqrt{f})} - \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

$$\frac{dk_s}{d\lambda} = 3.7 \cdot d \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot \lambda^{-\frac{3}{2}} \cdot 10^{-\frac{1}{2\sqrt{f}}} \cdot \ln(10) + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \lambda^{-\frac{3}{2}} \right)$$

$$\frac{dk_s}{dRe} = 3.7 \cdot d \cdot \left(\frac{2.51}{Re^2 \cdot \sqrt{f}} \right)$$

ε_d : Ver punto 3.1.5

ε_λ : Ecuación 3.35

ε_{Re} : Ecuación 3.32

Teniendo en cuenta que a cada material le corresponde un único valor de rugosidad hidráulica, se tomará un valor medio representativo para cada tubería con su respectiva incertidumbre. Se muestran los resultados en las figura 3.42 y 3.43, y un resumen de los resultados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Rugosidad hidráulica para los dos materiales evaluados.

Material de la tubería	Rugosidad hidráulica k_s (mm)
Acero al carbono sin costura – CS-SL	0.018 ± 0.05
Acero al carbono con costura – CS-WS	0.186 ± 0.5

Finalmente, en las figuras 3.44 y 3.45 se vuelven a mostrar los resultados experimentales del factor de fricción, pero con la curva de factor de fricción, según el modelo monotónico (ecuación 1.35), correspondiente a la

rugosidad hidráulica determinada para cada material en la tabla 3.8. Se muestra la curva para el valor medio y los valores máximo y mínimos según la desviación. Se puede observar que los valores experimentales son consistentes con las curvas del modelo monotónico, dado que casi todos los puntos se encuentran entre las curvas de valores de valores máximos y mínimos.

En general, se puede notar que la rugosidad hidráulica de la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS) es 10.3 veces mayor a la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL), por ende el factor de fricción para la tubería CS-WS es también mayor que el de la tubería CS-SL.



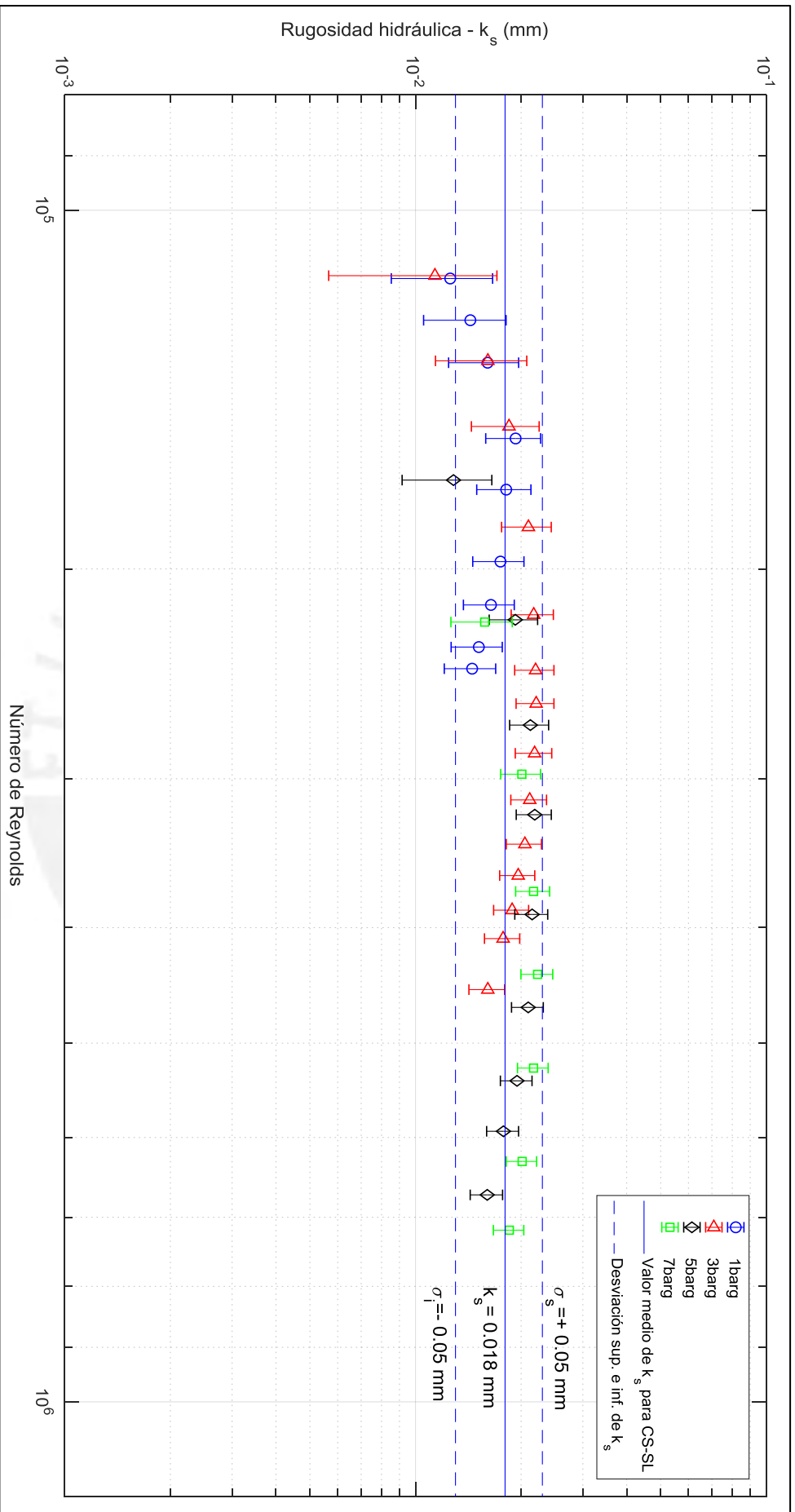


Fig.3.42: Determinación de la rugosidad hidráulica para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL), evaluada con cuatro condiciones de presión de línea.

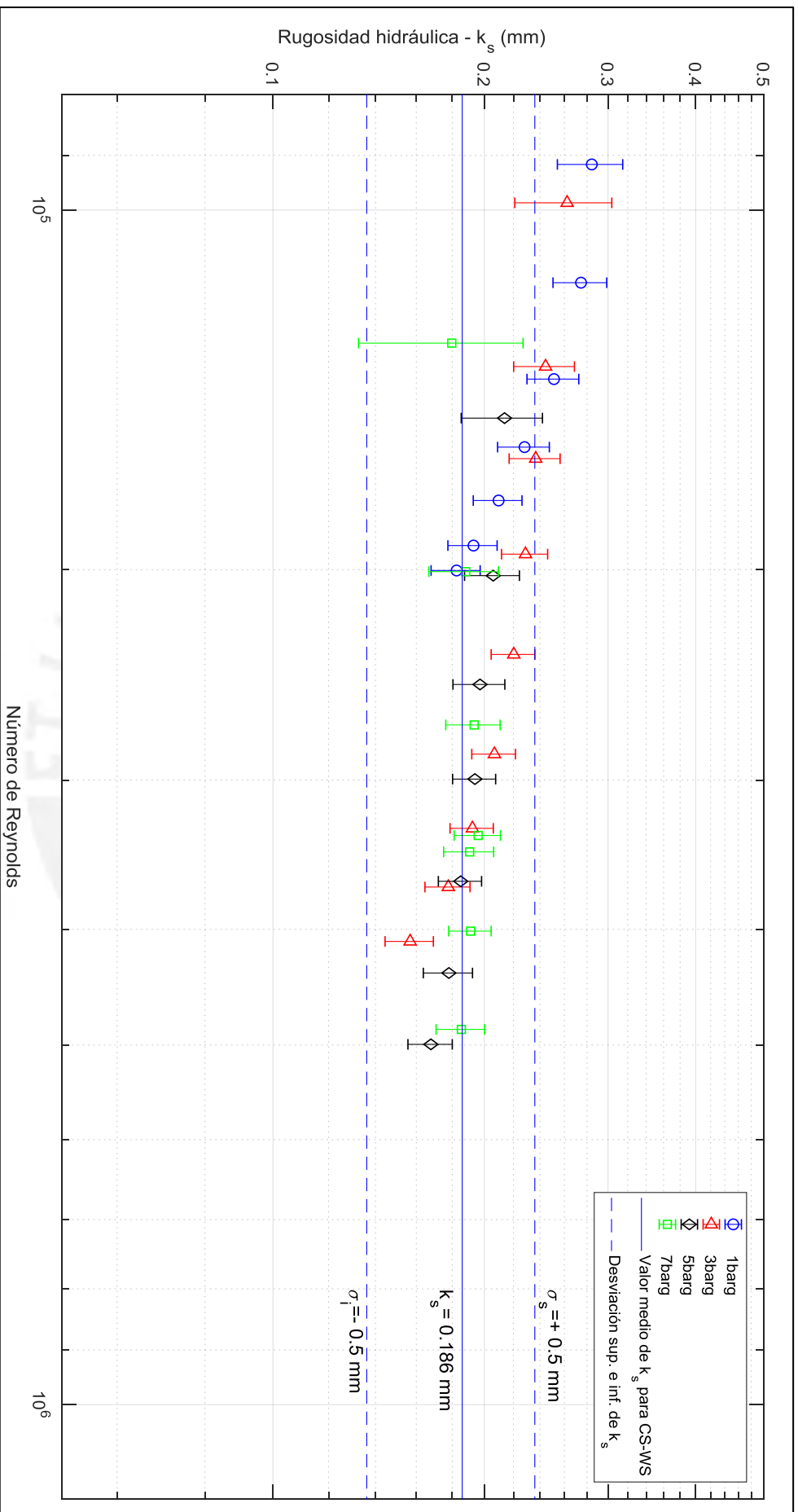


Fig. 3.43: Determinación de la rugosidad hidráulica para la tubería de acero al carbono con costura (CS-WSS), evaluada con cuatro condiciones de presión de línea.

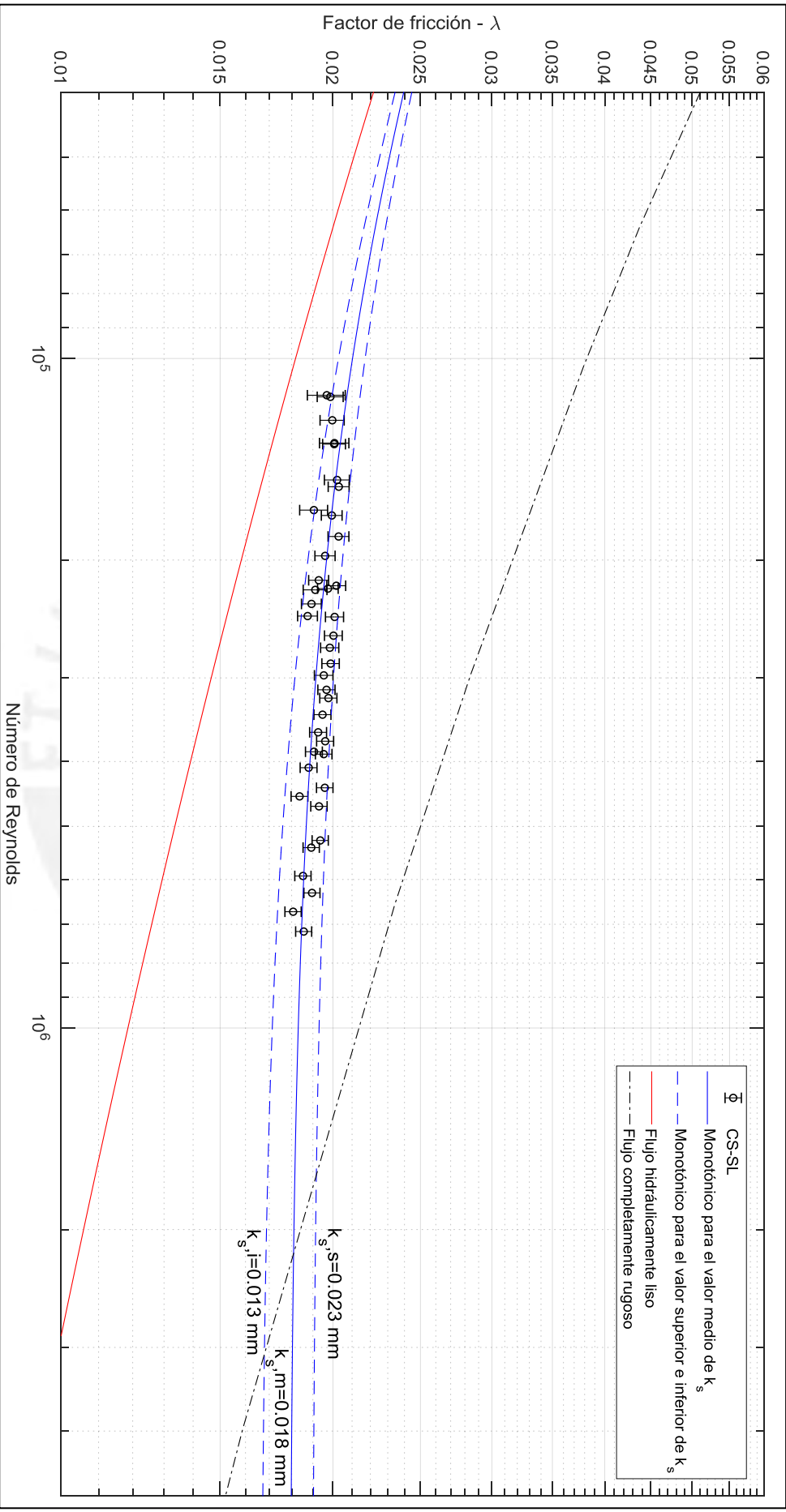


Fig.3.44: Comparación del factor de fricción experimental (Φ) con el modelo monotónico de Colebrook para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL).

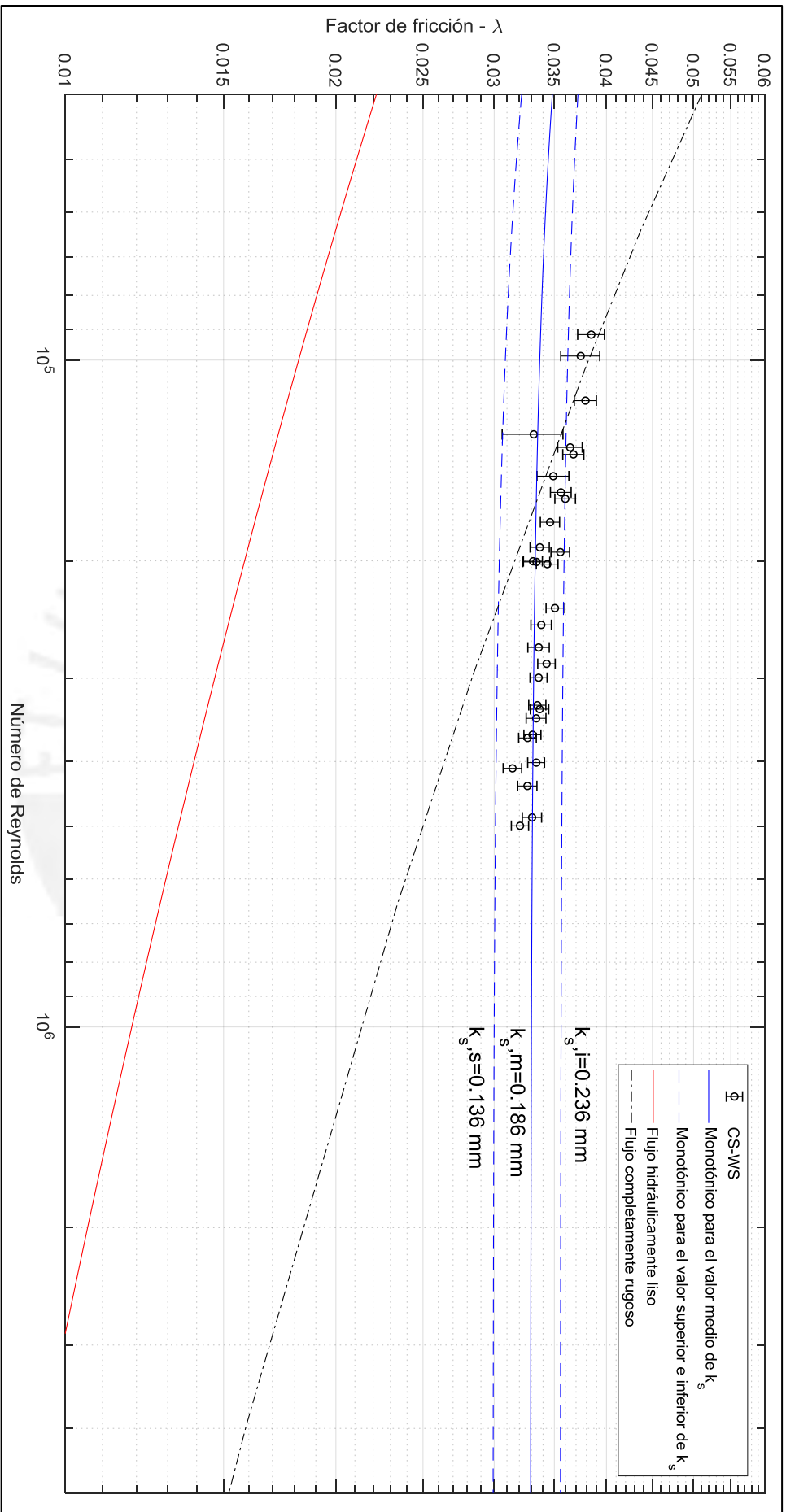


Fig.3.45: Comparación del factor de fricción experimental (o) con el modelo monotónico de Colebrook para la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.4. Determinación de la rugosidad superficial:

Tal como se ha descrito en el punto 2.4, la medición de la rugosidad superficial para cada tubería se ha realizado con un rugosímetro de superficie cuyas características se pueden ver en la tabla 2.19. Se ha realizado la medida de rugosidad superficial en 05 probetas, en cada probeta se ha medido puntualmente en 06 zonas, 03 en cada extremo de la probeta, tal como lo indica la figura 2.26. De esta manera se tienen 30 datos para cada parámetro de rugosidad.

La tabla 3.9 muestra un resumen de la medición de los parámetros R_a , R_z y R_q para cada material, se muestra la media, la desviación de los datos y error asociado a la medida.

Tabla 3.9: Medición de rugosidad superficial.

Material	Parámetro	Valor medio	σ	ε_{Total}
CS-SL	R_a	8.628	1.692	± 0.836
	R_z	45.59	9.65	± 4.71
	R_q	11.159	2.324	± 1.09
CS-WS	R_a	8.672	4.551	± 1.14
	R_z	54.74	22.05	± 6.16
	R_q	11.549	5.612	± 1.46

El error total de la medición se ha determinado utilizando la ecuación 3.1. El error aleatorio se determina según la ecuación 3.2, considerando la desviación estándar para cada parámetro y material, y el número de datos evaluados (30 datos). El error sistemático depende del instrumento y equivale a 9% del valor medio, tal como lo indica la tabla 2.X.

A modo de análisis de los resultados, se puede notar que el parámetro de rugosidad superficial R_a para la tubería CS-WS es mayor en 0.5%, al de la tubería CS-SL; mientras que la desviación estándar de los datos es mayor en 169%. Para la rugosidad R_z , el valor medio para CS-WS es mayor en 20.1% al de CS-SL y la desviación es mayor en 128.5%. Por último, para

la rugosidad R_q , la media para CS-WS es mayor en 3.5% al de CS-SL, mientras que la desviación de los datos es mayor en 141.5%. Esto indica que, según los valores medios, la rugosidad superficial de la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS) es ligeramente mayor que la rugosidad de la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL) y, según la desviación estándar, la rugosidad para la tubería CS-WS es mucho más aleatoria que la rugosidad de la tubería CS-SL.

En las siguientes figuras del 3.46 – 3.48 se recurre a gráficos en coordenadas polares para representar la rugosidad tal como se presentaría en una tubería. De este modo, los valores de mayor rugosidad se encuentran más cercanos al origen que representa el eje de la tubería. Se muestran los resultados de la medición para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL) y con costura (CS-WS). Cada figura muestra la medición realizada para las 06 zonas en cada una de las 05 probetas evaluadas para cada material, las zonas 1, 2 y 3 pertenecen a un extremo de la probeta, mientras que las zonas 4, 5 y 6 corresponden al otro extremo, tal como lo presenta la figura 2.26.

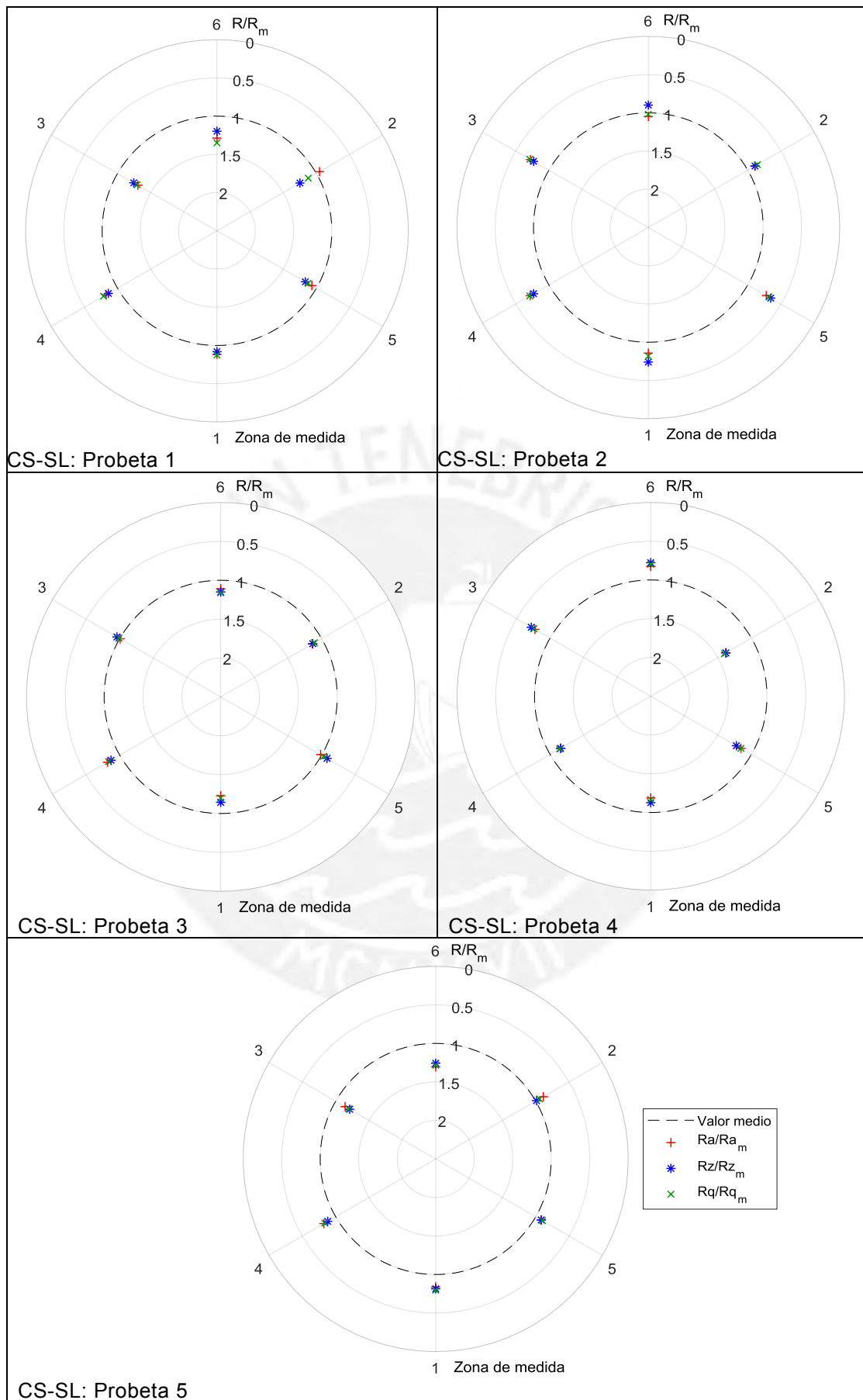


Fig. 3.46: Medición los parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q) en la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL).

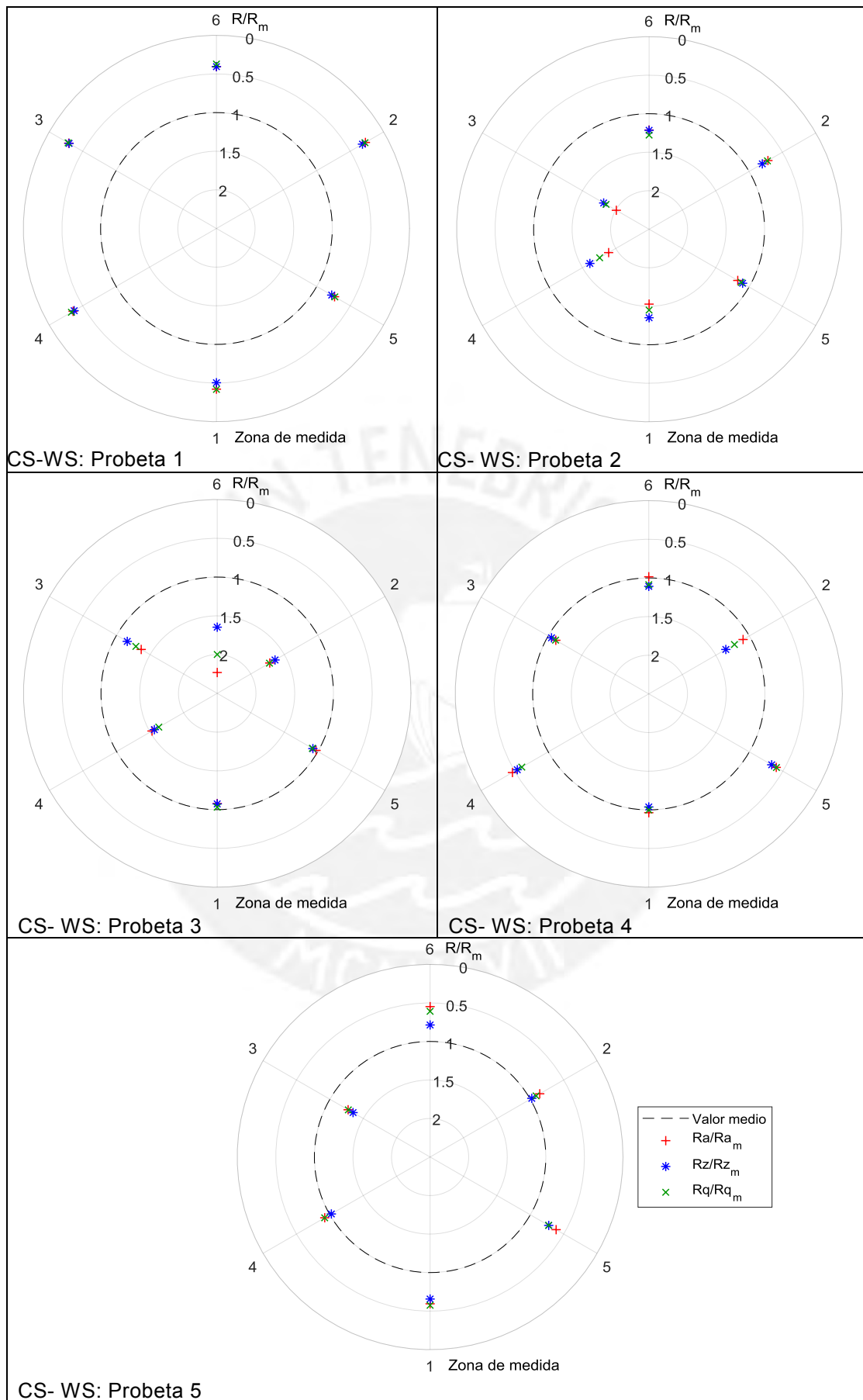


Fig. 3.47: Medición los parámetros de rugosidad superficial (R_a , R_z y R_q) en la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS).

