

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA BALANZA DE
PRESIÓN (BALANZA DE PESO MUERTO) EMPLEANDO EL METODO
DE FLOTACIÓN CRUZADA”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO MECÁNICO

ZAVALAGA RIVERA, DWIGHT MICHAEL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

LIMA – PERÚ

2010

PROLOGO

Para el desarrollo del presente trabajo se tomo en cuenta la importancia que se le da a la calibración en la magnitud de presión en la actualidad, al igual que las mejoras en el tema de las mediciones, la descripción del instrumento así como su aplicación y efectos de sus factores de influencia, se explican con detalle hasta el Capítulo 6.

Se detallan los términos metrologicos que se emplean en la actualidad y que son producto de análisis; el método de trabajo se explica a partir del Capítulo 9 así como también se calcula las formulas empleadas para la estimación del mensurando con su incertidumbre.

Los cálculos obtenidos se darán en los Capítulos finales y las trazabilidades de los instrumentos empleados se adjuntaran en los apéndices de la presente tesis.

Mediante el presente medio se agradece al Laboratorio de Fuerza y Presión del Servicio Nacional de Metrología – INDECOPI por su profesionalismo al exponerme los temas de influencia en la calibración de instrumentos de presión, así también un agradecimiento a los Laboratorios de:

Energía de la facultad de ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Masa y Presión de la empresa Metrológica e Ingeniería Lino S.A.C. por la ayuda brindada

INDICE

PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA BALANZA DE PRESIÓN (BALANZA DE PESO MUERTO) EMPLEANDO EL METODO DE FLOTACIÓN CRUZADA

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 2: IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN.....	3
2.2 Tipos de Presión.....	6
2.3.1 Presión atmosférica.....	6
2.2.2 Presión atmosférica normalizada.....	6
2.2.3 Presión barométrica.....	6
2.2.4 Presión relativa.....	6
2.2.5 Presión relativa normalizada.....	7
2.2.6 Presión diferencial.....	7
2.3 Alcances de Vacío.....	8
2.3.1 Vacío relativo.....	8
2.3.2 Cero absoluto.....	8
2.3.3 Presión absoluta.....	8
2.3.4 Vacío absoluto.....	8
2.3.5 Bajo Vacío.....	9
2.3.6 Medio Vacío.....	9
2.3.7 Alto Vacío.....	9
2.3.8 Ultra Alto Vacío.....	9
2.4 Clasificación de Manómetros.....	10
2.4.1 Clasificación por su calidad Metrológica.....	10
2.5.1.1 Patrón de Referencia.....	10
2.4.2.2 Patrón de Trabajo	10

2.4.2.3 Instrumento de Medición	11
2.4.2.4 Otros tipos de patrones.....	11
2.4.2 Clasificación por su principio de operación	12
2.4.3.1 Manómetros Primarios.....	13
2.4.2.2 Manómetros Secundarios	14
CAPITULO 3: BALANZA DE PRESIÓN	16
3.1 Descripción	19
3.2 Tipos de ensamble Pistón Cilindro.....	21
3.2.1 Tipo Simple.....	22
3.2.2 Tipo Reentrante.....	23
3.2.3 Tipo Huelgo Controlado	25
3.3 Balanza tipo esfera	25
CAPITULO 4: MEDICIÓN DE LA PRESIÓN CON BALANZA DE PRESIÓN.....	27
4.1 Modelo analítico para balanzas de presión de alta exactitud	28
4.1.1 Correcciones por flotación de las pesas	30
4.1.2 Correcciones por empuje del fluido hidrostático sobre el pistón	31
4.1.3 Corrección por tensión superficial	33
4.1.4 Corrección por dilatación térmica	34
4.1.5 Corrección por coeficiente de presión	35
4.1.6 Corrección por la diferencia de alturas de fluido manométrico	36
4.2 Modelo analítico para balanzas de presión industriales	36
4.3.1 Presión Nominal.....	37