3.5. Comparación con modelos de rugosidad hidráulica:

A continuación se contrastará la rugosidad hidráulica determinada experimentalmente para los dos materiales (CS-SL y CS- WS) con la rugosidad geométrica superficial (R_a , R_z y R_q), determinada también experimentalmente. También se contrastará la rugosidad hidráulica con valores descritos en la bibliografía y modelos de rugosidad hidráulica que están en función de la rugosidad superficial.

Estos valores obtenidos de la bibliografía y los modelos de rugosidad hidráulica son los descritos en el punto 1.4. y se resumen en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Fuentes para contrastar la rugosidad hidráulica.

	Fuente	Ecuación
Bibliografía	R. Mott (1996)	$k_s = 46 \mu m$
	F. White (2011)	
	Hydraulic Institute (1990)	$k_s = 45 \mu m$
Modelos	Hamma (1954)	$k_s = 5 \cdot R_q$
	Zagarola & Smits (1998)	$k_s = 3 \cdot R_q$
	Langelandsvik et al. (2008)	$k_s = (1.6 \pm 0.5) \cdot R_q$
	Botros (2016)	$k_{s(Colebrook)} = 1.306 \cdot R_q + 0.078 \cdot R_q^2$
	Botros y Shouman (2016)	$k_{s(Colebrook)} = 2.2907 \cdot R_q + 0.1029 \cdot R_q^2$
	Farshad et al. (2001)	$k_s = R_z$
	Afzal (2007)	$k_s = 1.244 \cdot R_z$
		$k_s = 5.333 \cdot R_q$
		$k_s = 6.450 \cdot R_a$
	Adams y Grant (2012)	$k_s = 0.978 \cdot R_z$
		$k_s = 3.100 \cdot R_q$
	$k_s = 5.863 \cdot R_a$	

Las figuras 3.49 y 3.50 muestran gráficamente este contraste. Se puede observar que para la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL), la rugosidad superficial R_q es la que más se aproxima al valor de rugosidad hidráulica. También se evidencia que la rugosidad hidráulica según modelo de Langelandsvik (2008) coincide con el valor de rugosidad hidráulica experimental y que el modelo de Botros (2016) también muestra una aproximación.

Respecto a la tubería de acero al carbono con costura (CS-WS), se puede ver que los valores de rugosidad superficial y todos los modelos de rugosidad hidráulica son menores a la rugosidad hidráulica experimental, siendo la rugosidad superficial R_z y el modelo, dependiente de R_z , de Afzal (2007) los que más se aproximan al valor de k_s experimental.



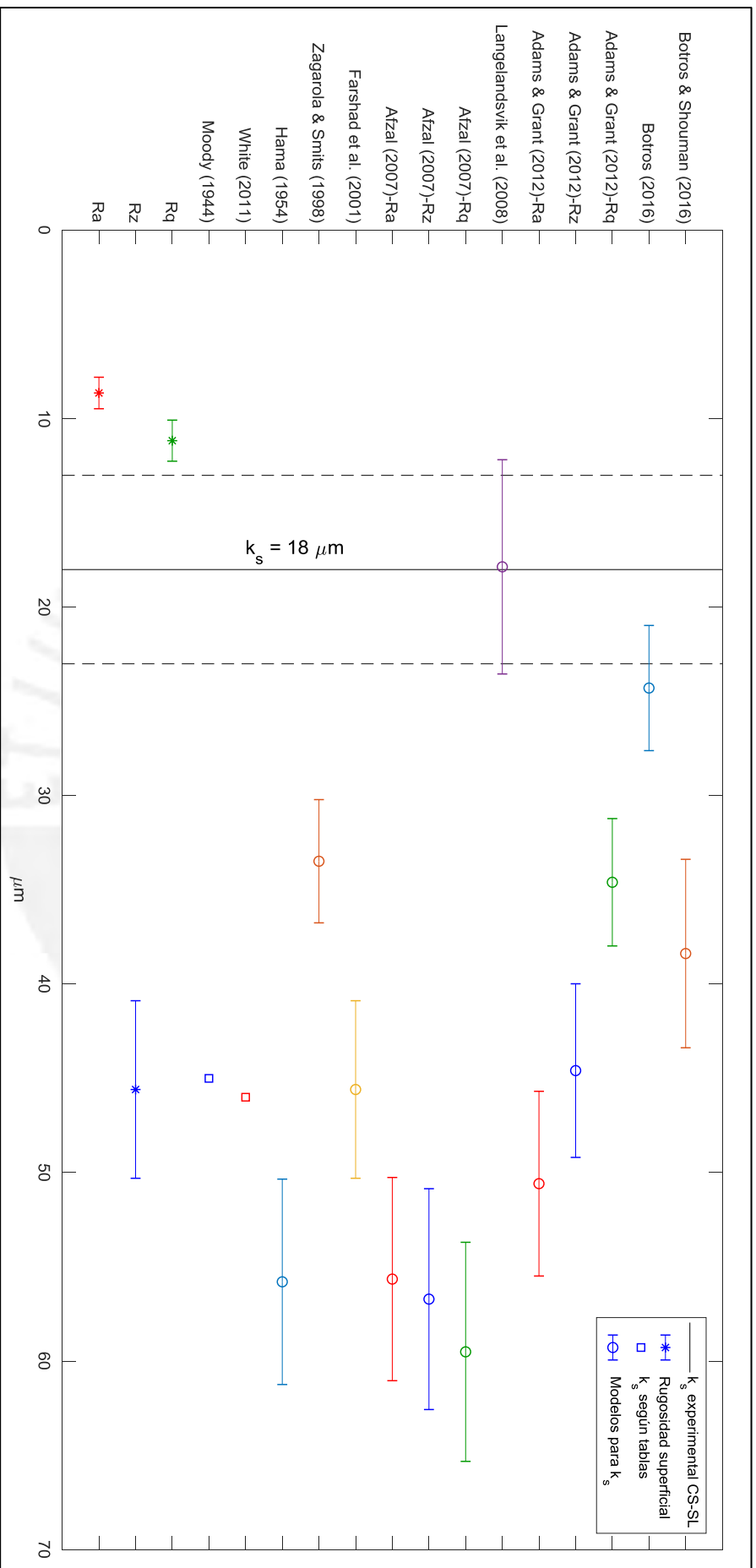


Fig. 3.48: Comparación de la rugosidad hidráulica (k_s) de la tubería de acero al carbono sin costura (CS-SL) respecto de sus parámetros de rugosidad superficial (Ra, Rz y Rq) y los modelos para determinar k_s .

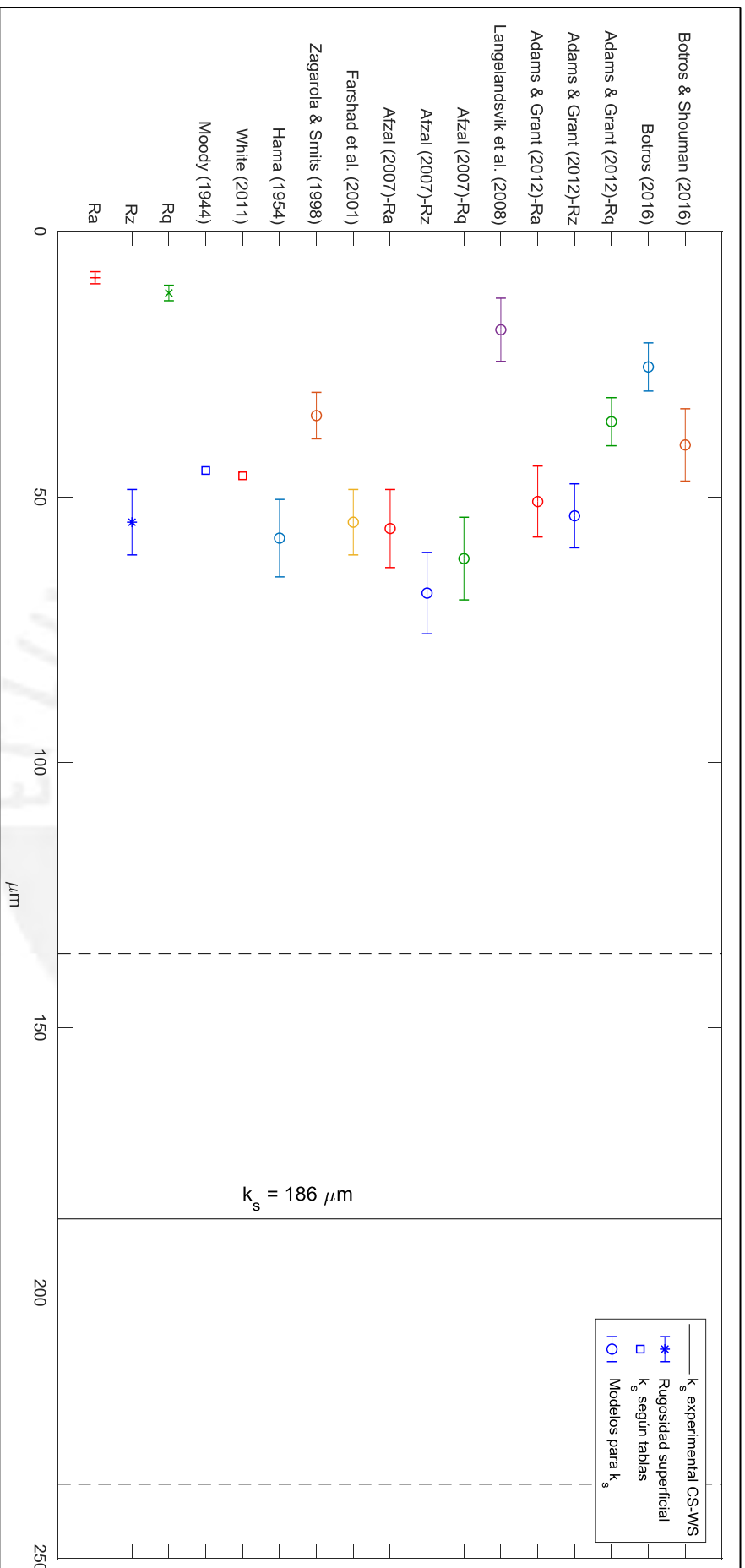


Fig. 3.49: Comparación de la rugosidad hidráulica (k_s) de la tubería de acero al carbono con costura (CS-WWS) respecto de sus parámetros de rugosidad superficial (Ra, Rz y Rq) y los modelos para determinar k_s .

CONCLUSIONES

- El comportamiento hidráulico de las tuberías de acero al carbono con y sin costura, en función del factor de fricción (λ), obedece al modelo monotónico de Colebrook – White.
- La rugosidad hidráulica de la tubería de acero al carbono sin costura es equivalente a 0.018 mm, mientras que para la tubería con costura es 0.186 mm.
- Los valores de rugosidad superficial (Ra , Rz , Rq) tienen el mismo orden de magnitud para las dos tuberías (CS-SL y CS-WS); sin embargo, el valor de rugosidad hidráulica para la tubería CS-WS es aproximadamente 10 veces mayor que la tubería CS-SL.
- Existe una relación matemática entre la rugosidad hidráulica y la rugosidad superficial para las tuberías de acero al carbono con y sin costura. Esta relación viene definida por diversos modelos, dependerá de la naturaleza del material utilizar uno u otro. De esta manera, la rugosidad hidráulica de una tubería se obtiene utilizando los parámetros de rugosidad superficial y el modelo que más se ajuste.
- La rugosidad superficial que más se aproxima a la rugosidad hidráulica experimental es Rq para la tubería de acero al carbono sin costura y Rz para la tubería al carbono con costura.
- Los modelos de rugosidad hidráulica que más se aproxima a la rugosidad hidráulica experimental es el de Langelandsvik (2008) y Botros (2016) para la tubería de acero al carbono sin costura y Afzal (2007), en la ecuación que depende de Rz , para la tubería al carbono con costura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, T., & Grant, C. (2012). A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness. *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 66-71.
2. Afzal et al. (2013). Turbulent flow in a machine honed rough pipe for large Reynolds numbers: General roughness scaling laws. *Journal of Hydro-environment Research*, 81-90.
3. Afzal, N. (2007). Friction Factor Directly From Transitional Roughness in a Turbulent Pipe Flow. *Journal of Fluids Engineering ASME*, 129, 1255-1267.
4. Afzal, N. (2013). Roughness effects of commercial steel pipe in turbulent flow: universal scaling. *Journal of Civil Engineering*, 40, 188-193.
5. Allen et al. (2007). Turbulent flow in smooth and rough pipes. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 365, 699-714.
6. American Society of Mechanical Engineers. (1996). Surface texture (Surface roughness, waviness, and lay) (ASME B46.1-1995). New York.
7. Atlas Copco. (s.f.). Refrigerant Air Dryers Fx - Especificaciones Generales.
8. Botros, K. K. (2016). Experimental Investigation Into the Relationship Between the Roughness Height in Use With Nikuradse or Colebrook Roughness Functions and the Internal Wall Roughness Profile for Commercial Steel Pipes. *ASME*, 138, 081202.
9. Botros, K. K., & Shouman, A. (2016). Relationship between roughness height in use with Colebrook roughness function and the internal wall surface roughness parameters for stainless steel pipes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 197-202.
10. Bradshaw, P. (2000). A note on “critical roughness height” and “transitional roughness”. *Physics of Fluids*, 12(6), 1611-1614.
11. Brkic, D. (2011). New explicit correlations for turbulent flow friction factor. *Nuclear Engineering and Design*, 241, 4055-4059.
12. Colebrook, C. (1939). Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth- and rough-pipe. *Inst. Civil Eng.*, 133-156.
13. Deutsches Institute für Normung. (2002). Indication of surface texture in technical product documentation (ISO 1302:2002). Berlin.
14. Farshad et al. (2001). New developments in surface roughness measurements, characterization, and modeling fluid flow in pipe. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29, 139–150.
15. Farshad, F., & Rieke, H. H. (2005). Technology Innovation for Determining Surface Roughness in Pipes. *Technology Today Series*, 82-86.

16. Flack et al. (2012). The onset of roughness effects in the transitionally rough regime. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 35, 160-167.
17. Flack et al. (2016). Skin-friction behavior in the transitionally-rough regime. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1-10.
18. Flack, K. A., & Schultz, M. P. (2010). Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime. *Journal of Fluids Engineering*, 132, 041203.
19. Flack, K. A., & Schultz, M. P. (2014). Roughness effects on wall-bounded turbulent flows. *Physics of Fluids*, 26, 101305.
20. Hama, F. (1954). Boundary-Layer Characteristics for Smooth and Rough Surfaces. *Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 335-358.
21. Hydraulic Institute. (1999). *Engineering Data Book*.
22. International Electrotechnical Commission - IEC. (2008). 60751 - Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors.
23. International Organization for Standardization. (1997). Geometrical product specification - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters (ISO 4287). Geneva.
24. International Organization for Standardization. (2003). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 2: Orifice plates (ISO 5167-2:2003). Geneva.
25. Jiménez, J. (2004). Turbulent flows over rough walls. *Fluid Mechanics*, 36, 173-196.
26. Joseph, D. D. (2005). *Potencial Flow of Viscous Fluids: Historical Notes*. Minneapolis: Department of Aerospace Engineering and Mechanics, University of Minnesota.
27. Langelandsvik et al. (2008). Flow in a commercial steel pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, 595, 323-339.
28. Mahr GmbH. (s.f.). Rugosímetro MarSurf PS1 - Especificaciones técnicas .
29. McKeon et al. (2005). A new friction factor relationship for fully developed pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 538, 429-443.
30. McKeon, B.J. et al. . (2004). Friction factors for smooth pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 511, 41-44.
31. Micro. (s.f.). Unidades de tratamiento FRL - Especificaciones Generales.
32. Mitutoyo. (s.f.). Absolute Digimatic Caliper Series 500, Product Information.
33. Moody, L. (1944). Friction factors for pipe flow. *Transactions of the ASME*, 671-684.

34. Mott, R. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada* (Cuarta ed.). México: Pearson.
35. Munson, B. R. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Sexta ed.). New York: Wiley.
36. Nikuradse, J. (1933). Strömungsgesetze in rauhen Röhren. *VDI-Forschungsheft*, 361.
37. Omega. (s.f.). Micro-Machined Silicon transducers PX409 Series, General specifications.
38. Omega. (s.f.). Pipe Plug RTD Sensor, General specifications RTD NPT Series.
39. Omega. (s.f.). Very-high-accuracy current output transmitter – PX01/PXM01 Series, General specifications current output pressure transducers.
40. Perry et al. (2001). A possible reinterpretation of the Princeton superpipe data. *Journal of Fluid Mechanics*, 439, 395-401.
41. Petropoulos et al. (2010). Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. Springer.
42. Schaschke, C. (1998). *Fluid Mechanics*. Rugby: IChemE.
43. Schultz, M. P., & Flack, K. A. (2007). The rough-wall turbulent boundary layer from the hydraulically smooth to the fully rough regime. *Journal of Fluid Mechanics*, 580, 381-405.
44. Shockling et al. (2006). Roughness effects in turbulent pipe flow. *Journal Fluid Mechanics*, 564, 267-285.
45. Sletfjerding, E. (1999). Friction Factor in Smooth and Rough Gas Pipelines. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
46. Sletfjerding, E., & Gudmundsson, J. S. (2003). Friction Factor Directly From Roughness Measurements. *Transactions of the ASME*, 126-130.
47. Smits, A., & Zagarola, M. (2005). Applications of dense gases to model testing for aeronautical and hydrodynamic applications. *Institute of Physics Publishing*, 1710–1715.
48. Sonin, A. (2001). *Fundamental Laws of Motion for Particles, Material Volumes, and Control Volumes*. Cambridge: Department of Mechanical Engineering - MIT.
49. White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (Séptima ed.). New York: McGrawHill.
50. Yokogawa. (s.f.). EJX110A Differential Pressure Transmitter, General Specifications.
51. Yokogawa. (s.f.). EJX510A AND EJX530A Absolute and gauge pressure transmitter, General specifications.

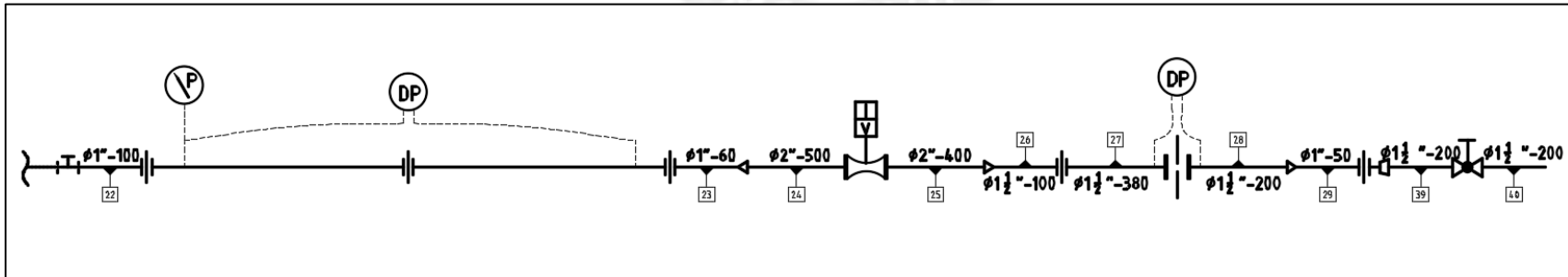
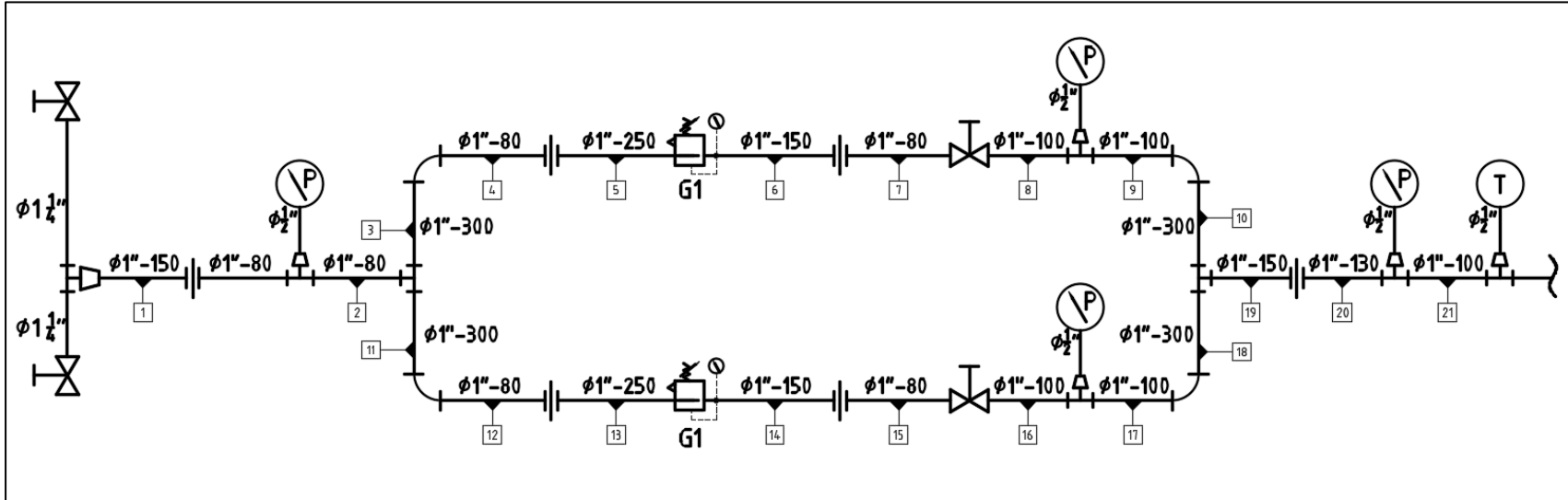
52. Zagarola, M. V., & Smits, A. J. (1998). Mean-flow scaling of turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 373, 33-79.





ANEXOS

ANEXO 1: Esquema de la Instalación





ANEXO 2: Hoja técnica del sensor de temperatura

RTD SPECIFICATIONS

OMEGAs sanitary RTD sensors are supplied standard with 100 Ω, Class A sensing elements that conform to the International IEC 60751 Standard. This standard specifies the resistance vs. temperature relationship, the Accuracy Classes, and the color code used. This information is included below to help in the application and use of these sanitary sensors.

Resistance vs. Temperature Characteristics

The Resistance vs. Temperature Characteristics of OMEGAs sanitary RTD sensors conform to the following equation:

Equations

Platinum RTD resistance can be calculated using the Callendar-Van Dusen Equation as follows:

For temperatures below 0°C: $R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3]$ where: $A = 3.9083 \times 10^{-3} (C^{-1})$ $B = -5.775 \times 10^{-7} (C^{-2})$ $C = -4.183 \times 10^{-12} (C^{-4})$ $R_0 = \text{Resistance at } 0^\circ\text{C}$ $t = \text{Temperature in degrees celsius}$	For temperatures above 0°C, this simplifies to: $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$
--	--

Resistance vs. Temperature Values per IEC 60751

Temp (°C)	Resistance (Ω)	Temp (°C)	Resistance (Ω)	Temp (°C)	Resistance (Ω)
-200	18.52	150	157.33	450	264.18
-150	39.72	200	175.86	500	280.98
-50	80.31	250	194.10	550	297.49
0	100.00	300	212.05	600	313.71
50	119.40	350	229.72	650	329.64
100	138.50	400	247.09	700	345.28

To see the full table (every 1°C), visit omega.com/temperature/Z/pdf/z252-254.pdf

Note: Resistance values for temperatures from -200 to 700°C are provided for reference. The RTD sensors included in these pages have specific temperature ranges assigned. See the applicable product pages for specific temperature ranges.

Accuracy Classes

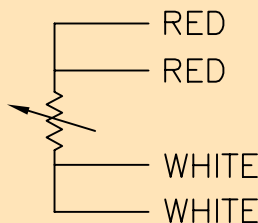
There are four "Accuracy Classes" specified in IEC 60751, listed from least accurate to most accurate they are: (Note: Accuracy Values are in Degrees C)

- | | |
|--------------------------------|----------------|
| Class C = ±(0.60 + 0.01* t) | (-50 to 500°C) |
| Class B = ±(0.30 + 0.005* t) | (-50 to 500°C) |
| Class A = ±(0.15 + 0.002* t) | (-30 to 300°C) |
| Class AA = ±(0.10 + 0.0017* t) | (0 to 150°C) |

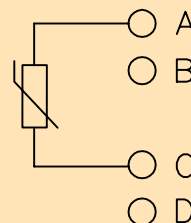
where t = temperature of interest in °C without regard to sign



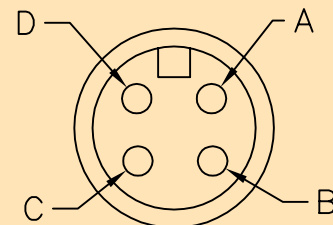
Wiring Diagrams



Cable and Connection Head Style Sensors



M12 Connector Style Sensors





ANEXO 3: Hoja de calibración del sensor de temperatura



Certificate Of Calibration

for

Pontificia Universidad Catolica del Peru

Cust. P.O. #: JB112015

Report #: OM- 121122523

Test Item: EI1202130/RTD-NPT-100-E-
1/4/1.37-CAL-3

WO : SC00113284

Recal Date: Per System Application

Ref. I.D.: WNCAL00314

CAL-3

Omega Engineering, Inc. certifies that the above instrumentation has been calibrated and tested to **meet or exceed** the published specifications. This calibration and testing was performed using instrumentation and standards that are traceable to the **National Institute of Standards and Technology**. Calibration has been performed in compliance with ISO 10012-1, ISO 9001 and ANSI/NCSL Z540-1-1994 as well as ASTM E 230 and ANSI MC96.1. This Certificate/Report shall not be reproduced, except in full, without written consent of Omega Engineering Inc.

Test Conditions: Temperature 70°F Relative Humidity 30%

Procedure used: QAP-2100

The maximum calibration uncertainty is calculated to be 0.3C from -25C to 500 C and 0.55C from 500C to 1100C.