CAPITULO 5: CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE UNA BALANZA DE	
PRESIÓN.....	39
5.1 Características Metrológicas de una Balanza de Presión	39
5.1.1 Alcance de medición	39
5.1.1.1 Límite superior del alcance de medición	39
5.1.1.2 Límite inferior de medición	39
5.1.2 Ecuación de conversión	39
5.1.3 Área efectiva	39
5.1.4 Posición de trabajo del pistón	40
5.1.5 Velocidad de caída del pistón	40
5.1.6 Tiempo de rotación libre del pistón	40
5.2 Propiedades Metrológicas de una Balanza de Presión	40
5.3.1 Umbral de Movilidad	40
5.2.2 Repetibilidad	40
5.2.3 Método de indicación de una balanza de presión	40
5.3 Términos Generales en la Medición de Presión	41
5.3.1 Valor verdadero de presión	41
5.3.2 Valor convencionalmente verdadero de presión	41
5.3.3 Incertidumbre de la medición de presión	41
5.3.4 Error de la presión medida	41
5.3.5 Error máximo tolerado	42
5.3.6 Clase de exactitud.....	42
5.3.7 Calibración	42
5.3.8 Sensibilidad de la flotación cruzada	42
5.4 Condiciones Generales	43
4.4.1 Condiciones de operación específicas	43

5.4.2 Condiciones de referencia	43
5.5 Niveles.....	43
5.5.1 Nivel de operación del pistón	43
5.5.2 Nivel de referencia de presión	43
5.6 Descripción del Instrumento	44
5.6.1 Generalidades	44
5.7 Componentes principales	44
5.7.1 El ensamble pistón–cilindro	45
5.7.2 La conexión del ensamble pistón–cilindro.....	45
5.7.3 La base de la balanza	45
5.8 Componentes auxiliares	45
5.9 Unidad de medición	46
CAPITULO 6: REQUISITOS METROLOGICOS.....	47
6.1 División del Alcance de Medición.....	47
6.2 Clase de Exactitud	47
6.3 Errores Máximos Tolerados	47
6.4 Incertidumbre de una Balanza de Presión	48
6.4.1 Incertidumbres individuales	48
6.4.2 Incertidumbres que son el resultado de otras magnitudes de influencia.....	49
6.4.3 Incertidumbre del total de la balanza de presión	50
6.5 Tiempo de Rotación Libre del Pistón	50
6.6 Velocidad de Caída del Pistón	51
6.7 Ajuste de la Masa de las Pesas.....	51

CAPITULO 7: REQUISITOS TÉCNICOS	52
7.1 Condiciones Ambientales	52
7.2 Condiciones de la Balanza de Presión	52
7.3 Medios para Observar y Determinar el Nivel Vertical del Pistón	52
7.4 Dispositivo de Indicación de Nivel	53
7.5 Posición de la Superficie del Portapesas y el Pistón.....	53
7.6 Requisitos para las Pesas	53
7.6.1 Masa total de las pesas	53
7.6.2 Graduación de las pesas	53
7.6.3 Masa de la primera pesa	54
7.6.4 Pesas de balanzas de presión de exactitud más alta	54
7.6.5 Formas y dimensiones de pesas de masa igual	54
7.6.6 Carga de las pesas.....	54
7.6.7 Material de las pesas	55
7.7 Material del Ensamble Pistón-Cilindro	55
7.8 Fugas en el Sistema de Presión de una Balanza de presión	55
7.9 Marcas	55
CAPITULO 8: CONCEPTOS METROLOGICOS.....	56
8.1 Magnitud	56
8.2 Medición.....	57
8.3 Mensurando	57
8.4 Metrología	57
8.5 Principio de medida	57
8.6 Método de medida	58
8.7 Procedimiento de medición.	58

8.8 Resultado de medición.	58
8.9 Exactitud de medida.	59
8.10 Precisión de medida.	59
8.11 Error de medida.	60
8.12 Repetibilidad de medida.	60
8.13 Reproducibilidad de medida.	60
8.14 Incertidumbre de medida.	60
8.15 Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida.	61
8.16 Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida.	61
8.17 Presupuesto de incertidumbre.....	61
8.18 Incertidumbre expandida de medida.	62
8.19 Intervalo de cobertura.	62
8.20 Nivel de confianza.	62
8.21 Calibración.	63
8.22 Trazabilidad metrológica.	63
8.23 Validación.	64
CAPITULO 9: CALIBRACIÓN DE BALANZAS DE PRESIÓN.....	66
9.1 Principio funcional de una balanza manométrica	70
9.2 Equipo de Calibración	73
9.3 Pruebas y Condiciones de la Calibración	74
9.4 Pruebas de Cumplimiento de los Requisitos Técnicos	76
9.4.1 Instalación inicial.....	76
9.4.2 Dispositivos para observar el nivel vertical del pistón	76
9.4.3 Instrumento indicador de nivel	78
9.4.4 Perpendicularidad del eje del pistón y el portapesas	78