INSTRUMENTS USED:

<u>MODEL</u>	<u>SERIAL#</u>	<u>CAL DUE DATE</u>	<u>N.I.S.T. NUMBERS</u>
DP251	87110442197	09/22/16	NNDP-100-03
RTD (Burns)	745099	02/18/16	NNPR-100-02
RTD (Burns)	574267	08/24/16	NNPR-100-04
Agilent 34401A	MY41009336	11/09/16	NNDM-100-16
DP251	1287-021-458	02/03/16	NNDP-100-11

Probe No.	Nominal Temperature	Actual Test Temperature	Indicated Temperature
1	0 °C	0.00 °C	0.05 °C
1	50 °C	50.00 °C	50.11 °C
1	100 °C	100.00 °C	100.11 °C

Brian Amore
Metrology Technician

Calibration Date: 12-21-15

Carl J. Mueller Jr.
Quality Assurance Inspector

Page 1 of 2



ANEXO 4: Hoja técnica del sensor de presión manométrica

VERY-HIGH-ACCURACY CURRENT OUTPUT TRANSMITTER

STANDARD AND METRIC MODELS

4 to 20 mA Output
0-2 to 0-30,000 psi
0-150 mbar to 0-400 bar

STANDARD
PX01C0-100GI,
shown smaller than
actual size.

Cable style.

Twist-lock
style.

PX01/PXM01 Series



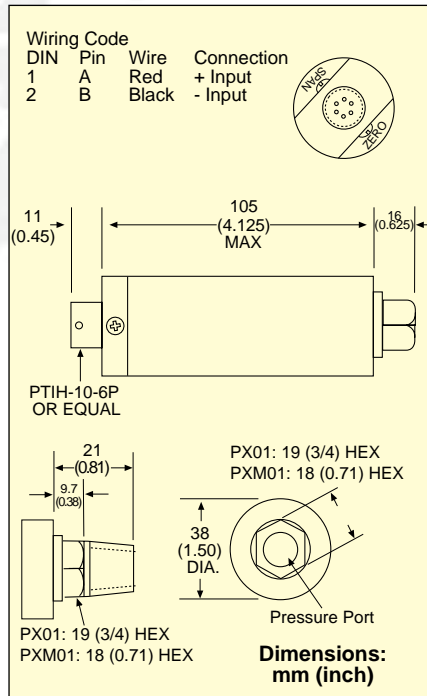
- ✓ 0.05% Linearity
- ✓ 5-Point Calibration Provided
- ✓ All Stainless Steel Construction
- ✓ Hermetically Sealed Design for Harsh Environments
- ✓ Available in Gage, Absolute, Sealed Gage, psi, and Metric Ranges
- ✓ Cable or Connector Models
- ✓ Optional Pressure Ports to Fit Most Industrial Applications

OMEGA's PX01/PXM01 are very high-accuracy, low-noise, 4 to 20 mA output industrial pressure transmitters. Their all stainless steel construction and hermetically sealed case make them suitable for harsh environments. A broad temperature-compensated range of 15 to 71°C (60 to 160°F) makes these transmitters very stable with fluctuating temperatures.

SPECIFICATIONS

4 to 20 mA Output
Excitation: 10 to 40 Vdc
Output: 4 to 20 mA ± 0.06 mA
Zero Balance: +4 mA ± 0.02 mA
Linearity: $\pm 0.05\%$ FSO
Hysteresis: $\pm 0.05\%$ FSO
Repeatability: $\pm 0.05\%$ FSO
Sensing Element: 4-active-arm bridge, using thick-film strain gages in a hermetically sealed chamber (except gage units)
Operating Temp Range: -46 to 121°C (-50 to 250°F)
Compensated Temp Range: 16 to 71°C (60 to 160°F)
Thermal Effects:
Span: 0.003% FSO/°F
Zero: 0.003% FSO/°F
Proof Pressure: 150% of rated pressure
Burst Pressure: 300% of rated pressure
Wetted Parts: 17-4 PH stainless steel
Pressure Port: See custom configurations on next page

METRIC
PXM01MC1-010BARGI,
shown smaller than
actual size.



CURRENT OUTPUT PRESSURE TRANSDUCERS
B

VERY-HIGH-ACCURACY ALL STAINLESS STEEL TRANSMITTER

STANDARD CUSTOM CONFIGURATIONS—Additional cost may apply

PX01 SERIES	PRESSURE PORT [1]	ELECTRICAL CONNECTION [2]	RANGE (psi) [3]	UNITS [4]	OUTPUT [5]	OPTIONS [6]
Models <10,000 psi			002*	A,G,S	I = 4 to 20 mA	OL = Overload stops when available OX = Cleaned for oxygen use plus 2 weeks ()ft = Optional cable length in feet
C = 1/4-18 NPT-M			005*	A,G,S		
D = 1/4-18 NPT-F			010	A,G,S		
J = 7/16-20 UNF-M			015	A,G,S		
K = 7/16-20 UNF-F			020	A,G,S		
Models ≥10,000 psi			025	A,G,S		
S = 1/4 HP tube fitting,			050	A,G,S		
			075	A,G,S		
			100	A,G,S		
			150	A,G,S		
			200	A,G,S		
			250	A,G,S		
			300	A,G,S		
			500	A,G,S		
			750	A,G,S		
			1K	A,G,S		
			1.5K	A,G,S		
			2K	A,G,S		
			3K	A,G,S		
			3.5K	A,G,S		
			5K	A,G,S		
			7.5K	A,G,S		
			10K†	A,G,S		
			20K†	A,G,S		
			30K†	A,G,S		
0 = 3 m (10') cable (std) 1 = PTIH-10-6P connector (or equal) Mating connector (sold separately), order PT06F-10-6S 5 = Lightning-protected amplifier box (4 to 20 mA models only) 6 = mini DIN connector* *no shunt cal						
For additional options including extended compensated temperatures, visit us online						

* 2 and 5 psi ranges available only on amplified output.
 † Supplied with 1/4 HP tube fitting.

To order a custom configuration:

1. Select a pressure port
2. Select electrical connection
3. Select a pressure range
4. Select pressure units
5. Select output
6. Select options

Ordering Examples: *PX01C1-100GI*, 100 psi gage pressure transducer with 1/4-18 NPT male fitting, *PTIH-10-6P*, connector and 4 to 20 mA output, *PT06F10-6S*, mating connector (sold separately).

PX01J1-015AI, 15 psi absolute pressure transducer with 7/16-20 UNF male fitting, *PTIH-10-6P*, connector 4 to 20 mA output, *PT06F10-6S*, mating connector (sold separately).

METRIC CUSTOM CONFIGURATIONS

PXM01 SERIES	PRESSURE PORT [1]	ELECTRICAL CONNECTION [2]	RANGE (BAR) [3]	UNITS [4]	OUTPUT [5]	OPTIONS [6]		
MA = G1/8B Male			0.16	A, G, S	I = 4 to 20 mA	OX = Cleaned for oxygen service OL = Overload stops ()m = Optional cable length in meters		
MB = G1/8B Female			0.4	A, G, S				
MC = G1/4B Male			1.0	A, G, S				
MD = G1/4B Female			1.6	A, G, S				
			2.5	A, G, S				
			4.0	A, G, S				
			6.0	A, G, S				
			10	A, G, S				
			16	A, G, S				
			25	A, G, S				
			40	A, G, S				
			60	A, G, S				
			100	A, G, S				
			160	A, G, S				
			250	A, G, S				
			400	A, G, S				
0 = 3 m (10') cable (std) 1 = PTIH-10-6P connector (or equal) 6 = mini DIN connector* *no shunt cal								
For additional options including extended compensated temperatures, visit us online								

To order a custom configuration:

1. Select a pressure port
2. Select electrical connection
3. Select a pressure range
4. Select pressure units – absolute, gage or sealed gage
5. Select output
6. Select options

Ordering Examples: *PXM01MB0-010BARS*, 10 bar sealed gage pressure transducer with G1/8B female connection, 3 m (10') cable termination, and 4 to 20 mA output.

PXM01MC1-010BARAI, 10 bar absolute pressure transducer with G1/4B male connection, twist-lock connector and 4 to 20 mA output, *PT06F10-6S*, mating connector (sold separately).



STANDARD
PX01C0-100GI,
shown smaller
than actual size.

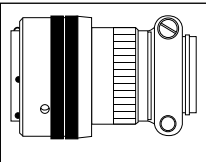
STANDARD MODELS

To Order

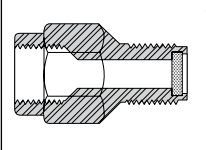
RANGE psi	bar	1/8"-20 UNF MODEL NO.	1/2 NPT MODEL NO.	COMPATIBLE METERS†
ABSOLUTE PRESSURE (All Ranges Available in Absolute Pressure)				
0 to 10	0 to 0.69	PX01K[*]-010AI	PX01C[*]-010AI	DP41-E, DP25B-E
0 to 15	0 to 1.0	PX01K[*]-015AI	PX01C[*]-015AI	DP41-E, DP25B-E
0 to 20	0 to 1.4	PX01K[*]-020AI	PX01C[*]-020AI	DP41-E, DP25B-E
0 to 25	0 to 1.7	PX01K[*]-025AI	PX01C[*]-025AI	DP41-E, DP25B-E
0 to 50	0 to 3.4	PX01K[*]-050AI	PX01C[*]-050AI	DP41-E, DP25B-E
GAGE PRESSURE (All Ranges Also Available in Sealed Gage Pressure)				
0 to 2	0 to 0.14	PX01K[*]-002GI	PX01C[*]-002GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 5	0 to 0.34	PX01K[*]-005GI	PX01C[*]-005GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 10	0 to 0.69	PX01K[*]-010GI	PX01C[*]-010GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 15	0 to 1.0	PX01K[*]-015GI	PX01C[*]-015GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 50	0 to 3.4	PX01K[*]-050GI	PX01C[*]-050GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 75	0 to 5.2	PX01K[*]-075GI	PX01C[*]-075GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 100	0 to 6.9	PX01K[*]-100GI	PX01C[*]-100GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 200	0 to 13.8	PX01K[*]-200GI	PX01C[*]-200GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 300	0 to 20.7	PX01K[*]-300GI	PX01C[*]-300GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 500	0 to 34.5	PX01K[*]-500GI	PX01C[*]-500GI	DP41-E, DP25B-E
0 to 1000	0 to 68.9	PX01K[*]-1KGI	PX01C[*]-1KGI	DP41-E, DP25B-E
0 to 1500	0 to 103	PX01K[*]-1.5KGI	PX01C[*]-1.5KGI	DP41-E, DP25B-E
0 to 2000	0 to 138	PX01K[*]-2KGI	PX01C[*]-2KGI	DP41-E, DP25B-E
0 to 3500	0 to 241	PX01K[*]-3.5KGI	PX01C[*]-3.5KGI	DP41-E, DP25B-E
0 to 5000	0 to 345	PX01K[*]-5KGI	PX01C[*]-5KGI	DP41-E, DP25B-E
0 to 7500	0 to 517	PX01K[*]-7.5KGI	PX01C[*]-7.5KGI	DP41-E, DP25B-E
0 to 10,000**	0 to 689	PX01S[*]-10KGI	PX01S[*]-10KGI	DP41-E, DP25B-E*
0 to 20,000**	0 to 1379	PX01S[*]-20KGI	PX01S[*]-20KGI	DP41-E, DP25B-E*
0 to 30,000**	0 to 2068	PX01S[*]-30KGI	PX01S[*]-30KGI	DP41-E, DP25B-E*

* 4-digit meter, counts in increments of 10.
† Visit us online for compatible meters.

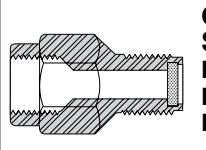
** 1/4 HP tube fitting.
[*] = Insert "0" for 3 m (10') cable,
"1" for twist-lock connector,
or "6" for mini DIN connector.



**Mating
Connector
PT06F10-6S**



**1/4 NPT Pressure
Snubbers:**
PS-4G = Gas
PS-4E = Lt Oil
PS-4D = Dense Lq



**3/8" Pressure
Snubbers:**
PS-4G-MG = Gas
PS-4E-MG = Lt Oil
PS-4D-MG = Dense
Liquid

Comes complete with 5-point calibration.
† Visit us online for compatible meters.

[*] = Insert "0" for 3 m (10') cable,
"1" for twist-lock connector,
or "6" for mini DIN connector.

To order absolute pressure models, replace
"G" in model number with "A"
To order sealed gage models, replace "G" in
model number with "S"

Ordering Examples: PX01K1-1KGI,
1000 psi gage transducer with 4 to 20 mA
output, twist lock connector and 1/8"-20 UNF
female pressure connection.
PT06F10-6S, mating connector
(sold separately).

PXM01MB0-010BARAI, 10 bar absolute
transmitter with 4 to 20 mA output, 3 m (10')
cable with 1/2 NPT conduit fitting and
G 3/8" female pressure connection.

METRIC MODELS

Models with G 3/8" Female Pressure Connection, Cable or Connector and 4 to 20 mA Output

RANGE	MODEL NO.	COMPATIBLE METERS†
GAGE PRESSURE		
0 to 0.16 bar	0 to 2.32 psi	PXM01MD[*]-160mBARGI
0 to 0.4 bar	0 to 5.8 psi	PXM01MD[*]-400mBARGI
0 to 1 bar	0 to 15 psi	PXM01MD[*]-001BARGI
0 to 1.60 bar	0 to 23 psi	PXM01MD[*]-1.60BARGI
0 to 2.50 bar	0 to 36 psi	PXM01MD[*]-2.50BARGI
0 to 4 bar	0 to 58 psi	PXM01MD[*]-004BARGI
0 to 6 bar	0 to 87 psi	PXM01MD[*]-006BARGI
0 to 10 bar	0 to 145 psi	PXM01MD[*]-010BARGI
0 to 16 bar	0 to 232 psi	PXM01MD[*]-016BARGI
0 to 25 bar	0 to 363 psi	PXM01MD[*]-025BARGI
0 to 40 bar	0 to 580 psi	PXM01MD[*]-040BARGI
0 to 60 bar	0 to 870 psi	PXM01MD[*]-060BARGI
0 to 100 bar	0 to 1450 psi	PXM01MD[*]-100BARGI
0 to 160 bar	0 to 2321 psi	PXM01MD[*]-160BARGI
0 to 250 bar	0 to 3626 psi	PXM01MD[*]-250BARGI
0 to 400 bar	0 to 5802 psi	PXM01MD[*]-400BARGI

ACCESSORY

MODEL NO.	DESCRIPTION
PT06F10-6S	Mating connector for PX01 units with twist-lock connector



ANEXO 5: Hoja de calibración del sensor de presión manométrica

PRESSURE TRANSDUCER
FINAL CALIBRATION

0.00 - 300.00 PSIG
Excitation 15.000 Vdc

Job: Serial: 267621
Model: PX01C1-300GI Tested By: CHRIS
Date: 5/19/2015 Temperature Range: +60 to +160 F
Calibrated: 0.00 - 300.00 PSIG Specfile: PX01-I

Pressure PSIG	Unit Data mA
0.00	4.001
150.00	12.015
300.00	20.008
150.00	12.020
0.00	4.001

Balance 4.001 mA
Sensitivity 16.007 mA

ELECTRICAL LEAKAGE: PASS
PRESSURE CONNECTION/FITTING: 1/4-18 NPT MALE
ELECTRICAL WIRING/CONNECTOR: PIN A = +INPUT
PIN B = -INPUT

This Calibration was performed using Instruments and Standards that are traceable to the United States National Institute of Standards Technology.

S/N	Description	Range	Reference	Cal Cert
0078/90-03	AUTO 1000 PSI DRUCK	0 - 300.00 PSIG	C-2501	C-2501
US37046448	AT34970 DMM	Unit Under Test	C-2465	C-2465

Q.A. Representative : *Chris Diaz* Date: 5/19/2015

This transducer is tested to & meets published specifications. After final calibration our products are stored in a controlled stock room & considered in bonded storage. Depending on environment & severity of use factory calibration is recommended every one to three years after initial service installation date.

Omega Engineering Inc., One Omega Drive, Stamford, CT 06907
http://www.omega.com email: info@omega.com phone (800) 826-6342

ANEXO 6: Hoja técnica del sensor de presión diferencial en la tubería



MICRO-MACHINED SILICON TRANSDUCERS

WET/DRY DIFFERENTIAL PRESSURE MODELS



mV/V, 0 to 5 or 0 to 10 Vdc, or 4 to 20 mA Outputs
Uni-Directional Ranges
0-10 inH₂O to 0-1000 psid

PX409 Series



- 5-Point NIST Traceable Calibration
- Precision Micro-Machined Silicon Core
- High Stability, Low Drift
- Welded Stainless Steel Construction
- 316L SS Wetted Parts on Wet Side—Clean Dry Gases in Dry Side
- Digital Dynamic Thermal Compensation Across Temperature and Pressure Range
- Premium Temperature Performance
- Broad Compensated Temperature Range
- Durable, 1 Million Cycle Life
- Ruggedized with Secondary Containment
- Customized Specifications Available

These rugged stainless steel transducers are ideal for industrial, automotive, or aerospace applications where only one side of the transducer is exposed to wet media. These wet/dry transducers deliver the great performance characteristics of the Micro-Machined Silicon Series Transducers at a lower price than the wet/wet models. They can be used in test benches, filter monitoring, air flow, factory or pneumatic air, pitot tubes, air speed and other industrial or aerospace applications requiring a very rugged wet/dry transducer. The solid state silicon core will provide long, reliable service life with excellent long term stability. To obtain their high accuracy and stability, the PX409 Series use state of the art digital mapping of the temperature, pressure and output performance of the silicon sensor in conjunction with a custom ASIC to provide dynamic thermal compensation across the temperature and pressure parameters.

COMMON SPECIFICATIONS

Accuracy: 0.08% BSL linearity, hysteresis and repeatability combined

Minimum Resistance Between Transducer Body and Any Wire: 100 MΩ

Operating Temperature:

mV/V and 5 to 10 Vdc Output: -45 to 121°C (-49 to 250°F)
mA Output: -45 to 115°C (-49 to 239°F)

Compensated Temperature Range:

10 inH₂O to 5 psi: -17 to 85°C (1 to 185°F)
15 to 1000 psi: -29 to 85°C (-20 to 185°F)

Thermal Accuracy: **Zero** **Span**
 % Span Shift over compensated temperature range

10 inH₂O to 5 psi: ±1.00% ±1.00%
15 to 1000 psi: ±0.50% ±0.50%

Pressure Cycles: 1 million minimum

Long Term Stability (1-Year): ±0.1% FS typical



Cable style.

High 0.08% Accuracy

Metric threads available, see omega.com/pxconfig

PX409-015DDUV, 15 psid range, 10 mV/V output, shown smaller than actual size.

Fast Delivery! Stock to 2 Weeks On Most Models

Five Electrical Termination Styles



PX459: M12 connector IP65 environmental rating.

PX459, M12 connector



IP67 environmental rating.

PX409, 2 m (6') cable.



IP65 environmental rating.

PX419, mini DIN.



IP67 environmental rating.

PX409C, conduit cable.



IP65 environmental rating.

PX429, twist-lock.

DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSDUCERS **B**



MICRO-MACHINED SILICON TRANSDUCERS

WET/DRY DIFFERENTIAL PRESSURE MODELS

Bandwidth: DC to 1 kHz typical

Response Time: <1 ms

CE Compliant: Meets EN61326-1: 2006 for industrial locations

Shock: 50 g, 11 mS half sine, vertical and horizontal axis

Vibration: 5-2000-5 Hz, 30 minute cycle, Curve L, Mil-Spec 810 figure 514-2-2, vertical and horizontal axis

Media Compatibility:

High Side: All fluids and gases compatible with 316L SS

Low Side: Clean, dry, non-ionic gases

Line/Static Pressure: 500 psi maximum applied to both sides simultaneously

Proof Pressure (Differential):

10 inH₂O range = 10 times range

1 psi range = 6 times range

2.5 to 750 psi ranges = 4 times range

1000 psi range = 3 times range

Hi Side Containment Pressure (Differential):

Ranges 10 inH₂O to 5 psi: to 1000 psi

Ranges 15 to 1000 psi: to 3000 psi

Pressure Ports: 1/4 NPT male

Electrical Terminations:

PX409: 2 m (6') cable

PX409C: 2 m (6') cable with 1/2 NPT conduit thread

PX419: mini DIN (mating connector included)

PX429: Twist-lock (mating connector sold separately)

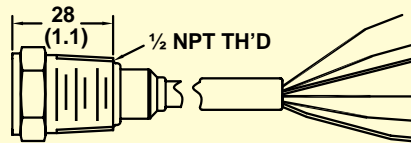
PX429 Mating Connector: PT06F10-6S

PX459: M12 connector

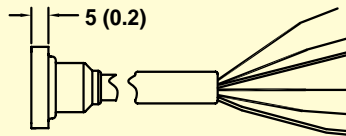
Weight: 200 g (7 oz) maximum

Dimensions: mm (inch)

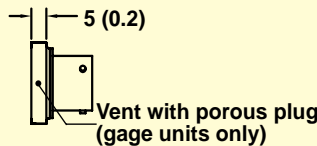
Conduit backend PX409C



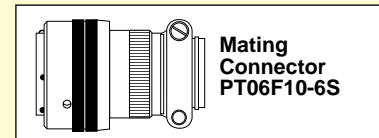
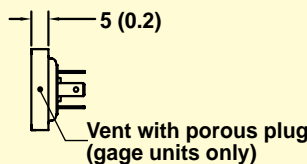
Integral cable backend PX409



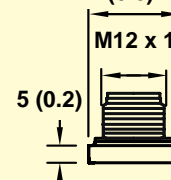
Twist-lock backend PX429



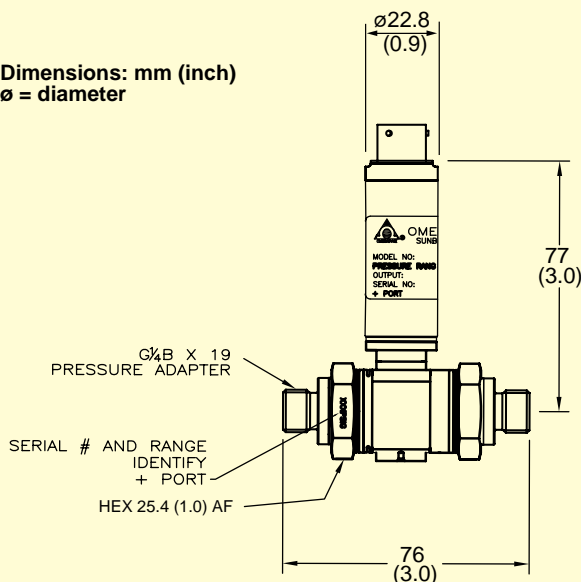
mini DIN backend PX419



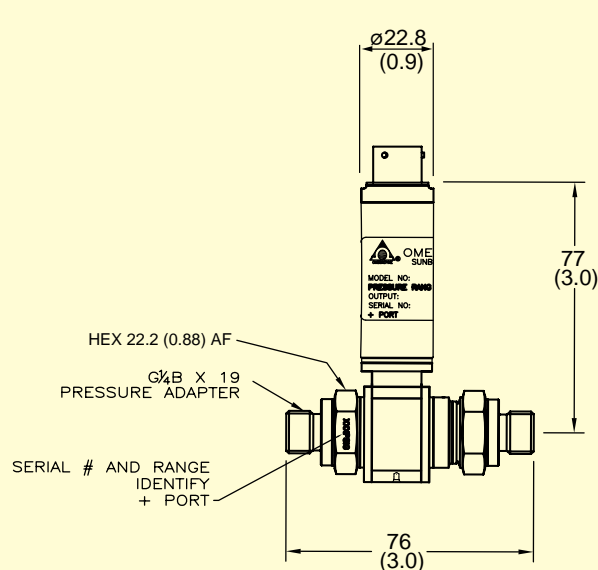
M12 connector backend PX459
Ø 20.2 (0.8)



Dimensions: mm (inch)
Ø = diameter



1 BAR AND BELOW



2 BAR AND ABOVE

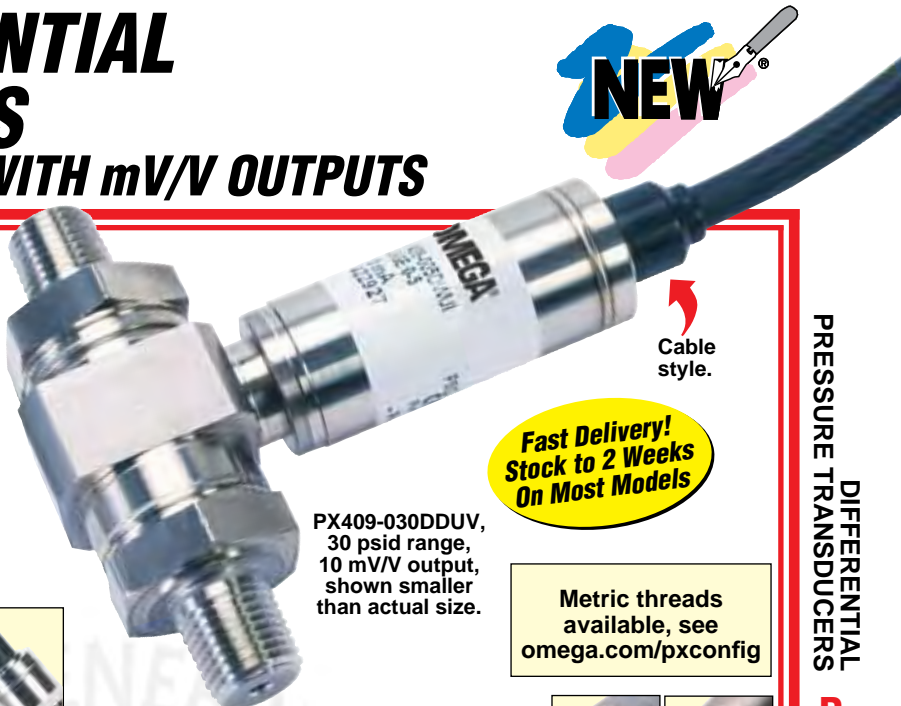
WET/DRY DIFFERENTIAL PRESSURE MODELS

UNI-DIRECTIONAL RANGES WITH mV/V OUTPUTS



UNI-DIRECTIONAL mV/V SPECIFICATIONS

- Output: 10 mV/V ratiometric
- Supply Voltage: 5 to 10 Vdc
- Current Draw: 5 mA @ 10 Vdc
- Input Impedance: 1000 to 5000 Ω
- Output Impedance: 5000 Ω \pm 10% typical
- Zero Balance:
 - Ranges \leq 2.5psi: \pm 1% typical (2% maximum)
 - Ranges $>$ 2.5psi: \pm 0.5% typical (1% maximum)
- Span Setting:
 - Ranges \leq 2.5psi: \pm 1% typical (2% maximum)
 - Ranges $>$ 2.5psi: \pm 0.5% typical (1% maximum)



Cable style.

Fast Delivery!
Stock to 2 Weeks
On Most Models

PX409-030DDUV,
30 psid range,
10 mV/V output,
shown smaller
than actual size.

Metric threads
available, see
omega.com/pxconfig

DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSDUCERS **B**

CABLE TERMINATION*

To Order Visit omega.com/px409-wddif for Pricing and Details

10 mV/V OUTPUT, 1/4 NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX409-10WDDUV
0 to 1 psi	70 mbar	PX409-001DDUV
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX409-2.5DDUV
0 to 5 psi	350 mbar	PX409-005DDUV
0 to 15 psi	1 bar	PX409-015DDUV
0 to 30 psi	2 bar	PX409-030DDUV
0 to 50 psi	3.5 bar	PX409-050DDUV
0 to 100 psi	7 bar	PX409-100DDUV
0 to 150 psi	10 bar	PX409-150DDUV
0 to 250 psi	17.5 bar	PX409-250DDUV
0 to 500 psi	35 bar	PX409-500DDUV
0 to 750 psi	50 bar	PX409-750DDUV
0 to 1000 psi	70 bar	PX409-1.0KDDUV



M12 or TWIST-LOCK TERMINATION

10 mV/V OUTPUT, 1/4 NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX4[*]9-10WDDUV
0 to 1 psi	70 mbar	PX4[*]9-001DDUV
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX4[*]9-2.5DDUV
0 to 5 psi	350 mbar	PX4[*]9-005DDUV
0 to 15 psi	1 bar	PX4[*]9-015DDUV
0 to 30 psi	2 bar	PX4[*]9-030DDUV
0 to 50 psi	3.5 bar	PX4[*]9-050DDUV
0 to 100 psi	7 bar	PX4[*]9-100DDUV
0 to 150 psi	10 bar	PX4[*]9-150DDUV
0 to 250 psi	17.5 bar	PX4[*]9-250DDUV
0 to 500 psi	35 bar	PX4[*]9-500DDUV
0 to 750 psi	50 bar	PX4[*]9-750DDUV
0 to 1000 psi	70 bar	PX4[*]9-1.0KDDUV



* To order conduit fitting backend change model number from "PX409" to "PX409C", no additional cost.



MINI DIN TERMINATION

10 mV/V OUTPUT, 1/4 NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX419-10WDDUV
0 to 1 psi	70 mbar	PX419-001DDUV
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX419-2.5DDUV
0 to 5 psi	350 mbar	PX419-005DDUV
0 to 15 psi	1 bar	PX419-015DDUV
0 to 30 psi	2 bar	PX419-030DDUV
0 to 50 psi	3.5 bar	PX419-050DDUV
0 to 100 psi	7 bar	PX419-100DDUV
0 to 150 psi	10 bar	PX419-150DDUV
0 to 250 psi	17.5 bar	PX419-250DDUV
0 to 500 psi	35 bar	PX419-500DDUV
0 to 750 psi	50 bar	PX419-750DDUV
0 to 1000 psi	70 bar	PX419-1.0KDDUV

Comes complete with 5-point NIST traceable calibration certificate.
[*] Enter "5" for PX459 M12 connector or "2" for PX429 twist lock connector (mating PX429 connector sold separately, PT06F10-6S).

Ordering Examples: PX409C-100DDUV, 0 to 100 psi uni-directional wet/dry differential pressure range, 10 mV/V output, 0.08% accuracy, 1/4 NPT fitting, 2 m (6') cable with 1/2 NPT conduit fitting.

PX419-015DDUV, 0 to 15 psi uni-directional wet/dry differential pressure range, 10 mV/V output, 0.08% accuracy, 1/4 NPT fittings, mini DIN connector.

PX429-10WDDUV, 0 to 10 inH₂O uni-directional wet/dry differential pressure range, 10 mV/V output, 0.08% accuracy, 1/4 NPT fittings, twist-lock connector plus PT06F10-6S, mating connector.

CONNECTIONS—mV/V OUTPUT

PX429 TWIST-LOCK	PX419 MINI DIN	PX409 CABLE	
Pin A	+EXC	Pin 1 +EXC	Red +EXC
Pin B	-EXC	Pin 2 -EXC	Black -EXC
Pin C	+SIG	Pin 3 +SIG	White +SIG
Pin D	-SIG	Pin 4 -SIG	Green -SIG
Pin E	No Connection		
Pin F	No Connection		



WET/DRY DIFFERENTIAL PRESSURE MODELS

UNI-DIRECTIONAL RANGES WITH 0 to 5 Vdc OUTPUTS

UNI-DIRECTIONAL VOLTAGE OUTPUT SPECIFICATIONS

Output Voltage/Supply Voltage: 0 to 5 Vdc/
10 to 30 Vdc; 0 to 10 Vdc/15 to 30 Vdc
(change "5V" to "10V" in model number)

Current Draw: 10 mA maximum

Maximum Current Output: 2 mA (= 2500 Ω
minimum load resistance)

Output Impedance: 100 Ω

Zero Balance:

Ranges > 2.5psi: ±0.5% typical (1% maximum)

Ranges ≤ 2.5psi: ±1% typical (2% maximum)

Span Setting:

Ranges > 2.5psi: ±0.5% typical (1% maximum)

Ranges ≤ 2.5psi: ±1% typical (2% maximum)

CABLE TERMINATION*

**To Order Visit omega.com/px409-wddif
for Pricing and Details**

0 to 5 Vdc OUTPUT, ¼ NPT MALE FITTINGS

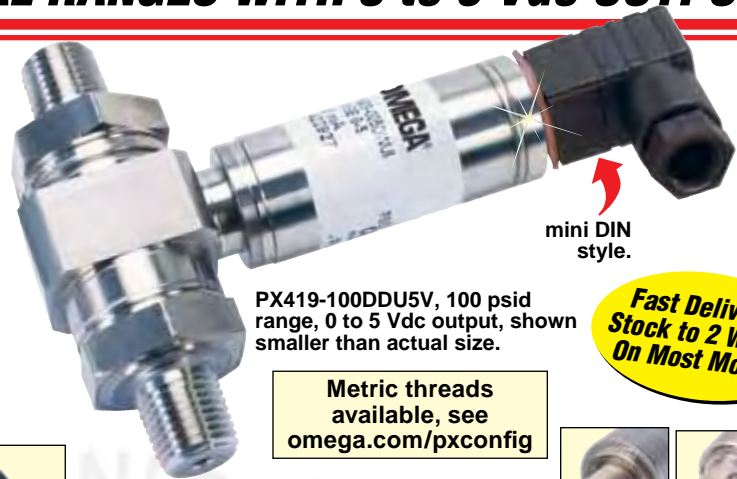
RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX409-10WDDU5V
0 to 1 psi	70 mbar	PX409-001DDU5V
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX409-2.5DDU5V
0 to 5 psi	350 mbar	PX409-005DDU5V
0 to 15 psi	1 bar	PX409-015DDU5V
0 to 30 psi	2 bar	PX409-030DDU5V
0 to 50 psi	3.5 bar	PX409-050DDU5V
0 to 100 psi	7 bar	PX409-100DDU5V
0 to 150 psi	10 bar	PX409-150DDU5V
0 to 250 psi	17.5 bar	PX409-250DDU5V
0 to 500 psi	35 bar	PX409-500DDU5V
0 to 750 psi	50 bar	PX409-750DDU5V
0 to 1000 psi	70 bar	PX409-1.0KDDU5V

* To order conduit fitting backend change model number from "PX409" to "PX409C", no additional cost.

MINI DIN TERMINATION

0 to 5 Vdc OUTPUT, ¼ NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX419-10WDDU5V
0 to 1 psi	70 mbar	PX419-001DDU5V
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX419-2.5DDU5V
0 to 5 psi	350 mbar	PX419-005DDU5V
0 to 15 psi	1 bar	PX419-015DDU5V
0 to 30 psi	2 bar	PX419-030DDU5V
0 to 50 psi	3.5 bar	PX419-050DDU5V
0 to 100 psi	7 bar	PX419-100DDU5V
0 to 150 psi	10 bar	PX419-150DDU5V
0 to 250 psi	17.5 bar	PX419-250DDU5V
0 to 500 psi	35 bar	PX419-500DDU5V
0 to 750 psi	50 bar	PX419-750DDU5V
0 to 1000 psi	70 bar	PX419-1.0KDDU5V



PX419-100DDU5V, 100 psid range, 0 to 5 Vdc output, shown smaller than actual size.

Metric threads available, see omega.com/pxconfig

**Fast Delivery!
Stock to 2 Weeks
On Most Models**

M12 or TWIST-LOCK TERMINATION

0 to 5 Vdc OUTPUT, ¼ NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX4[*]9-10WDDU5V
0 to 1 psi	70 mbar	PX4[*]9-001DDU5V
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX4[*]9-2.5DDU5V
0 to 5 psi	350 mbar	PX4[*]9-005DDU5V
0 to 15 psi	1 bar	PX4[*]9-015DDU5V
0 to 30 psi	2 bar	PX4[*]9-030DDU5V
0 to 50 psi	3.5 bar	PX4[*]9-050DDU5V
0 to 100 psi	7 bar	PX4[*]9-100DDU5V
0 to 150 psi	10 bar	PX4[*]9-150DDU5V
0 to 250 psi	17.5 bar	PX4[*]9-250DDU5V
0 to 500 psi	35 bar	PX4[*]9-500DDU5V
0 to 750 psi	50 bar	PX4[*]9-750DDU5V
0 to 1000 psi	70 bar	PX4[*]9-1.0KDDU5V

Comes complete with 5-point NIST traceable calibration certificate.

[*] Enter "5" for PX459 M12 connector or "2" for PX429 twist lock connector (mating PX429 connector sold separately).

Note: To order 0 to 10 Vdc output, change "5V" to "10V" in model number, no additional cost.

Ordering Examples: PX409C-100DDU10V, 0 to 100 psi uni-directional wet/dry differential pressure range, 0 to 10 Vdc output, 0.08% accuracy, ¼ NPT fitting, 2 m (6') cable with ½ NPT conduit fitting.

PX419-015DDU5V, 0 to 15 psi uni-directional wet/dry differential pressure range, 0 to 5 Vdc output, 0.08% accuracy, ¼ NPT fittings, mini DIN connector.

PX429-10WDDU5V, 0 to 10 inH₂O uni-directional wet/dry differential pressure range, 0 to 5 Vdc output, 0.08% accuracy, ¼ NPT fittings, twist-lock connector plus PT06F10-S6, mating connector.

CONNECTIONS—VOLTAGE OUTPUT

PX429 TWIST-LOCK		PX419 MINI DIN		PX409 CABLE	
Pin A	+EXC	Pin 1	+EXC	Red	+EXC
Pin B	-COM	Pin 2	-COM	Black	-EXC
Pin C	+SIG	Pin 3	+SIG	White	+SIG
Pin D	No Conn	Pin 4	No Conn	Green	No Conn
Pin E	No Connection				
Pin F	No Connection				

WET/DRY DIFFERENTIAL PRESSURE MODELS

UNI-DIRECTIONAL RANGES WITH 4 to 20 mA OUTPUTS



DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSDUCERS

UNI-DIRECTIONAL mA SPECIFICATIONS

Output: 4 to 20 mA

Supply Voltage: 9 to 30 Vdc;
[9 to 20 Vdc above 105°C (229°F)]

Max Loop Resistance: (Vs-9) x 50 Ω

Zero Balance:

Ranges > 2.5psi: ±0.5% typical (1% maximum)

Ranges ≤ 2.5psi: ±1% typical (2% maximum)

Span Setting:

Ranges > 2.5psi: ±0.5% typical (1% maximum)

Ranges ≤ 2.5psi: ±1% typical (2% maximum)

Fast Delivery!
Stock to 2 Weeks
On Most Models



Twist-lock style.

PX429-005DDUI,
5 psid range, 4 to 20 mA
output, shown smaller
than actual size.

Metric threads
available, see
omega.com/pxconfig

CABLE TERMINATION*

To Order Visit omega.com/px409-wddif
for Pricing and Details

4 to 20 mA OUTPUT, 1/4 NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX409-10WDDUI
0 to 1 psi	70 mbar	PX409-001DDUI
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX409-2.5DDUI
0 to 5 psi	350 mbar	PX409-005DDUI
0 to 15 psi	1 bar	PX409-015DDUI
0 to 30 psi	2 bar	PX409-030DDUI
0 to 50 psi	3.5 bar	PX409-050DDUI
0 to 100 psi	7 bar	PX409-100DDUI
0 to 150 psi	10 bar	PX409-150DDUI
0 to 250 psi	17.5 bar	PX409-250DDUI
0 to 500 psi	35 bar	PX409-500DDUI
0 to 750 psi	50 bar	PX409-750DDUI
0 to 1000 psi	70 bar	PX409-1.0KDDUI



M12 or TWIST-LOCK TERMINATION

4 to 20 mA OUTPUT, 1/4 NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX4[*]9-10WDDUI
0 to 1 psi	70 mbar	PX4[*]9-001DDUI
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX4[*]9-2.5DDUI
0 to 5 psi	350 mbar	PX4[*]9-005DDUI
0 to 15 psi	1 bar	PX4[*]9-015DDUI
0 to 30 psi	2 bar	PX4[*]9-030DDUI
0 to 50 psi	3.5 bar	PX4[*]9-050DDUI
0 to 100 psi	7 bar	PX4[*]9-100DDUI
0 to 150 psi	10 bar	PX4[*]9-150DDUI
0 to 250 psi	17.5 bar	PX4[*]9-250DDUI
0 to 500 psi	35 bar	PX4[*]9-500DDUI
0 to 750 psi	50 bar	PX4[*]9-750DDUI
0 to 1000 psi	70 bar	PX4[*]9-1.0KDDUI



* To order conduit fitting backend change model number from "PX409" to "PX409C", no additional cost.



MINI DIN TERMINATION

4 to 20 mA OUTPUT, 1/4 NPT MALE FITTINGS

RANGE	METRIC	MODEL NO.
0 to 10 inH ₂ O	25 mbar	PX419-10WDDUI
0 to 1 psi	70 mbar	PX419-001DDUI
0 to 2.5 psi	170 mbar	PX419-2.5DDUI
0 to 5 psi	350 mbar	PX419-005DDUI
0 to 15 psi	1 bar	PX419-015DDUI
0 to 30 psi	2 bar	PX419-030DDUI
0 to 50 psi	3.5 bar	PX419-050DDUI
0 to 100 psi	7 bar	PX419-100DDUI
0 to 150 psi	10 bar	PX419-150DDUI
0 to 250 psi	17.5 bar	PX419-250DDUI
0 to 500 psi	35 bar	PX419-500DDUI
0 to 750 psi	50 bar	PX419-750DDUI
0 to 1000 psi	70 bar	PX419-1.0KDDUI

Comes complete with 5-point NIST traceable calibration certificate.

[*] Enter "5" for PX459 M12 connector or "2" for PX429 twist lock connector (mating PX429 connector sold separately).

Ordering Examples: PX409C-100DDUI, 0 to 100 psi uni-directional wet/dry differential pressure range, 4 to 20 mA output, 0.08% accuracy, 1/4 NPT fitting, 2 m (6') cable with 1/2 NPT conduit fitting.

PX419-015DDUI, 0 to 15 psi uni-directional wet/dry differential pressure range, 4 to 20 mA output, 0.08% accuracy, 1/4 NPT fittings, mini DIN connector.

PX429-10WDDUI, 0 to 10 inH₂O uni-directional wet/dry differential pressure range, 4 to 20 mA output, 0.08% accuracy, 1/4 NPT fittings, twist-lock connector plus PT06F10-6S, mating connector.

CONNECTIONS—CURRENT OUTPUT

PX429 TWIST-LOCK		PX419 MINI DIN		PX409 CABLE	
Pin A	+SUP	Pin 1	+SUP	Red	+SUP
Pin B	-SUP	Pin 2	-SUP	Black	-SUP
Pin C	No Conn	Pin 3	No Conn	White	No Conn
Pin D	No Conn	Pin 4	No Conn	Green	No Conn
Pin E	No Connection				
Pin F	No Connection				

ANEXO 7: Hoja de calibración del sensor de presión diferencial en la tubería



OMEGA ENGINEERING INC. CERTIFICATE OF CALIBRATION

Model Number: PX429-030DDUI
Serial Number: 409131
Date: 8/27/2014
Job: R10452

Capacity: 30.00 PSID
Excitation: 24.00 Vdc
Technician: GRS

Pressure Connection: 1/4-18 NPT Male

WIRING CODE

Electrical Connection: PIN A = + SUPPLY
PIN B = - SUPPLY
PIN C = N/C
PIN D = N/C
PIN E&F = SPARE N/C

CALIBRATION WORKSHEET

NOTES

Pressure PSID	OUTPUT mA
0.00	3.946
15.00	11.952
30.00	19.959
15.00	11.952
0.00	3.946

NIST Traceable Number(s): C-1954, C-1330

Omega Eng. Inc., certifies that the above instrumentation has been calibrated and tested to meet or to exceed the published specifications. This calibration was performed using instrumentation and standards that are traceable to the National Institute of Standards and Technology. This document also ensures that all testing performed complies with MIL-STD 45662-A, ISO 10012-1, and ANSI/NCSL Z540-1-1994 requirements. After Final Calibration our products are stored in an environmentally controlled stock room and are considered in bonded storage. Depending on environmental conditions and severity of use, factory calibration is recommended every one to three years after the initial service installation date.

Bruce Lott

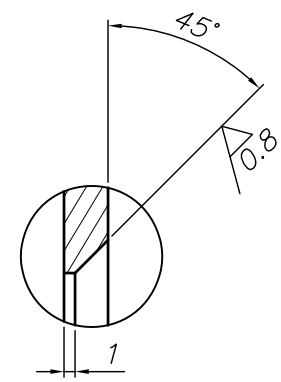
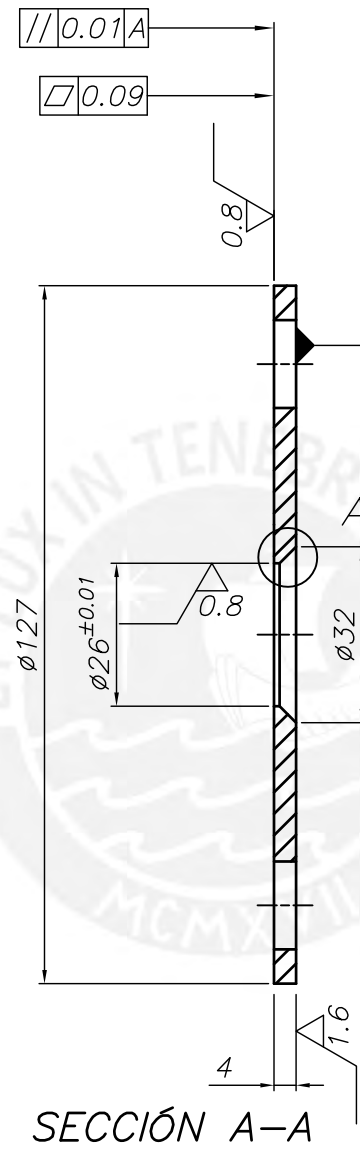
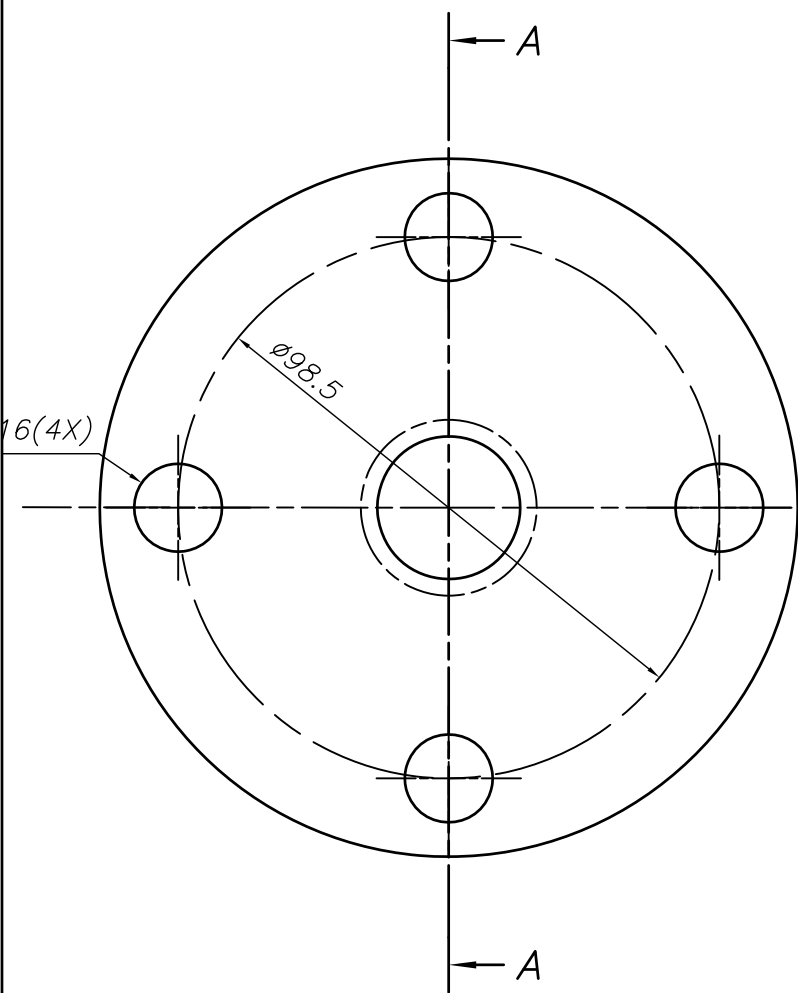
Accepted and Certified By

8/27/2014
Date

Omega Engineering Inc., One Omega Drive, Stamford, CT 06907
<http://www.omega.com> email: info@omega.com phone (800) 826-6342



ANEXO 8: Plano de fabricación de la placa orificio



DETALLE A - ESCALA (2:1)

EN LA CARA DERECHA DE LA SECCIÓN A-A,
 COLOCAR LA SIGUIENTE INSCRIPCIÓN:
 $d = 26 \text{ mm}$
 ALTURA DE LETRA (REFERENCIAL): 10 mm.
 UBICACIÓN: 65 mm RADIALMENTE DEL
 CENTRO DE LA PLACA.

NOTA: 04 AGUJEROS PASANTES DE 16 MM
 IGUALMENTE ESPACIADOS A 90°.

SECCIÓN A-A

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

ACABADO SUPERFICIAL 3,2 (0,8, 1,6)	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 GRADO MEDIO	MATERIAL BRONCE
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU SECCIÓN INGENIERÍA MECÁNICA - LABORATORIO DE ENERGÍA		
METODO DE PROYECCION 	PLACA ORIFICIO	ESCALA 1:1
20087090	JOEL LÓPEZ	FECHA: 05/02/16
		LAMINA: PL1-A3

ANEXO 9: Hoja técnica del sensor de presión diferencial en la placa orificio



General Specifications

EJX110A Differential Pressure Transmitter



GS 01C25B01-01EN

[Style: S3]

The high performance differential pressure transmitter EJX110A features single crystal silicon resonant sensor and is suitable to measure liquid, gas, or steam flow as well as liquid level, density and pressure. EJX110A outputs a 4 to 20 mA DC signal corresponding to the measured differential pressure. Its highly accurate and stable sensor can also measure the static pressure which can be shown on the integral indicator or remotely monitored via BRAIN or HART communications. Other key features include quick response, remote set-up using communications, diagnostics and optional status output for pressure high/low alarm. The multi-sensing technology provides the advanced diagnostic function to detect such abnormalities as an impulse line blockage or heat trace breakage. FOUNDATION Fieldbus and PROFIBUS PA protocol types are also available. All EJX series models in their standard configuration, with the exception of the Fieldbus and PROFIBUS types, are certified by TÜV as complying with SIL 2 for safety requirement.



■ STANDARD SPECIFICATIONS

Refer to GS 01C25T02-01EN for Fieldbus communication type and GS 01C25T04-01EN for PROFIBUS PA communication type for the items marked with “∅.”

□ SPAN AND RANGE LIMITS

Measurement Span/Range	kPa	inH ₂ O (D1)	mbar (D3)	mmH ₂ O (D4)	
F*	Span	0.1 to 5	0.4 to 20	1 to 50	10 to 500
	Range	-5 to 5	-20 to 20	-50 to 50	-500 to 500
L*	Span	0.1 to 10	0.4 to 40	1 to 100	10 to 1000
	Range	-10 to 10	-40 to 40	-100 to 100	-1000 to 1000
M	Span	0.5 to 100	2 to 400	5 to 1000	50 to 10000
	Range	-100 to 100	-400 to 400	-1000 to 1000	-10000 to 10000
H	Span	2.5 to 500	10 to 2000	25 to 5000	0.025 to 5 kgf/cm ²
	Range	-500 to 500	-2000 to 2000	-5000 to 5000	-5 to 5 kgf/cm ²
V	Span	0.07 to 14 MPa	10 to 2000 psi	0.7 to 140 bar	0.7 to 140 kgf/cm ²
	Range	-0.5 to 14 MPa	-71 to 2000	-5 to 140 bar	-5 to 140 kgf/cm ²

*: F capsule is applicable for wetted parts material code S.
L capsule is applicable for wetted parts material code other than S and L.

□ PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Zero-based calibrated span, linear output, wetted parts material code S and silicone oil, unless otherwise mentioned.

For Fieldbus and PROFIBUS PA communication types, use calibrated range instead of span in the following specifications.

Specification Conformance

EJX series ensures specification conformance to at least $\pm 3\sigma$.

Reference Accuracy of Calibrated Span

(includes terminal-based linearity, hysteresis, and repeatability)

Measurement span	F	
Reference accuracy	X ≤ span	±0.04% of Span
	X > span	±(0.015+0.01 URL/span)% of Span
X	2 kPa (8 inH ₂ O)	
URL (upper range limit)	5 kPa (20 inH ₂ O)	

Measurement span	M	
Reference accuracy	X ≤ span	±0.04% of Span
	X > span	±(0.002+0.0019 URL/span)% of Span
X	5 kPa (20 inH ₂ O)	
URL (upper range limit)	100 kPa (400 inH ₂ O)	

Measurement span	H	
Reference accuracy	X ≤ span	±0.04% of Span
	X > span	±(0.005+0.0049 URL/span)% of Span
X	70 kPa (280 inH ₂ O)	
URL (upper range limit)	500 kPa (2000 inH ₂ O)	

Measurement span		V
Reference accuracy	X ≤ span	±0.04% of Span
	X > span	±(0.005+0.00125 URL/span)% of Span
X		500 kPa (2000 inH ₂ O)
URL (upper range limit)		14 MPa (2000 psi)

[When /HAC is specified]

Measurement span		M
Reference accuracy	X ≤ span	±0.025% of Span
	X > span	±(0.015+0.001 URL/Span) % of Span
X		10 kPa (40 inH ₂ O)
URL (Upper Range Limit)		100 kPa (400 inH ₂ O)

Measurement span		H
Reference accuracy	X ≤ span	±0.025% of Span
	X > span	±(0.0035 URL/Span) % of Span
X		70 kPa (280 inH ₂ O)
URL (Upper Range Limit)		500 kPa (2000 inH ₂ O)

Measurement span		V
Reference accuracy	X ≤ span	±0.025% of Span
	X > span	±(0.004+0.00075 URL/Span) % of Span
X		500 kPa (2000 inH ₂ O)
URL (Upper Range Limit)		14 MPa (2000 psi)

Square Root Output Accuracy

The square root accuracy is a percent of flow span.