9.5.5 Prueba de fugas en la balanza	78
9.5 Prueba para el Cumplimiento de los Requisitos Metrológicos	78
9.5.1 Tiempo de la rotación Libre del pistón	78
9.5.2 Velocidad de caída del pistón	79
9.5.3	80
9.5.4	80
9.5.5 Determinación de la masa del pistón y de las pesas individual.....	80
9.5.6 Determinación del área efectiva.....	80
9.5.6.1 Método de determinación.....	80
9.5.6.2 Requisitos Generales.....	81
9.6 Instalación de los equipos	82
9.7 Generación de la presión	84
9.8 Proceso de calibración.....	84
9.9 Toma y tratamiento de datos	86
9.10 Determinación de la presión ejercida por cada pesa	91
CAPITULO 10: CALCULO DE INCERTIDUMBRES.....	92
10.1 Valor certificado de la masa (m_C).....	94
10.2 Valor certificado de la masa (m_p).....	94
10.3 Deriva de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón de la balanza de presión a calibrar	95
10.4 Deriva de la masa de las pesas colocadas sobre el pistón de la balanza de presión patrón	97
10.6 Densidad del aire	100
10.6 Densidad de las pesas (ρ_{m_C}) y el pistón ($\rho_{m_C \text{ Piston}}$)	117

10.7 Densidad de las pesas (ρ_{mP}) y el pistón ($\rho_{mP\ Piston}$)	102
10.8 Gravedad Local.....	122
10.9 Volumen del pistón de la balanza de presión a calibrar sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión	123
10.10 Volumen del pistón de la balanza de presión patrón sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión	125
10.11 Densidad del Fluido	126
10.12 Tensión superficial	127
10.13 Longitud de la circunferencia del pistón de la balanza de presión a calibrar	128
10.14 Longitud de la circunferencia del pistón de la balanza de presión patrón	128
10.15 Área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza patrón	129
10.16 Deriva del área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza patrón	130
10.17 Coeficiente de dilatación térmica del ensamble pistón cilindro de la balanza de presión a calibrar	131
10.18 Coeficiente de dilatación térmica del ensamble pistón cilindro de la balanza de presión patrón	132
10.19 Temperatura del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión a calibrar ...	134
10.20 Temperatura del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión patrón	113
10.21 Coeficiente de deformación elástica lineal del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión patrón	113
10.22 Coeficiente de deformación elástica cuadrática del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión patrón	114
10.23 Presión nominal	114

10.24 Diferencia de altura entre los niveles de referencia de las balanzas	115
10.25 Determinación de la incertidumbre de A_{oC} por regresión lineal	116
10.26 Determinación del cociente de deformación elástica	116
10.27 Incertidumbre del coeficiente de deformación elástica lineal	117
10.28 Incertidumbre del coeficiente de deformación elástica cuadrática	118
10.29 Calculo de la incertidumbre de la presión generada por el conjunto pistón y pesas	123
10.30 Validación del método	124
 CAPITULO 10: DATOS Y RESULTADOS.....	127
 CONCLUSIONES.....	148
 BIBLIOGRAFIA.....	151
 PLANOS.....	154
 Anexo A CÁLCULO DEL ÁREA EFECTIVA A PRESIÓN NULA Y TEMPERATURA DE REFERENCIA Y DEL COEFICIENTE DE DEFORMACIÓN CON LA PRESIÓN	
Anexo B DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE LAS PESAS Y DEL ELEMENTO DE FLOTACIÓN	
Anexo C CALCULO DE LA ACELERACIÓN LOCAL DE LA GRAVEDAD	
Anexo D CALCULO DE LA DENSIDAD DEL AIRE	
Anexo E TRAZABILIDADES	

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La presión es una de las magnitudes de mayor uso en la industria, dado que con ella es posible determinar diferentes variables de proceso, es por eso que surge la pregunta; ¿Cómo sabe usted que la variable de proceso es realmente lo que indica su instrumento de medición? .La única forma para saber si su lectura es correcta, es si el instrumento esta calibrado adecuadamente, por personal capacitado, con un patrón de referencia reconocido y que este patrón sea trazable a los patrones nacionales mantenido por el centro nacional de metrología.