Output	Accuracy
50% or Greater	Same as reference accuracy
50% to Dropout point	$\frac{\text{Reference accuracy} \times 50}{\text{Square root output (\%)}}$

Ambient Temperature Effects per 28°C (50°F) Change

Capsule	Effect
F	±(0.055% Span + 0.18% URL)
M	±(0.04% Span + 0.009% URL)
H, V	±(0.04% Span + 0.0125% URL)

● Total Probable Error (M capsule)

±0.12% of Span @1:1 to 5:1 Rangedown
 Total probable error, known as a measure of the total performance of the transmitters under the condition of fixed line pressure.

$$\text{Total Probable Error} = \pm \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2}$$

- E1: Reference Accuracy of Calibrated Span
- E2: Ambient Temperature Effects per 28°C change
- E3: Static Span Effects per 6.9 MPa change

● Total Accuracy (M capsule)

±0.12% of Span @1:1 Rangedown
 ±0.25% of Span @ 5:1 Rangedown
 Total accuracy is a comprehensive measure of transmitter total performance, covering all major factors in actual installation, that cause errors in measurement.

As a standard measure, YOKOGAWA uses this to evaluate transmitter performance.

$$\text{Total Accuracy} = \pm \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + (E_3 + E_4)^2 + E_5^2}$$

- E1: Reference Accuracy of Calibrated Span
- E2: Ambient Temperature Effects per 28°C change
- E3: Static Span Effects per 6.9 MPa change
- E4: Static Zero Effects per 6.9 MPa change
- E5: Overpressure Effects upto overpressure 25MPa

Not only a day-to-day changes in temperature can affect the measurement and lead to unnoticed errors; fluctuation of line pressure, incorrect operation of three/five valve manifold leading to over-pressure events, and other phenomena can have the similar result. Total Accuracy factors in such changes and errors and provides much comprehensive and practical determination of how a transmitter will perform under actual plant operation.

Static Pressure Effects per 6.9 MPa (1000 psi) Change

Span Effects

F, M, H and V capsules
 ±0.075% of span

Effect on Zero

Capsule	Effect
F	±0.1% URL
M	±0.02% URL
H, V	±0.028% URL

Overpressure Effects

Overpressure condition: up to maximum working pressure
 M, H and V capsules, except for gold-plated diaphragm.
 ±0.03% of URL

Stability (All normal operating condition, including overpressure effects)

M, H and V capsules
 ±0.1% of URL per 15 years
 F capsule
 ±0.1% of URL per one year

Power Supply Effects(Output signal code D, E and J)

±0.005 % per Volt (from 21.6 to 32 V DC, 350Ω)

Vibration Effects

Amplifier housing code 1 and 3:

Less than 0.1% of URL when tested per the requirements of IEC60770-1 field or pipeline with high vibration level (10-60 Hz, 0.21 mm displacement/60-2000 Hz 3 g)

Amplifier housing code 2:

Less than ±0.1% of URL when tested per the requirements of IEC60770-1 field with general application or pipeline with low vibration level (10-60 Hz 0.15mm displacement /60-500 Hz 2g)

Mounting Position Effects

Rotation in diaphragm plane has no effect. Tilting up to 90 degree will cause zero shift up to 0.4 kPa (1.6 inH₂O) which can be corrected by the zero adjustment.

Response Time (Differential pressure) “◇”

90 ms for Wetted Parts material code S and L, except for Measuring span code F. 150 ms for Wetted Parts Material Code H, M, T, A, B, D and W or Measuring span code F.

When amplifier damping is set to zero and including dead time of 45 ms (nominal)

Static Pressure Signal Range and Accuracy (For monitoring via communication or on indicator. Includes terminal-based linearity, hysteresis, and repeatability)

Range

Upper Range Value and Lower Range Value of the static pressure can be set in the range between 0 and Maximum Working Pressure(MWP). The upper range value must be greater than the lower range value. Minimum setting span is 0.5 MPa(73 psi). Measuring either the pressure of high pressure side or low pressure side is user-selectable.

Accuracy

Absolute Pressure

1 MPa or higher: ±0.2% of span

Less than 1 MPa: ±0.2%×(1 MPa/span) of span

Gauge Pressure Reference

Gauge pressure reference is 1013 hPa (1 atm)

Note: Gauge pressure variable is based on the above fixed reference and thus subject to be affected by the change of atmospheric pressure.

□ **FUNCTIONAL SPECIFICATIONS**

Output “◇”

Two wire 4 to 20 mA DC output with digital communications, linear or square root programmable. BRAIN or HART FSK protocol are superimposed on the 4 to 20 mA signal.

Output range: 3.6 mA to 21.6 mA

Output limits conforming to NAMUR NE43 can be pre-set by option code C2 or C3.

Failure Alarm (Output signal code D, E and J)

Analog output status at CPU failure and hardware error;

Up-scale: 110%, 21.6 mA DC or more (standard)

Down-scale: -5%, 3.2 mA DC or less

Analog output status at process abnormality (Option code /DG6);

The result of process abnormality detected by the advanced diagnostic function can be reflected to an analog alert status. The following three setting modes are available.

		Mode		
		Burnout	Fall back	Off
Standard		110%, 21.6mA or more	Holds to a specified value within the output range from 3.6mA to 21.6mA	Normal output (No analog output alarm)
Option Code	/C1	-2.5%, 3.6mA or less		
	/C2	-1.25%, 3.8mA or less		
	/C3	103.1%, 20.5mA or more		

Damping Time Constant (1st order)

Amplifier damping time constant is adjustable from 0.00 to 100.00 s by software and added to response time.

Note: For BRAIN protocol type, when amplifier software damping is set to less than 0.5 s, communication may occasionally be unavailable during the operation, especially while output changes dynamically. The default setting of damping ensures stable communication.

Update Period “◇”

Differential pressure: 45 ms

Static pressure: 360 ms

Zero Adjustment Limits

Zero can be fully elevated or suppressed, within the lower and upper range limits of the capsule.

External Zero Adjustment

External zero is continuously adjustable with 0.01% incremental resolution of span. Re-range can be done locally using the digital indicator with rangesetting switch.

Integral Indicator (LCD display, optional) “◇”

5-digit numerical display, 6-digit unit display and bar graph.

The indicator is configurable to display one or up to four of the following variables periodically.; Measured differential pressure, differential pressure in %, scaled differential pressure, measured static pressure. See also “Factory Setting.”

Local Parameter Setting (Output signal code D, E, and J)

Parameter configuration by the external zero adjustment screw and push button (Integral indicator code E) offers easy and quick setup for parameters of Tag number, Unit, LRV, URV, Damping, Output mode (linear/square root), Display out 1, and Re-range by applying actual pressure (LRV/URV).

Burst Pressure Limits

69 MPa (10,000 psi) for wetted parts material S and L, except for Measurement span F.

47 MPa (6,800 psi) for wetted parts material other than S and L, or Measurement span F.

Self Diagnostics

CPU failure, hardware failure, configuration error, and over-range error for differential pressure, static pressure and capsule temperature.

User-configurable process high/low alarm for differential pressure and static pressure is also available, and its status can be output when optional status output is specified.

Advanced Diagnostics (optional) “◇”

Applicable for Output signal code E, J and F.

• Impulse line blockage detection

The impulse line condition can be calculated and detected by extracting the fluctuation component from the differential pressure and static pressure signals. The EJX110A detects the impulse line abnormality particularly which side of impulse line is plugged.

• Heat trace monitoring

The change of the flange temperature calculated by using the two temperature sensors built in the EJX enables to detect the heat trace breakage or the abnormal temperature due to the failure.

Signal Characterizer (Output signal code D, E and J)

User-configurable 10-segment signal characterizer for 4 to 20 mA output.

Status Output (optional, output signal code D, E and J)

One transistor contact output (sink type) to output the status of user configurable high/low alarm for differential pressure/static pressure.

Contact rating: 30 V DC, 120 mA DC max.

Refer to ‘Terminal Configuration’ and ‘Wiring Example for Analog Output and Status Output.’

SIL Certification

EJX series transmitters except Fieldbus and PROFIBUS PA communication types are certified by TÜV in compliance with the following standards; IEC 61508: 2010; Part1 to Part 7 Functional Safety of Electrical/electronic/programmable electronic related systems; SIL 2 capability for single transmitter use, SIL 3 capability for dual transmitter use.

□ **NORMAL OPERATING CONDITION (Optional features or approval codes may affect limits.)**

Ambient Temperature Limits

- 40 to 85°C (-40 to 185°F)
- 30 to 80°C (-22 to 176°F) with LCD display

Process Temperature Limits

- 40 to 120°C (-40 to 248°F)

Ambient Humidity Limits

- 0 to 100% RH

Working Pressure Limits (Silicone oil)

Maximum Pressure Limits (MWP)

Capsule		MWP
F, L		16 MPa (2300 psi)
M, H, V	Wetted Parts Material: S and L	25 MPa (3600 psi)
	Wetted Parts Material: H, T, M, A, D, B and W	16 MPa (2300 psi)

Minimum Pressure Limit

See graph below

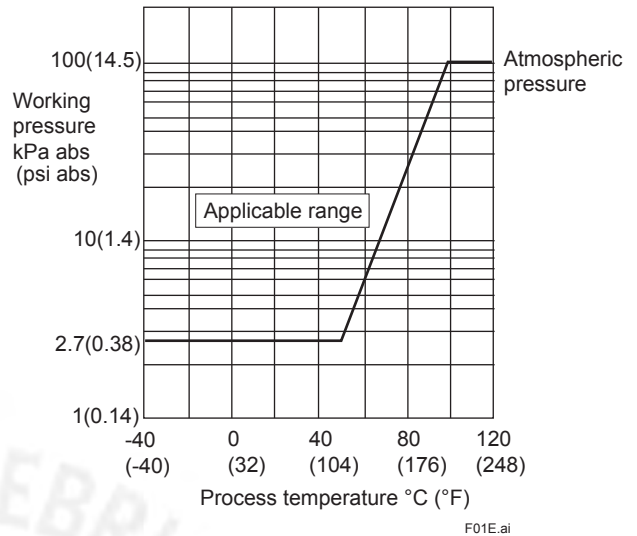


Figure 1. Working Pressure and Process Temperature

Supply & Load Requirements

(Output signal code D, E and J. Optional features or approval codes may affect electrical requirements.)

With 24 V DC supply, up to a 550Ω load can be used. See graph below.

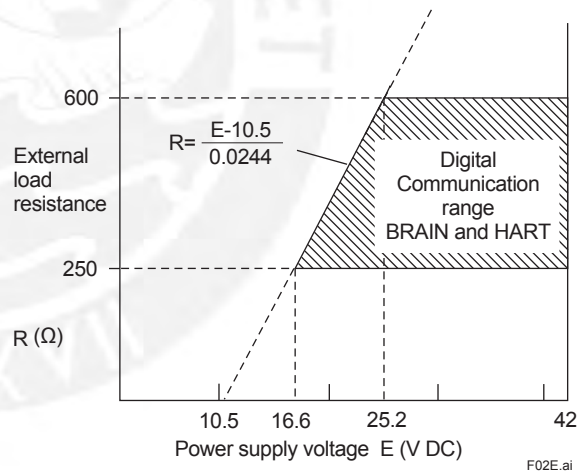


Figure 2. Relationship Between Power Supply Voltage and External Load Resistance

Supply Voltage “◇”

- 10.5 to 42 V DC for general use and flameproof type.
- 10.5 to 32 V DC for lightning protector (option code /A.)
- 10.5 to 30 V DC for intrinsically safe, type n, or nonincendive.
- Minimum voltage limited at 16.6 V DC for digital communications, BRAIN and HART

Load (Output signal code D, E and J)

- 0 to 1290Ω for operation
- 250 to 600Ω for digital communication

Communication Requirements “◇”

(Approval codes may affect electrical requirements.)

BRAIN**Communication Distance**

Up to 2 km (1.25 miles) when using CEV polyethylene-insulated PVC-sheathed cables. Communication distance varies depending on type of cable used.

Load Capacitance

0.22 µF or less

Load Inductance

3.3 mH or less

Input Impedance of communicating device

10 kΩ or more at 2.4 kHz.

EMC Conformity Standards

EN 61326-1 Class A, Table2

EN 61326-2-3

EN 61326-2-5 (for fieldbus)

European Pressure Equipment Directive 2014/68/EU

Sound Engineering Practice (for all capsules)

With option code /PE3 (for M, H and V capsules and wetted parts material code S.)



Category III, Module H, Type of Equipment: Pressure Accessory-Vessel, Type of Fluid: Liquid and Gas, Group of Fluid: 1 and 2

EU RoHS Directive

EN 50581

Safety Requirement Standards

EN 61010-1, C22.2 No.61010-1

- Installation category: I
(Anticipated transient overvoltage 330 V)
- Pollution degree: 2
- Indoor/Outdoor use

□ PHYSICAL SPECIFICATIONS**Wetted Parts Materials****Diaphragm, cover flange, process connector, capsule gasket, and vent/drain plug**

Refer to “MODEL AND SUFFIX CODES.”

Process connector gasket

PTFE Teflon

Fluorinated rubber for option code N2 and N3

Non-wetted Parts Materials**Bolting**

B7 carbon steel, 316L SST or 660 SST

Housing

- Low copper cast aluminum alloy
- Low copper cast aluminum alloy with corrosion resistance properties (copper content ≤ 0.03%, iron content ≤ 0.15%) (optional)
- ASTM CF-8M Stainless steel (optional)

Coating of housing

[for aluminum housing]

Urethane curing type polyester resin powder coating
Mint-green paint (Munsell 5.6BG 3.3/2.9 or its equivalent)

[for option code /P□ or /X2]

Epoxy and polyurethane resin solvent coating

Degrees of protection

IP66/IP67, Type 4X

Cover O-rings

Buna-N, fluoro-rubber (optional)

Name plate and tag

316 SST

Fill fluid

Silicone, fluorinated oil (optional)

Weight

[Installation code 7, 8 and 9]

2.8 kg (6.2 lb) for measurement span code M, H and V, wetted parts material code S and L without integral indicator, mounting bracket, and process connector.

3.7 kg (8.2 lb) for measurement span code F without integral indicator, mounting bracket, and process connector.

Add 1.5 kg (3.3lb) for Amplifier housing code 2.

Connections

Refer to “MODEL AND SUFFIX CODES.”

Process connection of cover flange: IEC61518

< Related Instruments >

FieldMate Versatile Device Management Wizard:

Refer to GS 01R01A01-01E.

BRAIN TERMINAL: Refer to GS 01C00A11-00E

Power Distributor: Refer to GS 01B04T01-02E or GS 01B04T02-02E

< Reference >

1. *DPharp EJX*™ is a registered trademark of Yokogawa Electric Corporation.
 2. FieldMate; Trademark of Yokogawa Electric Corporation.
 3. Teflon; Trademark of E.I. DuPont de Nemours & Co.
 4. Hastelloy; Trademark of Haynes International Inc.
 5. HART®: Registered trademark of the FieldComm Group.
 6. FOUNDATION Fieldbus; Trademark of the FieldComm Group.
 7. PROFIBUS; Registered trademark of Profibus Nutzerorganisation e.v., Karlsruhe, Germany.
- Other company names and product names used in this material are registered trademarks or trademarks of their respective owners.

MODEL AND SUFFIX CODES

Model	Suffix Codes	Description
EJX110A	.....	Differential pressure transmitter
Output signal	-D -E -J -F -G	4 to 20 mA DC with digital communication (BRAIN protocol) 4 to 20 mA DC with digital communication (HART 5 protocol) 4 to 20 mA DC with digital communication (HART 5/HART 7 protocol) (Refer to GS 01C25T01-01EN) Digital communication (FOUNDATION Fieldbus protocol, refer to GS 01C25T02-01EN) Digital communication (PROFIBUS PA protocol, refer to GS 01C25T04-01EN)
Measurement span (capsule)	F L M H V	0.1 to 5 kPa (0.4 to 20 inH ₂ O) (For Wetted parts material code S) 0.1 to 10 kPa (0.4 to 40 inH ₂ O) (For Wetted parts material code M, H, T, A, D, B and W) 0.5 to 100 kPa (2 to 400 inH ₂ O) 2.5 to 500 kPa (10 to 2000 inH ₂ O) 0.07 to 14 MPa (10 to 2000 psi)
Wetted parts material *1	<input type="checkbox"/>	Refer to "Wetted Parts Material" Table.
Process connections See the table in the next page for the codes for a diaphragm seal system.	0 1 2 3 4 5	without process connector (Rc1/4 female on the cover flanges) with Rc1/4 female process connector with Rc1/2 female process connector with 1/4 NPT female process connector with 1/2 NPT female process connector without process connector (1/4 NPT female on the cover flanges)
Bolts and nuts materia	J G C	B7 carbon steel 316L SST 660 SST
Installation	-7 -8 -9 -B -U	Vertical piping, left side high pressure, and process connection downside Horizontal piping and right side high pressure Horizontal piping and left side high pressure Bottom Process Connection, left side high pressure*2 Universal flange*2
Amplifier housing	1 3 2	Cast aluminum alloy Cast aluminum alloy with corrosion resistance properties*4 ASTM CF-8M stainless steel*5
Electrical connection	0 2 4 5 7 9 A C D	G1/2 female, one electrical connection without blind plugs 1/2 NPT female, two electrical connections without blind plugs M20 female, two electrical connections without blind plugs G1/2 female, two electrical connections and a blind plug*6 1/2 NPT female, two electrical connections and a blind plug*6 M20 female, two electrical connections and a blind plug*6 G1/2 female, two electrical connections and a SUS316 blind plug 1/2 NPT female, two electrical connections and a SUS316 blind plug M20 female, two electrical connections and a SUS316 blind plug
Integral indicator	D E N	Digital indicator*7 Digital indicator with the range setting switch (push button)*8 None
Mounting bracket	B D J K M N	304 SST 2-inch pipe mounting, flat type (for horizontal piping) 304 SST or SCS13A 2-inch pipe mounting, L type (for vertical piping) 316 SST 2-inch pipe mounting, flat type (for horizontal piping) 316 SST or SCS14A 2-inch pipe mounting, L type (for vertical piping) 316 SST or SCS14A 2-inch pipe mounting (for bottom process connection type) None
Optional Codes		<input type="checkbox"/> / Optional specification

The "▶" marks indicate the most typical selection for each specification.

*1: ⚠ Users must consider the characteristics of selected wetted parts material and the influence of process fluids. The use of inappropriate materials can result in the leakage of corrosive process fluids and cause injury to personnel and/or damage to plant facilities. It is also possible that the diaphragm itself can be damaged and that material from the broken diaphragm and the fill fluid can contaminate the user's process fluids.

Be very careful with highly corrosive process fluids such as hydrochloric acid, sulfuric acid, hydrogen sulfide, sodium hypochlorite, and high-temperature steam (150°C [302°F] or above). Contact Yokogawa for detailed information of the wetted parts material.

*2: Only applicable for Wetted parts material code S.

*3: Not applicable for measurement span code F.

*4: Not applicable for electrical connection code 0, 5, 7, 9 and A.

*5: Not applicable for electrical connection code 0, 5, 7 and 9.

*6: Material of a blind plug; aluminum alloy for code 5 and 9, and SUS304 for code 7.

*7: Not applicable for output signal code G.

*8: Not applicable for output signal code F.

Table. Wetted Parts Materials

Wetted parts material code	Cover flange and process connector	Capsule	Capsule gasket	Vent/Drain plug
S #	ASTM CF-8M *1	Hastelloy C-276 *2 (Diaphragm) F316L SST, 316L SST (Others)	Teflon-coated 316L SST	316 SST
L #	ASTM CF-3M *7	Hastelloy C-276 *2 (Diaphragm) F316L SST, 316L SST (Others)	Teflon-coated 316L SST	316L SST
H #	ASTM CF-8M *1	Hastelloy C-276 *2	PTFE Teflon	316 SST
M #	ASTM CF-8M *1	Monel	PTFE Teflon	316 SST
T	ASTM CF-8M *1	Tantalum	PTFE Teflon	316 SST
A #	Hastelloy C-276 equivalent *3	Hastelloy C-276 *2	PTFE Teflon	Hastelloy C-276 *2
D	Hastelloy C-276 equivalent *3	Tantalum	PTFE Teflon	Hastelloy C-276 *2
B #	Monel equivalent *4	Monel	PTFE Teflon	Monel
W #	Super Duplex SST equivalent *5	Hastelloy C-276 *2	PTFE Teflon	Super Duplex SST *6

*1: Cast version of 316 SST. Equivalent to SCS14A.

*2: Hastelloy C-276 or ASTM N10276.

*3: Indicated material is equivalent to ASTM CW-12MW.

*4: Indicated material is equivalent to ASTM M35-2.

*5: Indicated material is equivalent to ASTM A995 Grade5A.

*6: ASTM S32750 or EN 10272 1.4410.

*7: Cast version of 316L SST. Equivalent to SCS16A.

The #marks indicate the construction materials conform to NACE material recommendations per MR0175/ISO15156. Please refer to the latest standards for details. Selected materials also conform to NACE MR0103.

[Process Connections Code for Diaphragm Seal System]

The table below shows the codes dedicated for the combination with a diaphragm seal system. They are only available when the transmitter is ordered in combination with a diaphragm seal system. Please also refer to GS 01C25W01-01EN.

Process Connections Code	High Pressure Side	Low Pressure Side
B	With C80F□, C8□FA or C8□FD diaphragm seal	With C80F□, C8□FA or C8□FD diaphragm seal
C	With C80F□, C82FA or C82FD diaphragm seal	Rc 1/4 female on the cover flange
D	With C80F□, C82FA or C82FD diaphragm seal	1/4 NPT female on the cover flange
E	Rc 1/4 female on the cover flange	With C80F□, C82FA or C82FD diaphragm seal
F	1/4 NPT female on the cover flange	With C80F□, C82FA or C82FD diaphragm seal
G	With C80F□, C8□FA or C8□FD diaphragm seal for high vacuum use	With C80F□, C8□FA or C8□FD diaphragm seal for high vacuum use
Q	With C20F□ direct mount seal	Rc 1/4 female on the cover flange
R	With C20F□ direct mount seal	1/4 NPT female on the cover flange

C80F□, C8□FA, C8□FD and C20F□ stand for C80FW or C80FE remote mount flanged diaphragm seal, C81FA or C82FA inner diaphragm adapter connection seal, C81FD or C82FD inner diaphragm flanged seal, and C20FW or C20FE direct mount seal respectively.

■ OPTIONAL SPECIFICATIONS (For Explosion Protected type) “◇”

For other agency approvals and marine approvals, please refer to GS 01C25A20-01EN.

Item	Description	Code
Factory Mutual (FM)	FM Explosionproof Approval ^{*1} Applicable Standard: FM3600, FM3615, FM3810, ANSI/NEMA 250 Explosionproof for Class I, Division 1, Groups B, C and D, Dust-ignitionproof for Class II/III, Division 1, Groups E, F and G, in Hazardous locations, indoors and outdoors (Enclosure: Type 4X) “FACTORY SEALED, CONDUIT SEAL NOT REQUIRED.” Temperature class: T6, Amb. Temp.: -40 to 60°C (-40 to 140°F)	FF1
	FM Intrinsically safe Approval ^{*1*2} Applicable Standard: FM3600, FM3610, FM3611, FM3810 Intrinsically Safe for Class I, Division 1, Groups A, B, C & D, Class II, Division 1, Groups E, F & G and Class III, Division 1, Class I, Zone 0, in Hazardous Locations, AEx ia IIC Nonincendive for Class I, Division 2, Groups A, B, C & D, Class II, Division. 2, Groups F & G, Class I, Zone 2, Group IIC, in Hazardous Locations Enclosure: Type 4X, Temp. Class: T4, Amb. Temp.: -60 to 60°C (-75 to 140°F) Intrinsically Safe Apparatus Parameters [Groups A, B, C, D, E, F and G] Vmax=30 V, Imax=200 mA, Pmax=1 W, Ci=6 nF, Li=0 μH [Groups C, D, E, F and G] Vmax=30 V, Imax=225 mA, Pmax=1 W, Ci=6 nF, Li=0 μH	FS1
	Combined FF1 and FS1 ^{*1*2}	FU1
ATEX	ATEX Flameproof Approval ^{*1} Applicable Standard: EN 60079-0:2012+A11:2013, EN 60079-1:2007 (“2014” from August 1, 2017), EN 60079-31:2014 Certificate: KEMA 07ATEX0109 X II 2G, 2D Ex d IIC T6...T4 Gb (“Ex db IIC T6...T4 Gb” from August 1, 2017), Ex tb IIIC T85°C Db Degree of protection: IP66/IP67 Amb. Temp. (Tamb) for gas-proof: T4; -50 to 75°C (-58 to 167°F), T5; -50 to 80°C (-58 to 176°F), T6; -50 to 75°C (-58 to 167°F) Process Temp. for gas-proof (Tp): T4; -50 to 120°C (-58 to 248°F), T5; -50 to 100°C (-58 to 212°F), T6; -50 to 85°C (-58 to 185°F) Max. surface Temp. for dust-proof: T85°C (Tamb: -30 to 75°C, Tp: -30 to 85°C) ^{*3}	KF22
	ATEX Intrinsically safe Approval ^{*1*2} Applicable Standard: EN 60079-0:2012+A11:2013, EN 60079-11:2012 Certificate: DEKRA 11ATEX0228 X II 1G, 2D Ex ia IIC T4 Ga, Ex ia IIIC T85°C T100°C T120°C Db Degree of protection: IP66/IP67 Amb. Temp. (Tamb) for EPL Ga: -50 to 60°C (-58 to 140°F) Maximum Process Temp. (Tp) for EPL Ga: 120°C Electrical data: Ui=30 V, Ii=200 mA, Pi=0.9 W, Ci=27.6 nF, Li=0 μH Amb. Temp. for EPL Db: -30 to 60°C ^{*3} Max. surface Temp. for EPL Db: T85°C (Tp: 80°C), T100°C (Tp: 100°C), T120°C (Tp: 120°C)	KS21
	Combined KF22, KS21 and ATEX Intrinsically safe Ex ic ^{*1*2} [ATEX Intrinsically safe Ex ic] Applicable Standard: EN 60079-0:2012+A11:2013, EN 60079-11 :2012 II 3G Ex ic IIC T4 Gc, Amb. Temp.: -30 to 60°C (-22 to 140°F) ^{*3} Ui=30 V, Ci=27.6 nF, Li=0 μH	KU22

Item	Description	Code
Canadian Standards Association (CSA)	<p>CSA Explosionproof Approval *1 Certificate: 2014354 Applicable Standard: C22.2 No.0, C22.2 No.0.4, C22.2 No.0.5, C22.2 No.25, C22.2 No.30, C22.2 No.94, C22.2 No.60079-0, C22.2 No.60079-1, C22.2 No.61010-1, C22.2 No.61010-2-030 Explosion-proof for Class I, Groups B, C and D. Dustignition-proof for Class II/III, Groups E, F and G. When installed in Division 2, "SEAL NOT REQUIRED" Enclosure: Type 4X, Temp. Code: T6...T4 Ex d IIC T6...T4 Enclosure: IP66/IP67 Max.Process Temp.: T4;120°C(248°F), T5;100°C(212°F), T6; 85°C(185°F) Amb.Temp.: -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T4, -50 to 80°C(-58 to 176°F) for T5, -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T6 *3 Process Sealing Certification Dual Seal Certified by CSA to the requirement of ANSI/ISA 12.27.01 No additional sealing required Primary seal failure annunciation: at the zero adjustment screw</p>	CF1
	<p>CSA Intrinsically safe Approval *1*2 Certificate: 1606623 [For CSA C22.2] Applicable Standard: C22.2 No.0, C22.2 No.0.4, C22.2 No.25, C22.2 No.94, C22.2 No.157, C22.2 No.213, C22.2 No.61010-1, C22.2 No.60079-0, C22.2 No.61010-2-030 Intrinsically Safe for Class I, Division 1, Groups A, B, C & D, Class II, Division 1, Groups E, F & G, Class III, Division 1, Nonincendive for Class I, Division 2, Groups A, B, C & D, Class II, Division 2, Groups F & G, Class III, Division 1 Enclosure: Type 4X, Temp. Code: T4 Amb. Temp.: -50 to 60°C(-58 to 140°F) *3 Electrical Parameters: [Intrinsically Safe] Vmax=30V, Imax=200mA, Pmax=0.9W, Ci=10nF, Li=0 µH [Nonincendive] Vmax=30V, Ci=10nF, Li=0 µH [For CSA E60079] Applicable Standard: CAN/CSA E60079-11, CAN/CSA E60079-15, IEC 60529:2001 Ex ia IIC T4, Ex nL IIC T4 Enclosure: IP66/IP67 Amb. Temp.: -50 to 60°C(-58 to 140°F) *3, Max. Process Temp.: 120°C(248°F) Electrical Parameters: [Ex ia] Ui=30V, Ii=200mA, Pi=0.9W, Ci=10nF, Li=0 µH [Ex nL] Ui=30V, Ci=10nF, Li=0 µH Process Sealing Certification Dual Seal Certified by CSA to the requirement of ANSI/ISA 12.27.01 No additional sealing required Primary seal failure annunciation: at the zero adjustment screw</p>	CS1
	Combined CF1 and CS1 *1*2	CU1
IECEx Scheme	<p>IECEx Flameproof Approval *1 Applicable Standard: IEC 60079-0:2011, IEC60079-1:2004-7 Certificate: IECEx CSA 07.0008 Flameproof for Zone 1, Ex d IIC T6...T4 Gb Enclosure: IP66/IP67 Max.Process Temp.: T4;120°C(248°F), T5;100°C(212°F), T6; 85°C(185°F) Amb.Temp.: -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T4, -50 to 80°C(-58 to 176°F) for T5, -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T6</p>	SF2
	<p>IECEx Intrinsically safe and Flameproof Approval *1*2 Intrinsically safe Ex ia Certificate: IECEx DEK 11.0081X Applicable Standard: IEC 60079-0:2011, IEC 60079-11:2011 Ex ia IIC T4 Ga Enclosure: IP66/IP67 Amb. Temp.: -50 to 60°C(-58 to 140°F), Max. Process Temp.: 120°C(248°F) Electrical Parameters: Ui=30V, Ii=200mA, Pi=0.9W, Ci=27.6nF, Li=0 µH Intrinsically safe Ex ic Certificate: IECEx DEK 13.0061X Applicable Standard: IEC 60079-0:2011, IEC 60079-11:2011 Ex ic IIC T4 Gc IP code: IP66 Amb. Temp.: -30 to 60°C(-22 to 140°F) *3, Max. Process Temp.: 120°C(248°F) Electrical Parameters: Ui=30V,Ci=27.6 nF, Li=0 µH Flameproof Certificate: IECEx CSA 07.0008 Applicable Standard: IEC 60079-0:2011, IEC60079-1:2007-4 Flameproof for Zone 1, Ex d IIC T6...T4 Gb Enclosure: IP66/IP67 Max.Process Temp.: T4;120°C(248°F), T5;100°C(212°F), T6; 85°C(185°F) Amb.Temp.: -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T4, -50 to 80°C(-58 to 176°F) for T5, -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T6</p>	SU21
Combination of Approval	Combination of KU22, FU1 and CU1 *1*2*4	V1U1

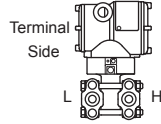
*1: Applicable for Electrical connection code 2, 4, 7, 9, C and D.