Calibrar es comparar la lectura de mi instrumento contra un patrón, comparar es medir, pero medir no es solamente el hecho de tomar una lectura y registrarla; medir es todo un conjunto de operaciones que implica al menos responder: qué mensurando deseo conocer, cuál es su aplicación, con qué magnitud le asignamos un valor, qué equipo (instrumento de medición o medida materializada) debemos utilizar, qué exactitud requerimos, qué método o procedimiento de medición voy a utilizar y por supuesto cómo voy a tomar y registrar la lectura, qué correcciones necesito aplicar, cómo reportaremos el resultado, etc.

Es por eso que surge la necesidad de contar con un procedimiento de calibración para un instrumento de medición de presión denominado “balanza de presión” o también conocido como balanza de peso muerto, que en la jerarquía de patrones de presión se consideran como uno de los instrumentos de más alta exactitud. Los resultados obtenidos bajo este procedimiento serán comparados con los resultados obtenidos por el Servicio Nacional de Metrología del Perú – INDECOPI (SNM-INDECOPI) para demostrar su validez.

Las normas, instructivos, boletines, investigaciones, etc.; que se emplearon para desarrollar este procedimiento se detallan con más cuidado en la parte de referencias, este procedimiento solo es válido para balanzas de presión manométricas que comprenden un conjunto pistón cilindro simple con un alcance de 0,1 MPa a 500 MPa.

CAPITULO 2

IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN

2.1.- Importancia de la medición de la presión.

La medición de presión en el ámbito industrial es muy amplia y cubre campos diversos como la medición de la presión barométrica en el campo de la meteorología, la medición de presión diferencial en cuartos estériles o la medición de presión en autoclaves para el proceso de esterilización dentro de la industria farmacéutica, bioquímica o alimenticia, la medición de vacío en los procesos de liofilización de alimentos o medicamentos, en la producción de diamante sintético para la fabricación de maquinas herramientas, para el control de nivel de líquidos en tanques de abastecimiento, o la medición de presión como una propiedad termodinámica en centros de investigación.

En términos generales podemos decir que la presión es una de las magnitudes mas necesarias y utilizadas en la industria, presentando una gran diversidad de alcances de medición, clases de exactitud, tipos de sensores e inclusive una gran cantidad de unidades utilizadas frecuentemente por su aplicación, por ejemplo mmHg en el ámbito de la medicina para expresar la presión arterial o la presión atmosférica o mmH₂O para expresar presiones diferenciales.

En la medición de presión existen un gran número de equivalencias de unidades (tabla 1.1). Esto causa muchos problemas en el uso de la magnitud, tanto para gente con experiencia, como para principiantes. Afortunadamente, el empleo de

esta gran variedad de unidades de medida de presión se está disminuyendo debido, principalmente a que se está haciendo obsoleto y tiende a desaparecer a favor de las unidades de presión del Sistema Internacional de unidades (SI): pascal (Pa) y bar (temporalmente).

La magnitud de presión se expresa en la unidad derivada de nombre pascal, con símbolo Pa que se expresa en unidades base es igual a $kg * m^{-1} * s^{-2}$, o bien expresada en otras unidades del SI como $\frac{N}{m^2}$.