*2: Not applicable for option code /AL.

*3: Lower limit of ambient temperature is -15°C (5°F) when /HE is specified.

*4: When this option code is specified, a wired tag plate (as of N4 option) shall be used.

OPTIONAL SPECIFICATIONS

Item		Description	Code
High Accuracy type ^{*24}		Reference accuracy: ±0.025% of Span	HAC
Painting	Color change	Amplifier cover only ^{*9}	P□
		Amplifier cover and terminal cover, Munsell 7.5 R4/14	PR
	Coating change	Anti-corrosion coating ^{*1}	X2
316 SST exterior parts		316 SST zero-adjustment screw and setscrews ^{*10}	HC
Fluoro-rubber O-ring		All O-rings of amplifier housing. Lower limit of ambient temperature: -15°C (5°F)	HE
Lightning protector		Transmitter power supply voltage: 10.5 to 32 V DC (10.5 to 30 V DC for intrinsically safe type.) Allowable current: Max. 6000 A (1×40 μs), Repeating 1000 A (1×40 μs) 100 times Applicable Standards: IEC 61000-4-4, IEC 61000-4-5	A
Status output ^{*2}		Transistor output (sink type) Contact rating: 30 V DC, 120 mA DC(max) Low level: 0 to 2 V DC	AL
Oil-prohibited use ^{*3}		Degrease cleansing treatment	K1
		Degrease cleansing treatment and fluorinated oilfilled capsule. Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K2
Oil-prohibited use with dehydrating treatment ^{*3}		Degrease cleansing and dehydrating treatment	K5
		Degrease cleansing and dehydrating treatment with fluorinated oilfilled capsule. Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K6
Capsule fill fluid		Fluorinated oil filled in capsule Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K3
Calibration units ^{*4}		P calibration (psi unit)	D1
		bar calibration (bar unit)	D3
		M calibration (kgf/cm ² unit)	D4
		(See Table for Span and Range Limits.)	
Long vent ^{*5}		Total length: 119 mm (standard: 34 mm); Total length when combining with option code K1, K2, K5, and K6: 130 mm. Material: 316 SST	U1
Gold-plated capsule gasket ^{*11}		Gold-plated 316L SST capsule gasket. Without drain and vent plugs.	GS
Gold-plated diaphragm ^{*12}		Surface of isolating diaphragms are gold plated, effective for hydrogen permeation.	Gold plate thickness: 3 μm
			Gold plate thickness: 10 μm
Output limits and failure operation ^{*6}		Failure alarm down-scale: Output status at CPU failure and hardware error is -5%, 3.2mA DC or less.	C1
		NAMUR NE43 Compliant Output signal limits: 3.8 mA to 20.5 mA	Failure alarm down-scale: Output status at CPU failure and hardware error is -5%, 3.2 mA DC or less.
			Failure alarm up-scale: Output status at CPU failure and hardware error is 110%, 21.6 mA or more.
Body option ^{*7} 		Right side high pressure, without drain and vent plugs	N1
		N1 and Process connection, based on IEC61518 with female thread on both sides of cover flange, with blind kidney flanges on back.	N2
		N2, and Material certificate for cover flange, diaphragm, capsule body, and blind kidney flange	N3
Wired tag plate ^{*23}		316 SST tag plate wired onto transmitter	N4
Data configuration at factory ^{*8}		Data configuration for HART communication type	Software damping, Descriptor, Message
		Data configuration for BRAIN communication type	Software damping
Advanced diagnostics ^{*21}		Multi-sensing process monitoring • Impulse line blockage detection ^{*22} • Heat trace monitoring	DG6
European Pressure Equipment Directive ^{*13}		PED 2014/68/EU Category III, Module H, Type of Equipment: Pressure Accessory-Vessel, Type of Fluid: Liquid and Gas, Group of Fluid: 1 and 2 Lower limit of ambient and process temperature: -29°C	PE3
Material certificate ^{*14}		Cover flange ^{*15}	M01
		Cover flange, Process connector ^{*16}	M11
Pressure test/ Leak test certificate ^{*17}		Test Pressure: 16 MPa(2300 psi) ^{*18}	Nitrogen(N ₂) Gas ^{*20}
		Test Pressure: 25 MPa(3600 psi) ^{*19}	Retention time: one minute

- *1: Not applicable with color change option. Not applicable for amplifier housing code 2.
- *2: Check terminals cannot be used when this option code is specified. Not applicable for output signal code F and G.
- *3: Applicable for Wetted parts material code S, M, H and T.
- *4: The unit of MWP (Max. working pressure) on the name plate of a housing is the same unit as specified by option codes D1, D3, and D4.
- *5: Applicable for vertical impulse piping type (Installation code 7) and Wetted parts material code S, H, M and T.
- *6: Applicable for output signal codes D, E and J. The hardware error indicates faulty amplifier or capsule.
- *7: Applicable for wetted parts material code S, M, H and T; process connection codes 3, 4, and 5; installation code 9; and mounting bracket code N. Process connection faces on the other side of zero adjustment screw.
- *8: Also see 'Ordering Information'.
- *9: Not applicable for amplifier housing code 2 and 3.
- *10: 316 or 316L SST. The specification is included in amplifier housing code 2.
- *11: Applicable for wetted parts material code S; process connection code 0 and 5; and installation code 8 and 9. Not applicable for option code U1, N2, N3 and M11. No PTFE is used for wetted parts.
- *12: Applicable for wetted parts material code S or L. /A2 is not applicable with FM approval.
- *13: Applicable for measurement span code M, H and V and wetted parts material code S. If compliance with category III is needed, specify this option code.
- *14: Material traceability certification, per EN 10204 3.1B.
- *15: Applicable for process connections codes 0 and 5.
- *16: Applicable for process connections codes 1, 2, 3, and 4.
- *17: The unit on the certificate is always Pa unit regardless of selection of option code D1, D3 or D4.
- *18: Applicable for capsule code F and L. Also applicable for capsule M, H and V when combined with Wetted Parts Material code H, M, T, A, D, B or W.
- *19: Applicable for capsule codes M, H and V when combined with Wetted Parts Material code S or L.
- *20: Pure nitrogen gas is used for oil-prohibited use (option codes K1, K2, K5, and K6).
- *21: Applicable only for output signal code E and J.
- *22: The change of pressure fluctuation is monitored and then detects the impulse line blockage. See TI 01C25A31-01E for detailed technical information required for using this function.
- *23: Maximum number of characters to be engraved on N4 tag plate is 16. Not applicable when option code V1U1 is specified.
- *24: Refer to "PERFORMANCE SPECIFICATIONS." Applicable for measurement span code M, H or V, and wetted parts material code S or L. Not applicable for option code /A1, /A2, /K2, /K3 and /K6. When the specified range values for V capsule include negative value, the accuracy shall be the standard accuracy, even if /HAC is specified.

■ OPTIONAL SPECIFICATIONS (FOR DIAPHRAGM SEAL SYSTEM)

The table below shows the codes dedicated for the combination with a diaphragm seal system. They are only available when the transmitter is ordered in combination with a diaphragm seal system. Please also refer to GS 01C25W01-01EN

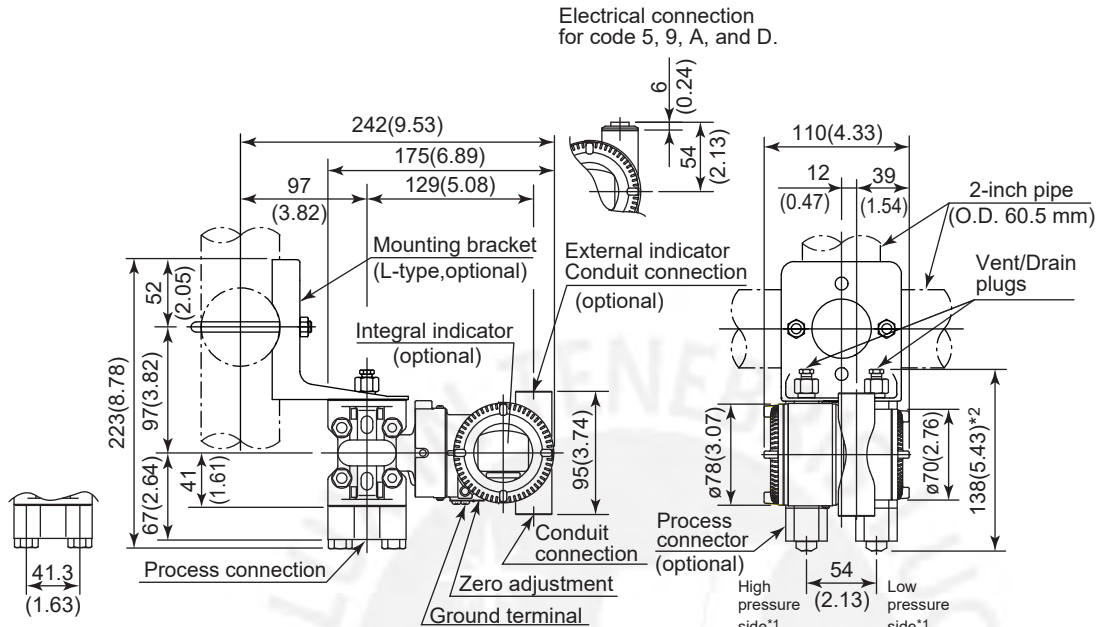
Item	Descriptions	Code
Oil-prohibited use	Degrease cleansing treatment	K11
	Degrease cleansing treatment and fluorinated oil-filled capsule. Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K12
Oil-prohibited use with dehydrating treatment	Degrease cleansing and dehydrating treatment	K15
	Degrease cleansing and dehydrating treatment with fluorinated oil-filled capsule. Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K16
Capsule fill fluid	Fluorinated oil filled in capsule Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K13
Material certificate	Material Certificate: [Low pressure side] Cover flange	M02
	Material Certificate: [High pressure side] Cover flange	M03
	Material Certificate: Bolts and nuts for cover flanges	M51
	Material Certificate: [Low pressure side] Cover flange, bolts and nuts for cover flanges.	M62
	Material Certificate: [High pressure side] Cover flange, bolts and nuts for cover flanges.	M63

■ DIMENSIONS

Unit: mm (approx.inch)

● **Vertical Impulse Piping Type (INSTALLATION CODE '7')**

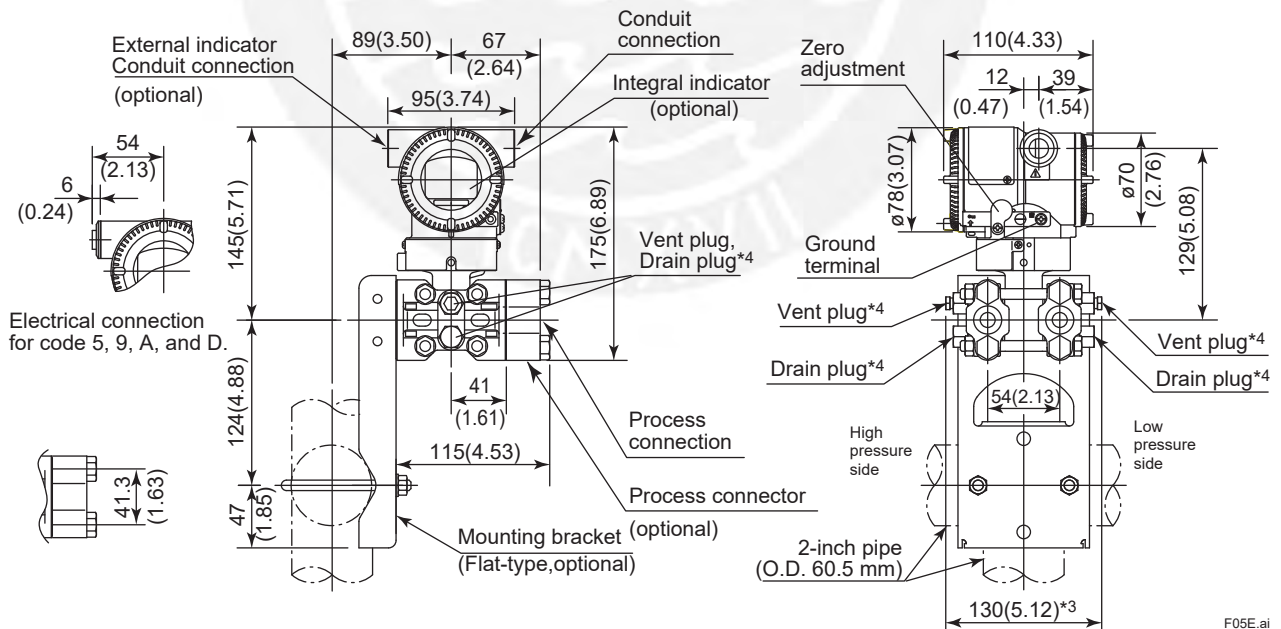
Wetted Parts Material code: S (except for Measurement span code F) and L



F04E.ai

● **Horizontal Impulse Piping Type (INSTALLATION CODE '9')**
(For CODE '8', refer to the notes below.)

Wetted Parts Material code: S (except for Measurement span code F) and L



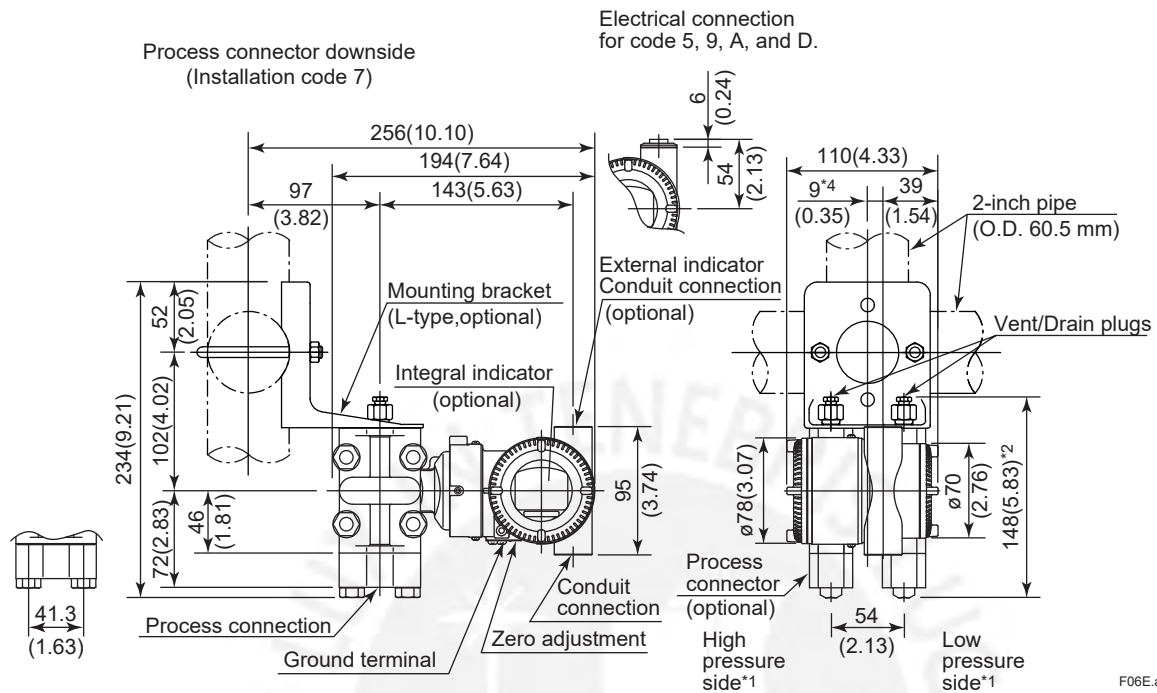
F05E.ai

- *1: When installation code 8 is selected, high and low pressure side on above figure are reversed. (i.e. High pressure side is on the right side.)
- *2: When option code K1, K2, K5 or K6 is selected, add 15 mm (0.59 inch) to the value in the figure.
- *3: When option code K1, K2, K5 or K6 is selected, add 30 mm (1.18 inch) to the value in the figure.
- *4: Not available when option code GS is selected.
- *5: When electrical connection code 7 or C is selected, a blind plug is protruded upto 8 mm from the conduit connection.

Unit: mm (approx.inch)

• Vertical Impulse Piping Type (INSTALLATION CODE '7')

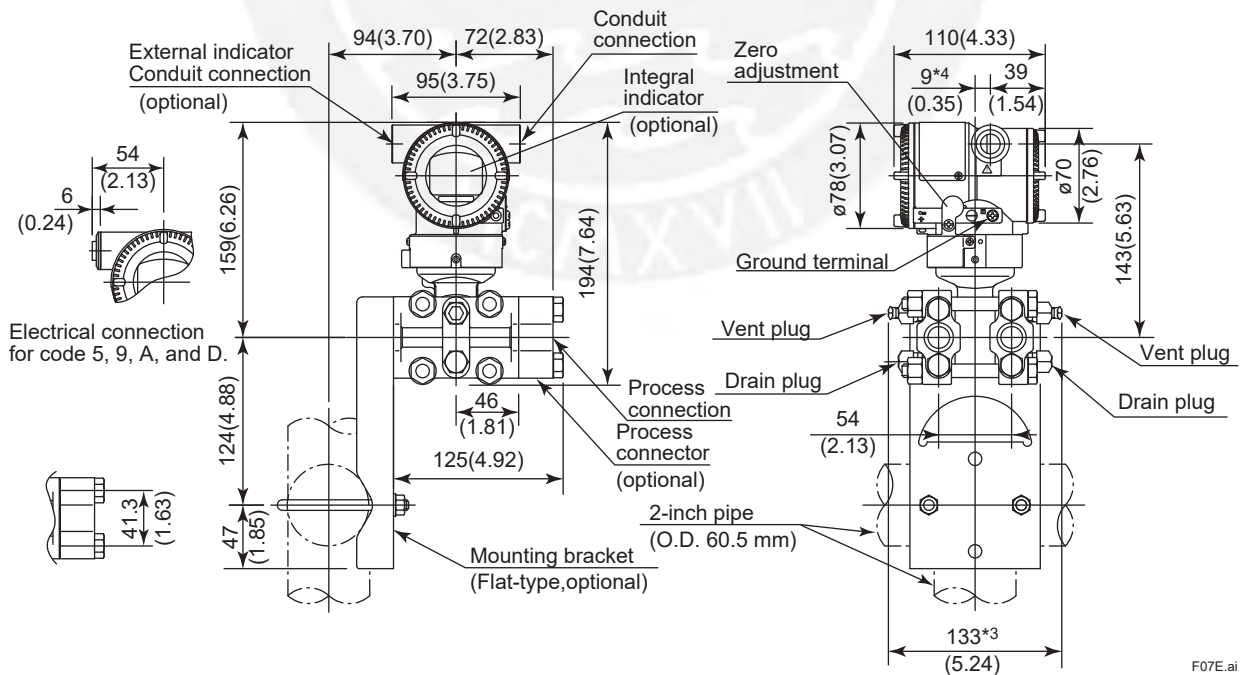
Wetted Parts Material code: H, M, T, A, B, D and W or Measurement span code F



F06E.ai

• Horizontal Impulse Piping Type (INSTALLATION CODE '9')
(For CODE '8', refer to the notes below.)

Wetted Parts Material code: H, M, T, A, B, D and W or Measurement span code F



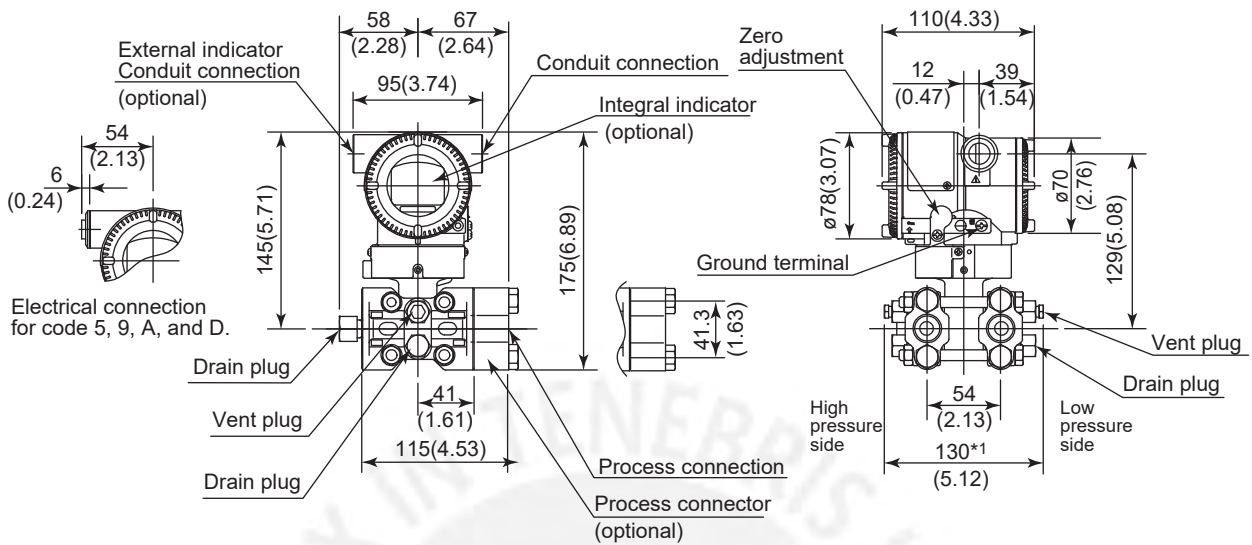
F07E.ai

- *1: When Installation code 8 is selected, high and low pressure side on above figure are reversed. (i.e. High pressure side is on the right side.)
- *2: When Option code K1, K2, K5, or K6 is selected, add 15 mm (0.59 inch) to the value in the figure.
- *3: When Option code K1, K2, K5, or K6 is selected, add 30 mm (1.18 inch) to the value in the figure.
- *4: 15 mm (0.59 inch) for right side high pressure.
- *5: When electrical connection code 7 or C is selected, a blind plug is protruded upto 8 mm from the conduit connection.