TABLA 2.1

TABLA DE CONVERSION DE UNIDADES DE PRESION										
unidad	psi	kPa	kg/cm ²	pulg Hg	in Hg	mm Hg	Atmósferas	bar	mbar	MPa
psi	1	6,894757	0,07030696	2,03602	2,03602	51,71486	0,068046	0,06894757	68,94757	0,00689
kPa	0,1450377	1	0,01019716	0,2952997	0,2952997	7,50061	0,009669235	0,01	10	0,001
kg/cm ²	14,223343	98,06694	1	28,95901	28,95901	735,5588	0,967841596	0,98066494	980,66494	0,09806
pulg Hg	0,4911542	3,386389	0,0345316	1	1	25,4	0,0334211	0,03386389	33,86389	0,003386
in Hg	0,4911542	3,386389	0,0345316	1	1	25,4	0,0334211	0,03386389	33,86389	0,003386
mm Hg	0,0193368	0,1333225	0,00135951	0,039370079	0,039370079	1	0,0013157895	0,001333225	1,333225	0,00013
Atmósferas	14,696	101,32535	1,033231	29,9213	29,9213	760	1	1,0132535	1013,2535	0,1013
bar	14,5038	100	1,019716	29,53	29,53	750,0626	0,986923	1	1000	0,1
mbar	0,0145038	0,1	0,001019	0,02953	0,02953	0,75006	0,00099	0,001	1	0,0001
MPa	145,038	1000	10,197	295,299	295,299	7500,61	9,669	10	10000	1

2.2.- Tipos de Presión

2.2.1.- Presión atmosférica: presión que ejerce la atmósfera que rodea la tierra sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella. La presión atmosférica cambia con la altitud, a mayor altitud menor presión atmosférica, un aumento en altitud de 1000 m representa una disminución de presión atmosférica de aproximadamente 100 hPa.

2.2.2.- Presión atmosférica normalizada: presión ejercida por la atmósfera bajo condiciones normalizadas, igual a 1 013,25 hPa (760 mmHg). La cual idealmente se presenta a un altitud de 0 m.s.n.m. (sobre el nivel medio del mar), temperatura ambiente de 20 °C, humedad de 65 %HR y densidad del aire de 1,2 kg/m³.

2.2.3.- Presión barométrica: presión atmosférica local más una corrección por la altitud geopotencial local. La presión barométrica oscila alrededor de la presión atmosférica normalizada (1 013,25 hPa).

2.2.4.- Presión relativa: también conocida como presión positiva o manométrica (en inglés gauge pressure). Presión mayor a la presión atmosférica local, medida con referencia a la presión atmosférica.

2.2.5.- Presión relativa normalizada: también conocida como presión a referencia constante o referencia sellada. Presión medida con referencia a la presión atmosférica normalizada de 1013,25 hPa.

2.2.6.- Presión diferencial: es la presión que mide la diferencia entre dos presiones A-B, la presión relativa y vacío relativo son ejemplos de presión diferencial cuando la presión B es igual a la presión atmosférica local.