Unit: mm (approx.inch)

• Universal Flange (INSTALLATION CODE 'U')

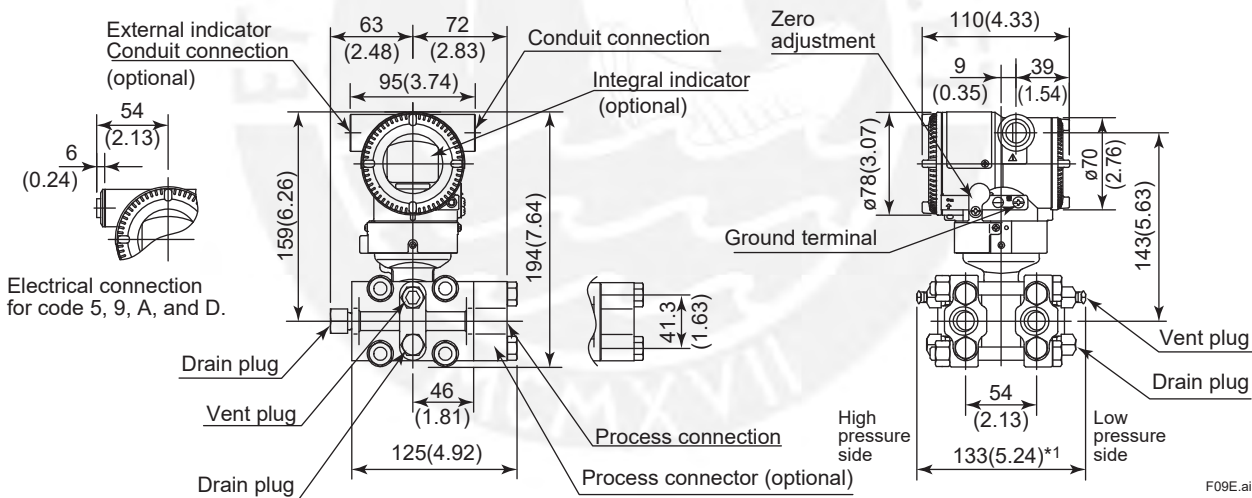
Measurement span code M, H and V



F08E.ai

• Universal Flange (INSTALLATION CODE 'U')

Measurement span code F



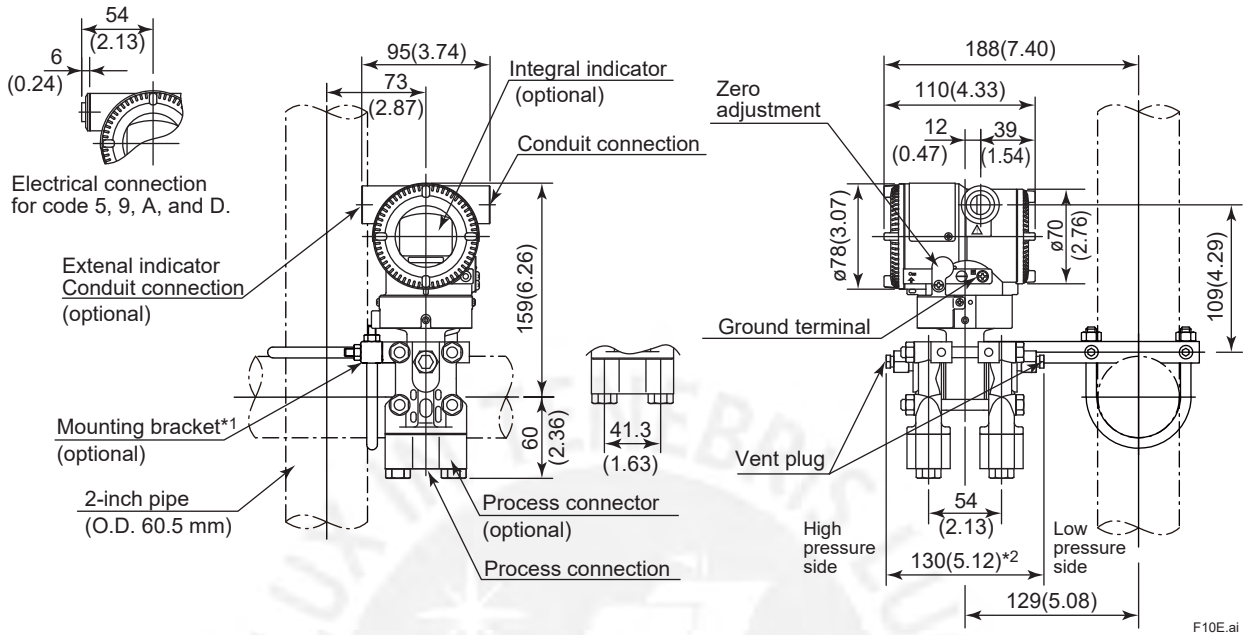
F09E.ai

*1: When Option code K1, K2, K5, or K6 is selected, add 30 mm (1.18 inch) to the value.

*2: When electrical connection code 7 or C is selected, a blind plug is protruded upto 8 mm from the conduit connection.

● Bottom Process Connection Type (INSTALLATION CODE 'B')

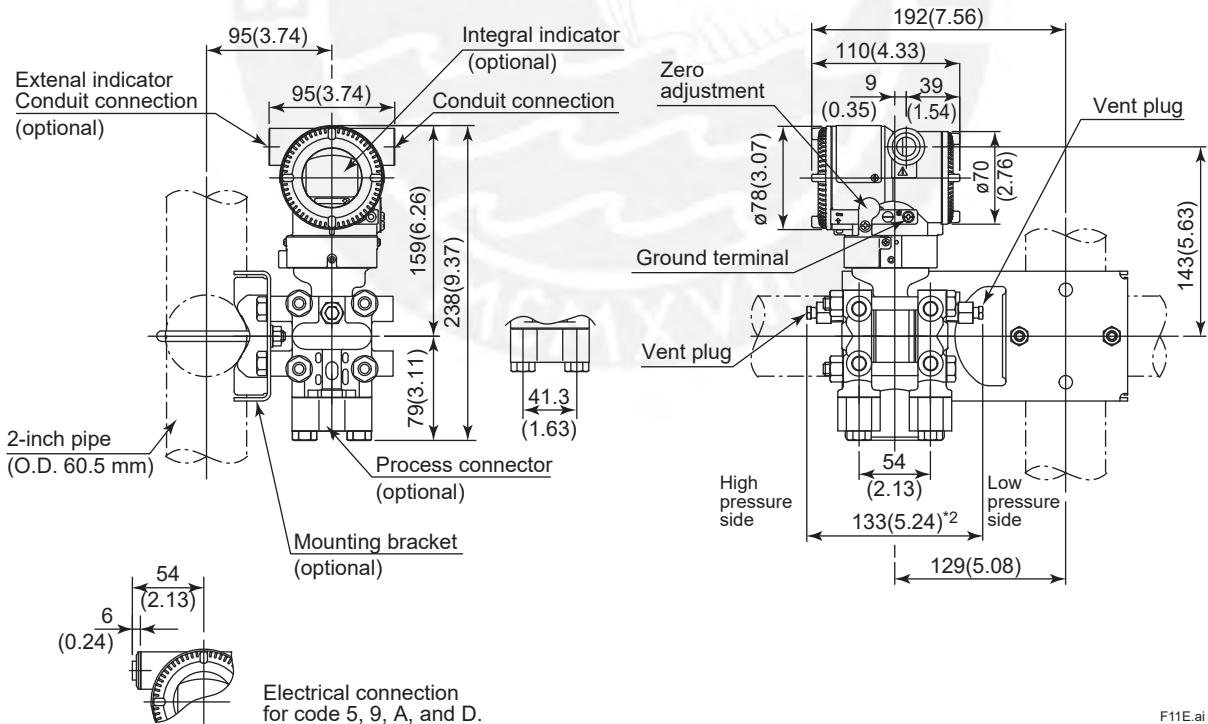
Measurement span code M, H and V



F10E.ai

● Bottom Process Connection Type (INSTALLATION CODE 'B')

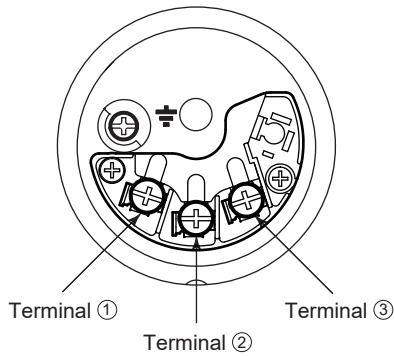
Measurement span code F



F11E.ai

- *1: A transmitter with SST housing is not applicable for mounting to horizontal 2-inch pipe.
- *2: When Option code K1, K2, K5, or K6 is selected, add 30 mm (1.18 inch) to the value.
- *3: When electrical connection code 7 or C is selected, a blind plug is protruded upto 8 mm from the conduit connection.

• Terminal Configuration



• Terminal Wiring

SUPPLY	+	①	] Power supply and output terminals
	-	②	
CHECK	+	③	] External indicator (ammeter) terminals ^{*1,2}
or	-	②	
ALARM	+	③	] Status contact output terminals ^{*2}
	-	②		(when /AL is specified)
			⏏ Ground terminal

*1: When using an external indicator or check meter, the internal resistance must be 10 Ω or less. A check meter or indicator cannot be connected when /AL option is specified.

*2: Not available for FOUNDATION Fieldbus and PROFIBUS PA communication types.

F12E.ai

• Wiring Example for Analog Output and Status Output

Connection	Description
Analog output	<p>EJX electrical terminal</p> <p>*1: Either A or +</p>
Analog and status output (when /AL is specified)	<p>EJX electrical terminal</p> <p>*1: Either A or +</p> <p>If shield cable is not used, communication is not possible.</p> <p>Use two-wire separately shielded cables.</p>

F13E.ai

< Ordering Information > “◇”

Specify the following when ordering.

For output signal code –J, refer to GS 01C25T01-01EN.

1. Model, suffix codes, and option codes
2. Calibration range and units
 - 1) Calibration range can be specified with range value specifications up to 5 digits (excluding any decimal point) for low or high range limits within the range of -32000 to 32000. When reverse range is designated, specify Lower Range Value(LRV) as greater than Upper Range Value(URV). When square root output mode is specified, LRV must be “0 (zero)”.
 - 2) Specify only one unit from the table, ‘Factory setting.’
3. Select linear or square root for output mode and display mode.
 Note: If not specified, the instrument is shipped set for linear mode.
4. Display scale and units (for transmitters equipped with the integral indicator only)
 Specify either 0 to 100 % or ‘Range and Unit’ for engineering units scale:
 Scale range can be specified with range limit specifications up to 5 digits (excluding any decimal point) for low or high range limits within the range of -32000 to 32000. Unit display consists of 6-digit, therefore, if the specified scaling unit excluding ‘/’ is longer than 6-characters, the first 6 characters will be displayed on the unit display.
5. Tag Number (if required)
 Specified characters (up to 16 characters for BRAIN, 22 characters for HART, or 16 characters for /N4 tag) are engraved on the stainless steel tag plate fixed on the housing.
6. SOFTWARE TAG (for HART only. If required)
 Specified characters (up to 32 characters) are set as “Tag” (the first 8 characters) and “Long tag”^{*1} (32 characters) in the amplifier memory. Use alphanumeric capital letters.
 When the “SOFTWARE TAG” is not specified, specified “TAG NO” is set as “Tag” (the first 8 characters) and “Long tag”^{*1} (22 characters) in the amplifier memory.
^{*1}: applicable only when HART 7 is selected.
7. Other factory configurations (if required)
 Specifying option code **CA** or **CB** will allow further configuration at factory. Following are configurable items and setting range.
 [/CA : For HART communication type]
 - 1) Descriptor (up to 16 characters)
 - 2) Message (up to 30 characters)
 - 3) Software damping in second (0.00 to 100.00)
 [/CB : For BRAIN communication type]
 - 1) Software damping in second (0.00 to 100.00)

< Factory Setting > “◇”

Tag number	As specified in order
Software damping *1	‘2.00 s’ or as specified in order
Output mode	‘Linear’ unless otherwise specified in order
Calibration range lower range value	As specified in order
Calibration range upper range value	As specified in order
Calibration range unit	Selected from mmH ₂ O, mmH ₂ O(68°F), mmAq ² , mmWG ² , mmHg, Pa, hPa ² , kPa, MPa, mbar, bar, gf/cm ² , kgf/cm ² , inH ₂ O, inH ₂ O(68°F), inHg, ftH ₂ O, ftH ₂ O(68°F) or psi. (Only one unit can be specified.)
Display setting	Designated differential pressure value specified in order. (% or user scaled value.) Display mode ‘Linear’ or ‘Square root’ is also as specified in order.
Static pressure display range	‘0 to 25 MPa’ for M, H, and V capsule with wetted parts material S or L, and ‘0 to 16 MPa’ for F capsule with wetted parts material S and all capsules with wetted parts material other than S and L, absolute value. Measuring high pressure side.

- *1: To specify these items at factory, option code **CA** or **CB** is required.
- *2: Not available for HART protocol type.

< Material Cross Reference >

ASTM	JIS
316	SUS316
F316	SUSF316
316L	SUS316L
F316L	SUSF316L
304	SUS304
F304	SUSF304
660	SUH660
B7	SNB7
CF-8M	SCS14A

ANEXO 10: Hoja técnica de los sensores de presión en la regulación.



General Specifications

EJX510A and EJX530A Absolute and Gauge Pressure Transmitter



GS 01C25F01-01EN

[Style: S2]

The high performance absolute and gauge pressure transmitter EJX510A and EJX530A feature single crystal silicon resonant sensor and are suitable to measure liquid, gas, or steam pressure. EJX510A and EJX530A output a 4 to 20 mA DC signal corresponding to the measured pressure. It also features quick response, remote setup and monitoring via BRAIN or HART communications, diagnostics, and optional status output for pressure high/low alarm. The multisensing technology provides the advanced diagnostic function to detect such abnormalities as an impulse line blockage or heat trace breakage. FOUNDATION Fieldbus and PROFIBUS PA protocol types are also available.

All EJX series models in their standard configuration, with the exception of the Fieldbus and PROFIBUS types, are certified by TÜV as complying with SIL 2 for safety requirement.



■ STANDARD SPECIFICATIONS

Refer to GS 01C25T02-01EN for Fieldbus communication type and GS 01C25T04-01EN for PROFIBUS PA communication type for the items marked with "◇."

□ SPAN AND RANGE LIMITS

(For EJX510A, values are in absolute and lower range limits are 0.)

Measurement Span/Range	MPa	psi (/D1)	bar (/D3)	kg/cm ² (/D4)
A	Span	8 to 200 kPa	1.16 to 29	0.08 to 2
	Range	-100 to 200 kPa	-14.5 to 29	-1 to 2
B	Span	0.04 to 2	5.8 to 290	0.4 to 20
	Range	-0.1 to 2	-14.5 to 290	-1 to 20
C	Span	0.2 to 10	29 to 1450	2 to 100
	Range	-0.1 to 10	-14.5 to 1450	-1 to 100
D	Span	1 to 50	145 to 7200	10 to 500
	Range	-0.1 to 50	-14.5 to 7200	-1 to 500

□ PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Zero-based calibrated span, linear output, wetted parts material code 'S' and silicone oil, unless otherwise mentioned. For Fieldbus and PROFIBUS PA communication types, use calibrated range instead of span in the following specifications.

Specification Conformance

EJX series ensures specification conformance to at least $\pm 3\sigma$.

Reference Accuracy of Calibrated Span (includes the effects of terminal-based linearity, hysteresis, and repeatability)

Measurement span	Reference Accuracy	
	Span \geq X	Span<X
A	$\pm 0.04\%$ of Span	$\pm(0.004 \text{ URL/ span})\%$ of Span
B		$\pm(0.005+0.0035 \text{ URL/ span})\%$ of Span
C		$\pm(0.004 \text{ URL/ span})\%$ of Span
D		$\pm(0.004 \text{ URL/ span})\%$ of Span

Measurement span	A	B	C	D
X	20 kPa (2.9 psi)	0.2 MPa (29 psi)	1 MPa (145 psi)	5 MPa (720 psi)
URL (Upper range limit)	200 kPa (29 psi)	2 MPa (290 psi)	10 MPa (1450 psi)	50 MPa (7200 psi)

Ambient Temperature Effects per 28°C (50°F) Change

$\pm(0.15\%$ of Span + 0.15% of URL)

Stability (All normal operating condition)

EJX530A: $\pm 0.1\%$ of URL for 10 years
EJX510A: $\pm 0.2\%$ of URL for 10 years

Power Supply Effects

$\pm 0.005\%$ per Volt (from 21.6 to 32 V DC, 350Ω)

Vibration Effects

Amplifier housing code 1 and 3:

Less than 0.1% of URL when tested per the requirements of IEC60770-1 field or pipeline with high vibration level (10-60 Hz, 0.21 mm displacement/60-2000 Hz 3 g)

Amplifier housing code 2:

Less than $\pm 0.1\%$ of URL when tested per the requirements of IEC60770-1 field with general application or pipeline with low vibration level (10-60 Hz 0.15mm displacement /60-500 Hz 2g)

Mounting Position Effects

Rotation in diaphragm plane has no effect. Tilting up to 90 degree will cause zero shift up to 0.21 kPa (0.84 inH₂O) which can be corrected by the zero adjustment.

Response Time (All capsules) “◇”

90 ms

When software damping is set to zero and including dead time of 45 ms (nominal)

□ **FUNCTIONAL SPECIFICATIONS**

Output

Two wire 4 to 20 mA DC output with digital communications, linear or square root programmable. BRAIN or HART FSK protocol are superimposed on the 4 to 20 mA signal.

Output range: 3.6 mA to 21.6 mA

Output limits conforming to NAMUR NE43 can be pre-set by option code C2 or C3.

Failure Alarm (Output signal code D, E and J)

Output status at CPU failure and hardware error;

Up-scale: 110%, 21.6 mA DC or more (standard)

Down-scale: -5%, 3.2 mA DC or less

Analog output status at process abnormality (Option code /DG6);

The result of process abnormality detected by the advanced diagnostic function can be reflected to an analog alert status. The following three setting modes are available.

		Mode		
		Burnout	Fall back	Off
Standard		110%, 21.6mA or more	Holds to a specified value within the output range from 3.6mA to 21.6mA	Normal output
Option Code	/C1	-2.5%, 3.6mA or less		
	/C2	-1.25%, 3.8mA or less		
	/C3	103.1%, 20.5mA or more		

Damping Time Constant (1st order)

Amplifier's damping time constant is adjustable from 0.00 to 100.00 s by software and added to response time.

Note: For BRAIN protocol type, when the software damping is set to less than 0.5 s, communication may occasionally be unavailable during the operation, especially while output changes dynamically. The default setting of damping ensures stable communication.

Update Period “◇”

Pressure: 45 ms

Zero Adjustment Limits

Zero can be fully elevated or suppressed, within the lower and upper range limits of the capsule.

External Zero Adjustment

External zero is continuously adjustable with 0.01% incremental resolution of span. Re-range can be done locally using the digital indicator with rangesetting switch.

Integral Indicator (LCD display, optional) “◇”

5-digit numerical display, 6-digit unit display and bar graph.

The indicator is configurable to display one or up to three of the following variables periodically; pressure in %, scaled pressure, measured pressure.

See also “Factory Settings.”

Local Parameter Setting (Output signal code D, E, and J)

Parameter configuration by the external zero adjustment screw and push button (Integral indicator code E) offers easy and quick setup for parameters of Tag number, Unit, LRV, URV, Damping, Output mode (linear/square root), Display out 1, and Re-range by applying actual pressure (LRV/URV).

Burst Pressure Limits

A, B and C capsule: 30 MPa

D capsule: 132 MPa

Self Diagnostics

CPU failure, hardware failure, configuration error, process alarm for pressure or capsule temperature.

User-configurable process high/low alarm for pressure is also available, and its status can be output when optional status output is specified.

Advanced Diagnostics (optional) “◇”

Applicable for Output signal code E, J and F.

- Impulse line blockage detection

The impulse line condition can be calculated and detected by extracting the fluctuation component from the static pressure signal.

- Heat trace monitoring

The change of the process connection temperature calculated by using the two temperature sensors built in the EJX enables to detect the heat trace breakage or the abnormal temperature due to the failure.

Signal Characterizer (Output signal code D, E and J)

User-configurable 10-segment signal characterizer for 4 to 20 mA output.

Status Output (optional, output signal code D, E and J)

One transistor contact output (sink type) to output the status of user configurable high/low alarm for pressure.

Rating: 10.5 to 30 V DC, 120 mA DC max.

Note: A check meter cannot be connected when status output option (/AL) is specified.

Refer to 'Wiring Example for Analog Output and Status Output.'

SIL Certification

EJX series transmitters except Fieldbus and PROFIBUS PA communication types are certified by TÜV in compliance with the following standards; IEC 61508: 2000; Part1 to Part 7

Functional Safety of Electrical/electronic/programmable electronic related systems; SIL 2 capability for single transmitter use, SIL 3 capability for dual transmitter use.

□ **NORMAL OPERATING CONDITION**
(Optional features or approval codes may affect limits.)

Ambient Temperature Limits

- 40 to 85°C (-40 to 185°F)
- 30 to 80°C (-22 to 176°F) with LCD display

Process Temperature Limits

- 40 to 120°C (-40 to 248°F)

Ambient Humidity Limits

- 0 to 100% RH

Maximum Over Pressure

Capsule	Pressure	
	EJX510A	EJX530A
A and B	4 MPa abs (580 psia)	4 MPa (580 psig)
C	20 MPa abs (2900 psia)	20 MPa (2900 psig)
D	75 MPa abs (10800 psia)	75 MPa (10800 psig)

Working Pressure Limits (Silicone oil)

Maximum Pressure Limits

Capsule	Pressure	
	EJX510A	EJX530A
A	200 kPa abs (29 psia)	200 kPa (29 psig)
B	2 MPa abs (290 psia)	2 MPa (290 psig)
C	10 MPa abs (1450 psia)	10 MPa (1450 psig)
D	50 MPa abs (7200 psia)	50 MPa (7200 psig)

Minimum Pressure Limit

See graph below

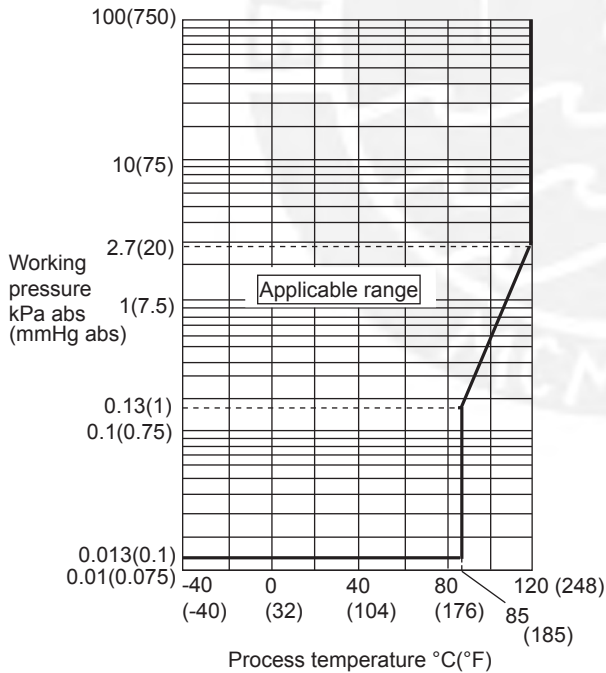


Figure 1-1. Working Pressure and Process Temperature [For EJX510A]

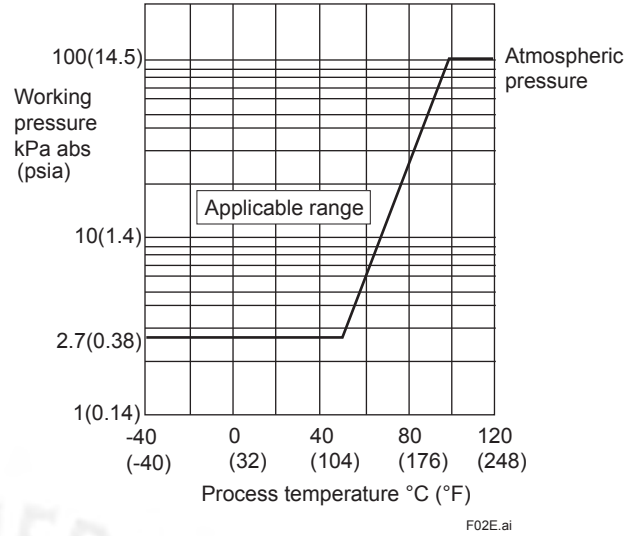


Figure 1-2. Working Pressure and Process Temperature [For EJX530A]

Supply & Load Requirements

(Output signal code D, E and J. Optional features or approval codes may affect electrical requirements.)

With 24 V DC supply, up to a 550Ω load can be used. See graph below.

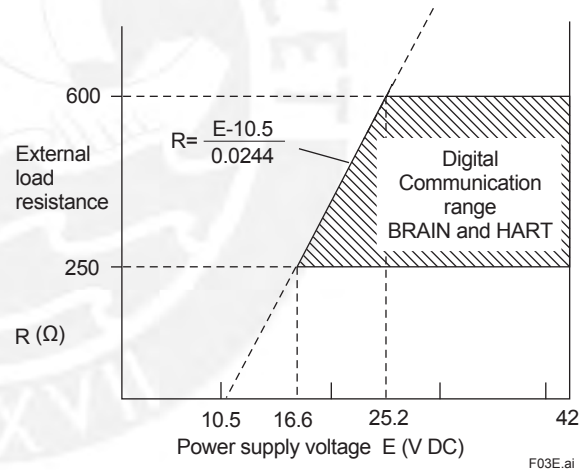


Figure 2. Relationship Between Power Supply Voltage and External Load Resistance

Supply Voltage “◇”

- 10.5 to 42 V DC for general use and flameproof type.
- 10.5 to 32 V DC for lightning protector (option code A).
- 10.5 to 30 V DC for intrinsically safe, type n, non-incendive or non-sparking type.
- Minimum voltage limited at 16.6 V DC for digital communications, BRAIN and HART

Load (Output signal code D, E and J)

- 0 to 1290Ω for operation
- 250 to 600Ω for digital communication

Communication Requirements “◇”

(Approval codes may affect electrical requirements.)

BRAIN

Communication Distance

Up to 2 km (1.25 miles) when using CEV polyethylene-insulated PVC-sheathed cables. Communication distance varies depending on type of cable used.

Load Capacitance



0.22 µF or less

Load Inductance

3.3 mH or less

Input Impedance of communicating device

10 kΩ or more at 2.4 kHz.

EMC Conformity Standards  ,  **N200**

EN61326-1 Class A, Table2 (For use in industrial locations)

EN61326-2-3

EN61326-2-5 (for PROFIBUS only)

European Pressure Equipment Directive 97/23/EC

Sound Engineering Practice (for all capsules)

With option code /PE3 (for D capsule)

 ₀₀₃₈

Category III, Module H, Type of Equipment: Pressure Accessory-Vessel, Type of Fluid: Liquid and Gas, Group of Fluid: 1 and 2

Safety Requirement Standards

EN61010-1, EN61010-2-030

- Altitude of installation site: Max. 2,000 m above sea level
- Installation category: I (Anticipated transient overvoltage 330 V)
- Pollution degree: 2
- Indoor/Outdoor use

□ PHYSICAL SPECIFICATIONS

Wetted Parts Materials

Diaphragm, Process Connector

Refer to “MODEL AND SUFFIX CODES.”

Non-wetted Parts Materials

Housing

Low copper cast aluminum alloy with polyurethane, mint-green paint (Munsell 5.6BG 3.3/2.9 or its equivalent), or ASTM CF-8M Stainless Steel

Degrees of Protection

IP66/IP67, NEMA TYPE 4X

Pipe

Polypropylene

Cover O-rings

Buna-N, fluoro-rubber (optional)

Name plate and tag

316 SST

Fill Fluid

Silicone, Fluorinated oil (optional)

Weight

Capsule A, B and C: 1.2 kg (2.6 lb)*

Capsule D: 1.4 kg (3.1 lb)*

*: Without integral indicator and mounting bracket.

Add 1.5 kg (3.3 lb) for Amplifier housing code 2.

Connections

Refer to “MODEL AND SUFFIX CODES.”

< Related Instruments >

Power Distributor: Refer to GS 01B04T01-02E or GS 01B04T02-02E

BRAIN TERMINAL: Refer to GS 01C00A11-00E

< Reference >

1. *DPHarp EX* is a registered trademark of Yokogawa Electric Corporation.
 2. FieldMate; Trademark of Yokogawa Electric Corporation.
 3. Hastelloy; Trademark of Haynes International Inc.
 4. HART; Trademark of the HART Communication Foundation.
 5. FOUNDATION Fieldbus; Trademark of Fieldbus Foundation.
 6. PROFIBUS; Registered trademark of Profibus Nutzerorganisation e.v., Karlsruhe, Germany.
- Other company names and product names used in this material are registered trademarks or trademarks of their respective owners.