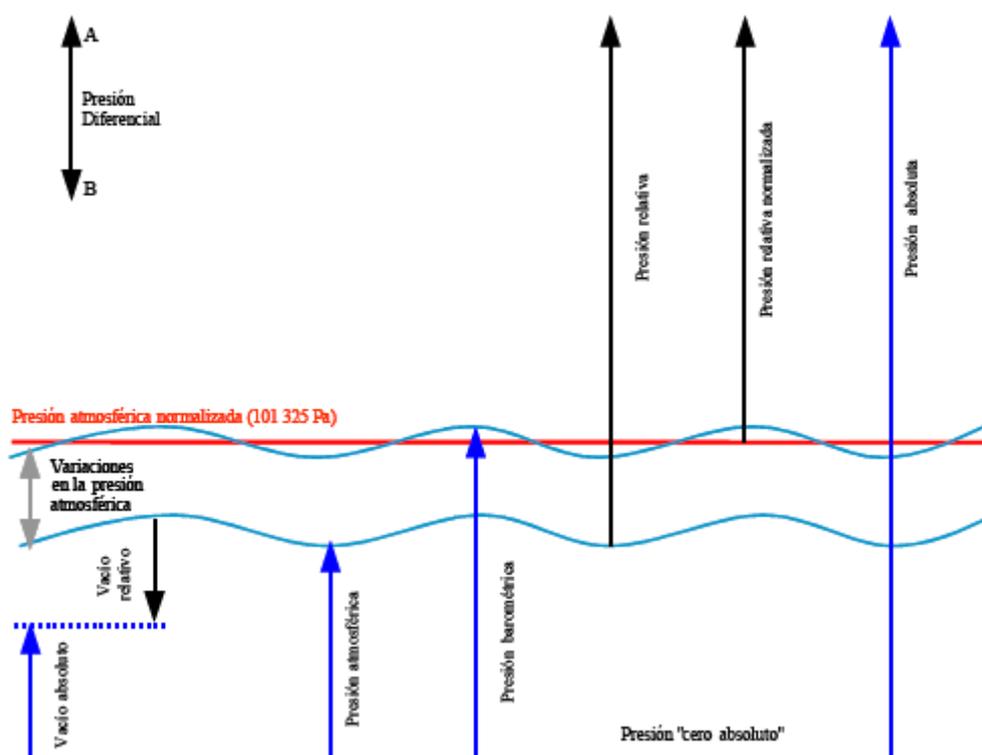


Figura 1.1 Tipos de presión

2.3.- Alcances de Vacío

2.3.1.- Vacío relativo: también conocida como presión negativa o vacío negativo (en inglés gauge vacuum). Presión menor a la presión atmosférica local, medida con respecto a la presión atmosférica.

2.3.2.- Cero absoluto: presión nula que se obtendría en el caso ideal de la ausencia total de moléculas.

2.3.3.- Presión absoluta: presión que se mide respecto a la presión de cero absoluto, la presión atmosférica es un ejemplo de presión absoluta.

2.3.4.- Vacío absoluto: vacío que se mide con respecto al cero absoluto, como una presión absoluta de gas, menor a la presión atmosférica.

2.3.5.- Bajo vacío: (LV) del inglés low vacuum, presión absoluta de gas en el alcance de 100 kPa a 100 Pa.

2.3.6.- Medio vacío: (MV) del inglés medium vacuum, presión absoluta de gas en el alcance de 100 Pa a 0,1 Pa.

2.3.7.- Alto vacío: (HV) del inglés high vacuum, presión absoluta de gas en el alcance de 0,1 Pa a 10 μ Pa.

1.3.8.- Ultra alto vacío: (UHV) del inglés ultra high vacuum, presión absoluta de gas menor a $10 \mu\text{Pa}$.