MODEL AND SUFFIX CODES

Model	Suffix Codes	Description
EJX510A EJX530A	..... .....	Absolute pressure transmitter Gauge pressure transmitter
Output signal	-D -E -J -F -G	4 to 20 mA DC Output with digital communication (BRAIN protocol) 4 to 20 mA DC Output with digital communication (HART 5 protocol) 4 to 20 mA DC with digital communication (HART 5 / HART 7 protocol) (Refer to GS 01C25T01-01EN) Digital communication (FOUNDATION Fieldbus protocol, refer to GS 01C25T02-01EN) Digital communication (PROFIBUS PA protocol, refer to GS 01C25T04-01EN)
Measurement span (capsule)	A B C D	8 to 200 kPa (1.16 to 29 psi) 0.04 to 2 MPa (5.8 to 290 psi) 0.2 to 10 MPa (29 to 1450 psi) 1 to 50 MPa (145 to 7200 psi)
Wetted parts material *2	S H	<u>Process connector</u> 316L SST# Hastelloy C-276 *1# <u>Diaphragm</u> Hastelloy C-276 *1# <u>Others</u> 316L SST# Hastelloy C-276 *1#
Process connections	4 7 8 9	1/2 NPT female 1/2 NPT male G1/2 DIN 16 288 male *3 M20×1.5 DIN 16 288 male *3
—	N	Always N
—	-0	Always 0
Amplifier housing	▶ 1 3 2	Cast aluminum alloy Cast aluminum alloy with corrosion resistance properties *4 ASTM CF-8M stainless steel *5
Electrical connection	▶ 0 2 4 5 7 9 A C D	G1/2 female, one electrical connection without blind plugs 1/2 NPT female, two electrical connections without blind plugs M20 female, two electrical connections without blind plugs G1/2 female, two electrical connections with a blind plug*6 1/2 NPT female, two electrical connections with a blind plug*6 M20 female, two electrical connections with a blind plug*6 G1/2 female, two electrical connections and a 316 SST blind plug 1/2 NPT female, two electrical connections and a 316 SST blind plug M20 female, two electrical connections and a 316 SST blind plug
Integral indicator	▶ D E N	Digital indicator *7 Digital indicator with the range setting switch (push button) *8 (None)
Mounting bracket	▶ L N	316 SST 2-inch pipe mounting None
Optional Codes		<input type="checkbox"/> Optional specification

The “▶” marks indicates the most typical selection for each specification. Example: EJX530A-DAS4N-012NN/□.

*1: Hastelloy C-276 or ASTM N10276.

*2: ⚠ Users must consider the characteristics of selected wetted parts material and the influence of process fluids. The use of inappropriate materials can result in the leakage of corrosive process fluids and cause injury to personnel and/or damage to plant facilities. It is also possible that the diaphragm itself can be damaged and that material from the broken diaphragm and the fill fluid can contaminate the user’s process fluids.
Be very careful with highly corrosive process fluids such as hydrochloric acid, sulfuric acid, hydrogen sulfide, sodium hypochlorite, and high-temperature steam (150°C [302°F] or above). Contact Yokogawa for detailed information of the wetted parts material.

*3: Not applicable for combination of capsule code D and wetted parts material code H. Threads are based on the withdrawn DIN 16 288.

*4: Not applicable for electrical connection code 0, 5, 7, 9 and A. Content rate of copper in the material is 0.03% or less and content rate of iron is 0.15% or less.

*5: Not applicable for electrical connection code 0, 5, 7 or 9.

*6: Material of a blind plug is aluminum alloy or 304 SST.

*7: Not applicable for output signal code G.

*8: Not applicable for output signal code F.

The ‘#’ marks indicate the construction materials conform to NACE material recommendations per MR0175/ISO 15156. Please refer to the latest standards for details. Selected materials also conform to NACE MR0103.

■ OPTIONAL SPECIFICATIONS (For Explosion Protected type) “◇”

Item	Description	Code
Factory Mutual (FM)	FM Explosionproof Approval *1 Applicable Standard: FM3600, FM3615, FM3810, ANSI/NEMA 250 Explosionproof for Class I, Division 1, Groups B, C and D, Dust-ignitionproof for Class II/III, Division 1, Groups E, F and G, in Hazardous locations, indoors and outdoors (NEMA TYPE 4X) “FACTORY SEALED, CONDUIT SEAL NOT REQUIRED.” Temperature class: T6, Amb. Temp.: -40 to 60°C (-40 to 140°F)	FF1
	FM Intrinsically safe Approval *1*2 Applicable Standard: FM3600, FM3610, FM3611, FM3810 Intrinsically Safe for Class I, Division 1, Groups A, B, C & D, Class II, Division 1, Groups E, F & G and Class III, Division 1, Class I, Zone 0, in Hazardous Locations, AEx ia IIC Nonincendive for Class I, Division 2, Groups A, B, C & D, Class II, Division. 2, Groups F & G, Class I, Zone 2, Group IIC, in Hazardous Locations Enclosure: “NEMA TYPE 4X”, Temp. Class: T4, Amb. Temp.: -60 to 60°C (-75 to 140°F) Intrinsically Safe Apparatus Parameters [Groups A, B, C, D, E, F and G] Vmax=30 V, Imax=200 mA, Pmax=1 W, Ci=6 nF, Li=0 μH [Groups C, D, E, F and G] Vmax=30 V, Imax=225 mA, Pmax=1 W, Ci=6 nF, Li=0 μH	FS1
	Combined FF1 and FS1 *1*2	FU1
ATEX	ATEX Flameproof Approval *1 Applicable Standard: EN 60079-0:2009, EN 60079-1:2007, EN 60079-31:2009 Certificate: KEMA 07ATEX0109 X II 2G, 2D Ex d IIC T6...T4 Gb, Ex tb IIIC T85°C Db IP6X Degree of protection: IP66/IP67 Amb. Temp. (Tamb) for gas-proof : T4: -50 to 75°C (-58 to 167°F), T5: -50 to 80°C (-58 to 176°F), T6: -50 to 75°C (-58 to 167°F) Max. process Temp. for gas-proof (Tp): T4: 120°C (248°F), T5: 100°C (212°F), T6: 85°C (185°F) Max. surface Temp. for dust-proof: T85°C (Tamb: -30 to 75°C, Tp: 85°C) *3	KF22
	ATEX Intrinsically safe Approval *1*2 Applicable Standard: EN 60079-0:2009, EN 60079-11:2007, EN 60079-11:2012, EN 60079-26:2007, EN 61241-11:2006 Certificate: DEKRA 11ATEX0228 X II 1G, 2D Ex ia IIC T4 Ga, Ex ia IIIC T85°C T100°C T120°C Db Degree of protection: IP66/IP67 Amb. Temp. (Tamb) for EPL Ga: -50 to 60°C (-58 to 140°F) Maximum Process Temp. (Tp) for EPL Ga: 120°C Electrical data: Ui=30 V, Ii=200 mA, Pi=0.9 W, Ci=27.6 nF, Li=0 μH Amb. Temp. for EPL Db: -30 to 60°C *3 Max. surface Temp. for EPL Db: T85°C (Tp: 80°C), T100°C (Tp: 100°C), T120°C (Tp: 120°C)	KS21
	Combined KF22, KS21 and ATEX Intrinsically safe Ex ic *1*2 [ATEX Intrinsically safe Ex ic] Applicable Standard: EN 60079-0:2009, EN 60079-0:2012, EN 60079-11:2012 II 3G Ex ic IIC T4 Gc, Amb. Temp.: -30 to 60°C (-22 to 140°F) *3 Ui=30 V, Ci=27.6 nF, Li=0 μH	KU22

Item	Description	Code
Canadian Standards Association (CSA)	<p>CSA Explosionproof Approval *1 Certificate: 2014354 Applicable Standard: C22.2 No.0, C22.2 No.0.4, C22.2 No.0.5, C22.2 No.25, C22.2 No.30, C22.2 No.94, C22.2 No.60079-0, C22.2 No.60079-1, C22.2 No.61010-1 Explosion-proof for Class I, Groups B, C and D. Dustignition-proof for Class II/III, Groups E, F and G. When installed in Division 2, "SEAL NOT REQUIRED" Enclosure: NEMA TYPE 4X, Temp. Code: T6...T4 Ex d IIC T6...T4 Enclosure: IP66/IP67 Max.Process Temp.: T4;120°C(248°F), T5;100°C(212°F), T6; 85°C(185°F) Amb.Temp.: -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T4, -50 to 80°C(-58 to 176°F) for T5, -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T6 *3 Process Sealing Certification Dual Seal Certified by CSA to the requirement of ANSI/ISA 12.27.01 No additional sealing required Primary seal failure annunciation: at the zero adjustment screw</p>	CF1
	<p>CSA Intrinsically safe Approval **2 Certificate: 1606623 [For CSA C22.2] Applicable Standard: C22.2 No.0, C22.2 No.0.4, C22.2 No.25, C22.2 No.94, C22.2 No.157, C22.2 No.213, C22.2 No.61010-1, C22.2 No.60079-0 Intrinsically Safe for Class I, Division 1, Groups A, B, C & D, Class II, Division 1, Groups E, F & G, Class III, Division 1, Nonincendive for Class I, Division 2, Groups A, B, C & D, Class II, Division 2, Groups F & G, Class III, Division 1 Enclosure: NEMA TYPE 4X, Temp. Code: T4 Amb. Temp.: -50 to 60°C(-58 to 140°F) *3 Electrical Parameters: [Intrinsically Safe] Vmax=30V, Imax=200mA, Pmax=0.9W, Ci=10nF, Li=0 µH [Nonincendive] Vmax=30V, Ci=10nF, Li=0 µH [For CSA E60079] Applicable Standard: CAN/CSA E60079-11, CAN/CSA E60079-15, IEC 60529:2001 Ex ia IIC T4, Ex nL IIC T4 Enclosure: IP66/IP67 Amb. Temp.: -50 to 60°C(-58 to 140°F) *3, Max. Process Temp.: 120°C(248°F) Electrical Parameters: [Ex ia] Ui=30V, Ii=200mA, Pi=0.9W, Ci=10nF, Li=0 µH [Ex nL] Ui=30V, Ci=10nF, Li=0 µH Process Sealing Certification Dual Seal Certified by CSA to the requirement of ANSI/ISA 12.27.01 No additional sealing required Primary seal failure annunciation: at the zero adjustment screw</p>	CS1
	Combined CF1 and CS1 **2	CU1
IECEX Scheme	<p>IECEX Flameproof Approval *1 Applicable Standard: IEC 60079-0:2004, IEC60079-1:2003 Certificate: IECEX CSA 07.0008 Flameproof for Zone 1, Ex d IIC T6...T4 Enclosure: IP66/IP67 Max.Process Temp.: T4;120°C(248°F), T5;100°C(212°F), T6; 85°C(185°F) Amb.Temp.: -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T4, -50 to 80°C(-58 to 176°F) for T5, -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T6</p>	SF2
	<p>IECEX Intrinsically safe, type n and Flameproof Approval **2 Intrinsically safe and type n Applicable Standard: IEC 60079-0:2000, IEC 60079-11:1999, IEC 60079-15:2001 Certificate: IECEX CSA 05.0005 Ex ia IIC T4, Ex nL IIC T4 Enclosure: IP66/IP67 Amb. Temp.: -50 to 60°C(-58 to 140°F), Max. Process Temp.: 120°C(248°F) Electrical Parameters: [Ex ia] Ui=30V, Ii=200mA, Pi=0.9W, Ci=10nF, Li=0 µH [Ex nL] Ui=30V,Ci=10nF, Li=0 µH Flameproof Applicable Standard: IEC 60079-0:2004, IEC60079-1:2003 Certificate: IECEX CSA 07.0008 Flameproof for Zone 1, Ex d IIC T6...T4 Enclosure: IP66/IP67 Max.Process Temp.: T4;120°C(248°F), T5;100°C(212°F), T6; 85°C(185°F) Amb.Temp.: -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T4, -50 to 80°C(-58 to 176°F) for T5, -50 to 75°C(-58 to 167°F) for T6</p>	SU2
	Combination of Approval	Combination of KU22, FU1 and CU1 **2	V1U1

*1: Applicable for Electrical connection code 2, 4, 7, 9, C and D.

*2: Not applicable for option code /AL.

*3: Lower limit of ambient temperature is -15°C (5°F) when /HE is specified.

■ OPTIONAL SPECIFICATIONS

Item		Description	Code
Painting	Color change	Amplifier cover only ^{*14}	P□
		Amplifier cover and terminal cover, Munsell 7.5 R4/14	PR
	Coating change	Anti-corrosion coating ^{*11*14}	X2
316 SST exterior parts		316 SST zero-adjustment screw and setscrews ^{*16}	HC
Fluoro-rubber O-ring		All O-rings of amplifier housing. Lower limit of ambient temperature: -15°C (5°F)	HE
Lightning protector		Transmitter power supply voltage: 10.5 to 32 V DC (10.5 to 30 V DC for intrinsically safe type, 9 to 32 V DC for Fieldbus communication type.) Allowable current: Max. 6000 A (1×40 μs), Repeating 1000 A (1×40 μs) 100 times Applicable Standards: IEC 61000-4-4, IEC 61000-4-5	A
Status output ^{*2}		Transistor output (sink type) Rating: 10.5 to 30 V DC, 120 mA DC (max) Low level: 0 to 2 V DC	AL
Oil-prohibited use		Degrease cleansing treatment	K1
		Degrease cleansing treatment with fluorinated oilfilled capsule. Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K2
Capsule fill fluid		Fluorinated oil filled in capsule Operating temperature -20 to 80°C (-4 to 176°F)	K3
Calibration units ^{*3}		P calibration (psi unit)	D1
		bar calibration (bar unit)	(See Table for Span and Range Limits.) D3
		M calibration (kgf/cm ² unit)	D4
Output limits and failure operation ^{*4}		Failure alarm down-scale : Output status at CPU failure and hardware error is -5%, 3.2mA DC or less.	C1
		NAMUR NE43 Compliant Output signal limits: 3.8 mA to 20.5 mA	Failure alarm down-scale: Output status at CPU failure and hardware error is -5%, 3.2 mA DC or less. C2
			Failure alarm up-scale: Output status at CPU failure and hardware error is 110%, 21.6 mA or more. C3
Gold-plated diaphragm ^{*13}		Surface of isolating diaphragms are gold plated, effective for hydrogen permeation.	A1
Wired tag plate		316 SST tag plate wired onto transmitter	N4
Data configuration at factory ^{*5}		Data configuration for HART communication type	Software damping, Descriptor, Message CA
		Data configuration for BRAIN communication type	Software damping CB
Advanced diagnostics ^{*17}		Multi-sensing process monitoring • Impulse line blockage detection ^{*18} • Heat trace monitoring	DG6
European Pressure Equipment Directive ^{*15}		PED 97/23/EC Category: III, Module: H, Type of Equipment: Pressure Accessory-Vessel, Type of Fluid: Liquid and Gas, Group of Fluid: 1 and 2	PE3
Material certificate ^{*6}		Process Connector	M15
Pressure test/ Leak test certificate ^{*12}		Test Pressure: 200 kPa (29 psi) ^{*7}	Nitrogen(N ₂) Gas or Water ^{*11} Retention time: one minute
		Test Pressure: 2 MPa (290 psi) ^{*8}	
		Test Pressure: 10 MPa (1450 psi) ^{*9}	
		Test Pressure: 50 MPa (7200 psi) ^{*10}	

*1: Not applicable with color change option.

*2: Check/External indicator terminals cannot be used when this option code is specified.
Not applicable for output signal code F and G.

*3: The unit of MWP (Max. working pressure) on the name plate of a housing is the same unit as specified by option codes D1, D3, and D4.

*4: Applicable for output signal codes D, E and J. The hardware error indicates faulty amplifier or capsule.

*5: Also see 'Ordering Information'.

*6: Material traceability certification, per EN 10204 3.1 B.

*7: Applicable for capsule code A.

*8: Applicable for capsule code B.

*9: Applicable for capsule code C.

*10: Applicable for capsule code D.

*11: Pure nitrogen gas or pure water is used for oil-prohibited use (option codes K1 and K2).

*12: The unit on the certificate is always kPa/MPa regardless of selection of option code D1, D3 and D4.

*13: Applicable for wetted parts material code S.

*14: Not applicable for amplifier housing code 2 and 3.

*15: Applicable for measurement span code D. If compliance with category III is needed, specify this option code.

*16: 316 or 316L SST. The specification is included in amplifier code 2.

*17: Applicable only for output signal code E and J.

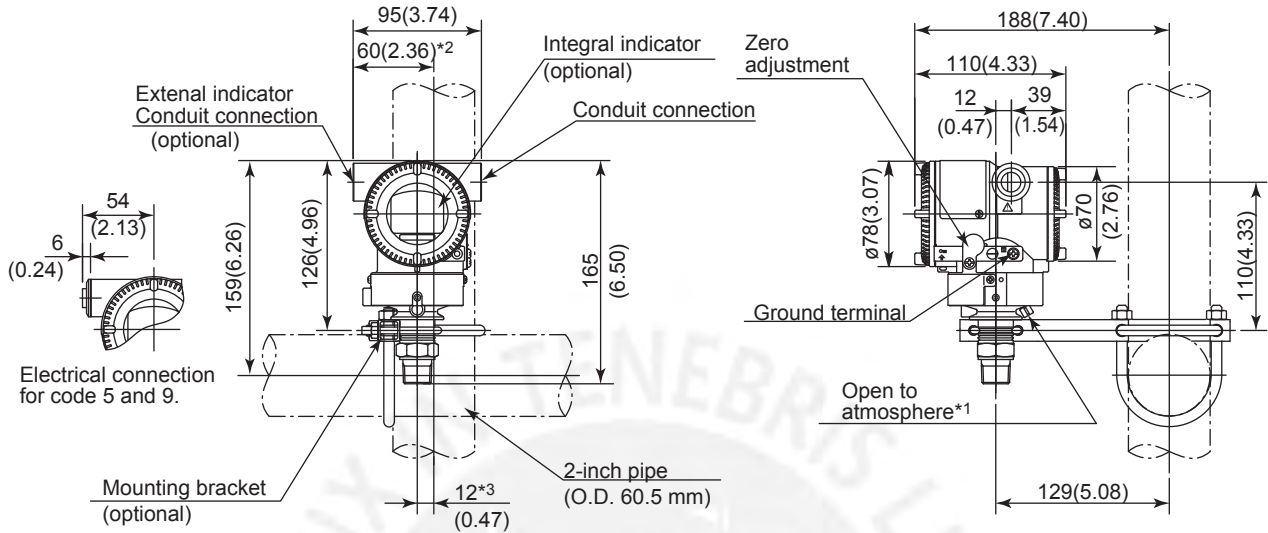
*18: The change of pressure fluctuation is monitored and then detects the impulse line blockage. See TI 01C25A31-01E for detailed technical information required for using this function.

■ DIMENSIONS

Unit: mm (approx.inch)

Model EJX510A and EJX530A

- With process connections code 7

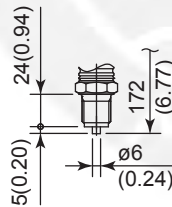


*1: Only for EJX530A whose measurement span code is A, B, or C.
 *2: 58 mm (2.28 inch) for measurement span code D.
 *3: 11 mm (0.43 inch) for measurement span code D.

- With Process connections code 4

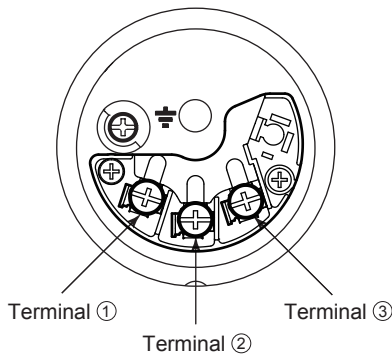


- With Process connections code 8 and 9



F04E.ai

- Terminal Configuration



- Terminal Wiring

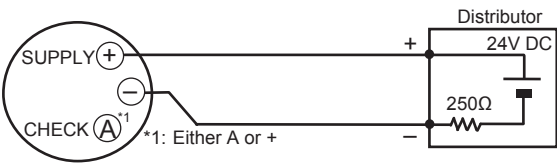
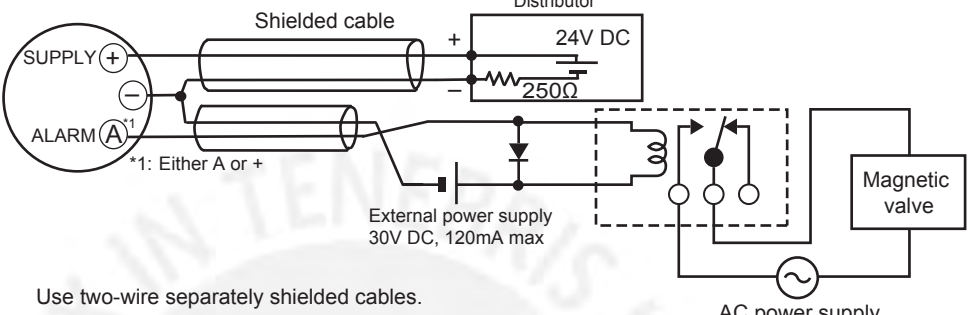
SUPPLY	+	①	] Power supply and output terminals
	-	②	
CHECK	+	③	] External indicator (ammeter) terminals ^{*4,5}
or	-	②	
ALARM	+	③	] Status contact output terminals ^{*5}
	-	②		(when /AL is specified)
			⏏ Ground terminal

*4: When using an external indicator or check meter, the internal resistance must be 10 Ω or less. A check meter or indicator cannot be connected when /AL option is specified.

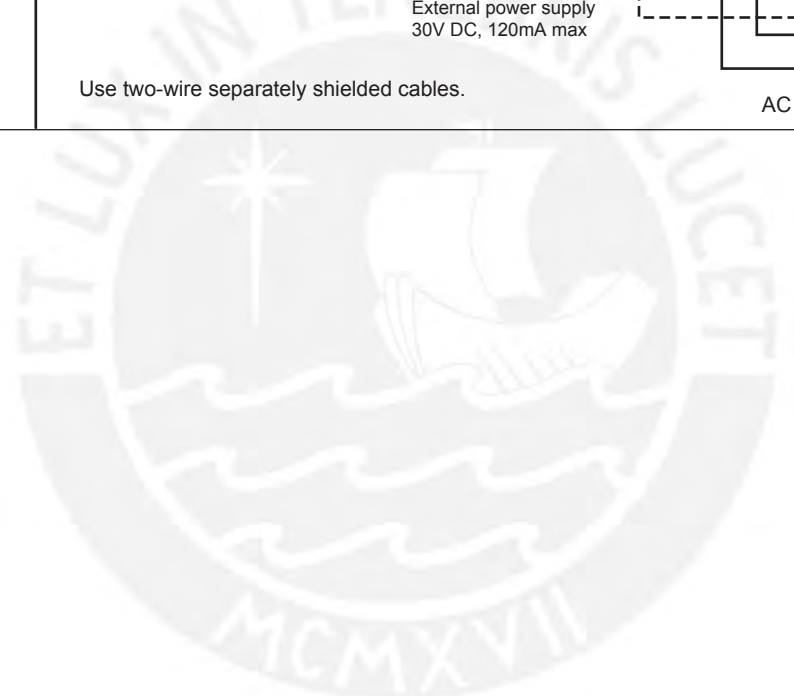
*5: Not available for FOUNDATION Fieldbus and PROFIBUS PA communication types.

F05E.ai

• Wiring Example for Analog Output and Status Output

Connection	Description
<p>Analog output</p>	<p>EJX electrical terminal</p> 
<p>Analog and status output (when /AL is specified)</p> <p>If shield cable is not used, communication is not possible.</p>	<p>EJX electrical terminal</p>  <p>Use two-wire separately shielded cables.</p>

F06E.ai



< Ordering Information > “◇”

Specify the following when ordering

For output signal code **-J**, refer to GS 01C25T01-01EN.

1. Model, suffix codes, and option codes
2. Calibration range and units
 - 1) Calibration range can be specified with range value specifications up to 5 digits (excluding any decimal point) for low or high range limits within the range of -32000 to 32000. When reverse range is designated, specify Lower Range Value (LRV) as greater than Upper Range Value (URV).
 - 2) Specify only one unit from the table, 'Factory Settings' when shipped.'
3. Display scale and units (for transmitters equipped with integral indicator only)

Specify either 0 to 100 % or engineering unit scale and 'Range and Unit' for engineering units scale: Scale range can be specified with range limit specifications up to 5 digits (excluding any decimal point) for low or high range limits within the range of -32000 to 32000. The unit display consists of 6-digit, therefore, if the specified unit is longer than 7 characters excluding '/', the first 6 characters will be displayed on the unit display.
4. TAG NO (if required)

Specified characters (up to 16 characters for BRAIN, 22 characters for HART) are engraved on the stainless steel tag plate fixed on the housing.
5. SOFTWARE TAG (for HART only, if required)

Specified characters (up to 32 characters) are set as "Tag" (the first 8 characters) and "Long tag"*1 (32 characters) in the amplifier memory. Use alphanumeric capital letters.

When the "SOFTWARE TAG" is not specified, specified "TAG NO" is set as "Tag" (the first 8 characters) and "Long tag"*1 (22 characters) in the amplifier memory.

*1: applicable only when HART 7 is selected.
6. Other factory configurations (if required)

Specifying option code **CA** or **CB** will allow further configuration at factory. Following are configurable items and setting range.

[/CA : For HART communication type]

 - 1) Descriptor (up to 16 characters)
 - 2) Message (up to 30 characters)
 - 3) Software damping in second (0.00 to 100.00)

[/CB : For BRAIN communication type]

 - 1) Software damping in second (0.00 to 100.00)

< Factory Setting > “◇”

Tag number	As specified in order
Software damping *1	'2.00 s' or as specified in order
Calibration range lower range value	As specified in order
Calibration range upper range value	As specified in order
Calibration range units	[EJX530A] Selected from mmH ₂ O, mmH ₂ O(68°F), mmAq ^{*2} , mmWG ^{*2} , mmHg, Pa, hPa ^{*2} , kPa, MPa, mbar, bar, gf/cm ² , kgf/cm ² , inH ₂ O, inH ₂ O(68°F), inHg, ftH ₂ O, ftH ₂ O(68°F) or psi. (Only one unit can be specified) [EJX510A] Torr, Pa abs, hPa abs ^{*2} , kPa abs, MPa abs, mbar abs, bar abs, kgf/cm ² abs, mmH ₂ O abs, mmH ₂ O abs(68°F), mmHg abs, inH ₂ O abs, inH ₂ O abs(68°F), inHg abs, ftH ₂ O abs, ftH ₂ O abs(68°F), psia, atm.
Display setting	Designated value specified in order. (% , or user scaled value.)

- *1: To specify these items at factory, /CA or /CB option is required.
- *2: Not available for HART protocol type.

< Material Cross Reference >

ASTM	JIS
grade 316	SUS316
grade 316L	SUS316L
grade 304	SUS304