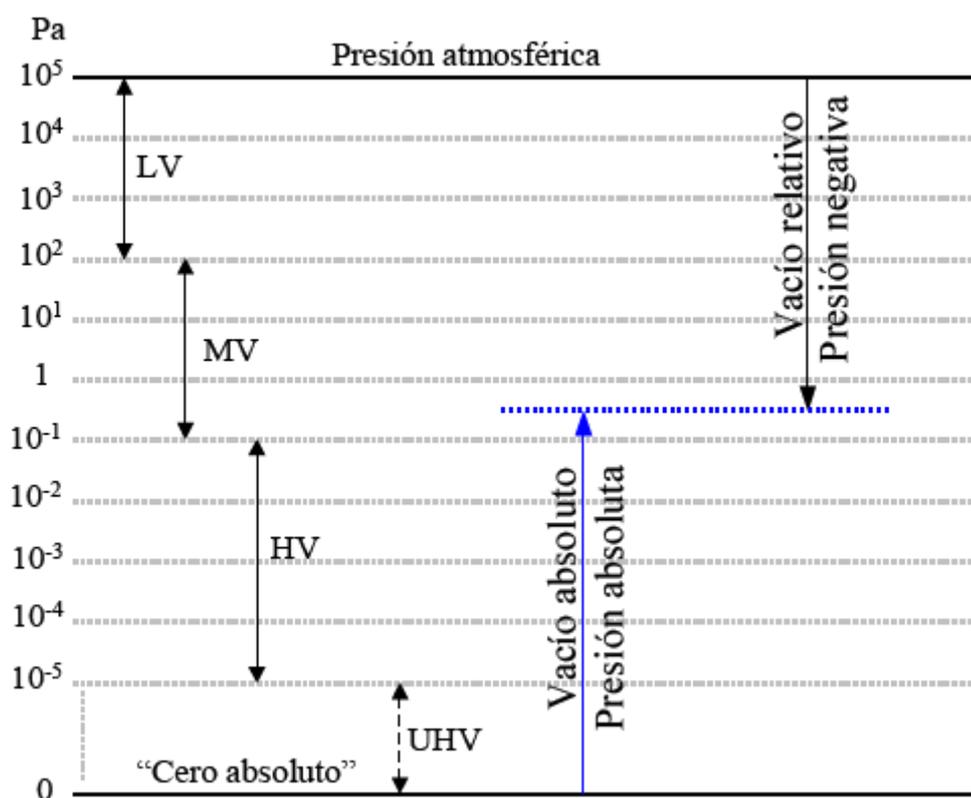


Figura 1.2 Alcance de Vacío

2.4.- Clasificación de Manómetros

Los medidores de presión se pueden clasificar de acuerdo a su principio de operación y de acuerdo a su calidad metrologica. Por su principio de operación se pueden clasificar en primarios y secundarios; de acuerdo a su calidad metrologica se pueden clasificar en patrones (primario, secundario, de referencia, viajero, de trabajo) e instrumentos de medición.

2.4.1.- Clasificación por su calidad Metrologica.

Entre los instrumentos de medición existen algunos que por su clase de exactitud e incertidumbre se utilizan como patrones para calibrar y dar trazabilidad a las mediciones. En un laboratorio de metrología se utilizan básicamente dos tipos de patrones, patrones de referencia y patrones de trabajo, los cuales pueden ser indistintamente instrumentos primarios y secundarios.

2.4.1.1.- Patrón de Referencia.

Patrón, en general de la más alta calidad metrologica disponible en un lugar dado o en una organización determinada del cual se derivan las mediciones realizadas en dicho lugar.

2.4.1.2.- Patrón de Trabajo.

Patrón que es utilizado rutinariamente para calibrar o verificar medidas materializadas, instrumentos de medición o materiales de referencia. Usualmente, este patrón es calibrado con un patrón de referencia.

2.4.1.3.- Instrumento de Medición.

Dispositivo destinado a ser utilizado para hacer mediciones solo o en conjunto con otros complementarios. Dentro de esta categoría se encuentran:

- Instrumento (de medición) registrador: aquel que proporciona registro de la indicación.
- Instrumento (de medición) indicador: aquel que muestra una indicación.
- Instrumento (de medición) totalizador: aquel que determina el valor de un mensurando realizando la suma de valores parciales del mensurando.

2.4.1.4.- Otros tipos de patrones

Existen otros tipos de patrones que se distinguen por su calidad metrologica o por su uso especial.

Generalmente un patrón primario es un instrumento primario que tiene la mas alta calidad metrologica en la magnitud referida (no puede ser calibrado por otro instrumento de la misma magnitud, puesto que no existe otro instrumento mejor).

En el caso de presión, que es una magnitud derivada, el patrón primario debe estar calibrado de manera primaria, esto quiere decir que se tiene que tener trazabilidad a metrologia de masas (para conocer la fuerza que puede generar) y a metrologia dimensional (para conocer el área efectiva del ensamble pistón – cilindro). El patrón secundario generalmente también es un

instrumento primario que tiene trazabilidad a un patrón primario de la misma magnitud.

2.4.2.- Clasificación por su principio de operación.

Los instrumentos para medición de presión pueden clasificarse en dos grandes grupos: manómetros primarios y manómetros secundarios. Por su construcción, los manómetros secundarios se clasifican en mecánicos, electrónicos y especiales.

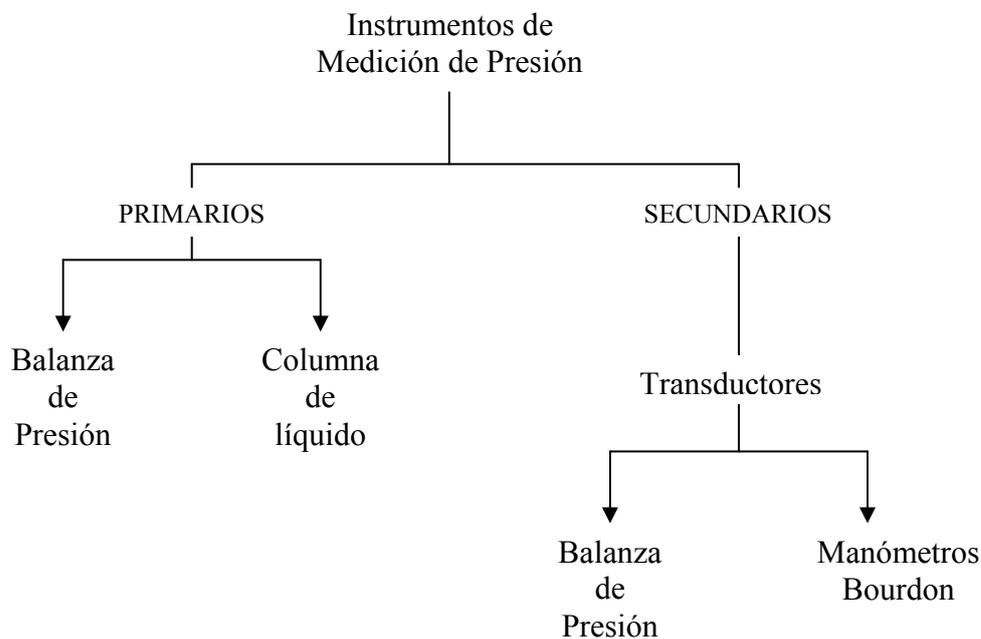


Fig. 2.3 Clasificación de manómetros por su principio de operación

2.4.2.1.- Manómetros Primarios.

Son aquellos que por su construcción miden presión en término de las magnitudes fundamentales: masa, longitud y tiempo. Los dos ejemplos de medidores primarios de presión son las balanzas de presión (o balanzas de pesos muertos o manómetros de pistón) y las columnas de líquido (de mercurio, de agua o de aceite, comúnmente).



Fig. 2.4.- Balanzas de presión (balanzas de pesos muertos o manómetro de pistón)



Fig. 2.5.- Manómetros de columna.

2.4.2.2.- Manómetros Secundarios.

Son aquellos que utilizan alguna propiedad que cambia uniformemente con la presión, tal como: una deformación elástica, una diferencia de potencial eléctrico, una señal magnética, etc. La dependencia de la presión con la propiedad manométrica se determina mediante la calibración.



Fig. 2.6.- Manómetro de deformación elástica.

Para garantizar que las mediciones de presión realizadas en los procesos sean adecuadas y confiables, es importante que el resultado de cada medición y/o el valor del patrón puedan ser relacionados a referencias determinadas (patrones nacionales), por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas teniendo incertidumbres determinadas.

Estas comparaciones con incertidumbres determinadas son las calibraciones y mediante el análisis de los factores de diseño mecánico que están involucrados en el

proceso de calibración de instrumentos de presión, podemos asegurar la confianza en las mediciones obtenidas, así como reducir la dispersión de las lecturas tomadas, disminuir el tiempo de calibración y mejorar el valor promedio de las lecturas (reducir el error).

Para realizar la medición de presión se pueden utilizar manómetros, balanzas de presión o columnas de líquido. Tomando en consideración la estabilidad, repetibilidad y exactitud, el instrumento más adecuado para la calibración de medidores de presión son las balanzas de presión.

CAPITULO 3

BALANZA DE PRESIÓN.

A finales del siglo XVIII, estudios de la compresibilidad de los fluidos proveyeron el estímulo inicial para los primeros experimentos de alta presión que demandan medición de la presión exacta. Sin embargo, no fue hasta principios del siglo XIX que aparecieron en uso las primeras balanzas de presión rudimentarias. Los mejores maquinados de pistones y cilindros que fueron llevados a cabo a finales del siglo XIX para las balanzas de presión, las han dejado prácticamente sin cambios hasta nuestros días. Estas balanzas no tienen material de empaque alrededor del pistón, haciendo que el pistón gire libremente dentro del cilindro y resultando en un importante incremento en la sensibilidad. Mas recientemente, se han realizado innovaciones a las balanzas para lograr una gama mas amplia del alcance de medición cubierto por estas, que van desde 1 kPa hasta 3 GPa.

Como un método fundamental de medición de presión, la exactitud de las balanzas de presión es insuperable (excepto a la presión atmosférica, donde los instrumentos de columna de mercurio son superiores). Además, las balanzas de presión tienen muchas ventajas prácticas, siendo portátiles y robustas, y son capaces de medir en un amplio alcance de medición.



Fig. 31.- Balanza de presión TGB BPM 700K

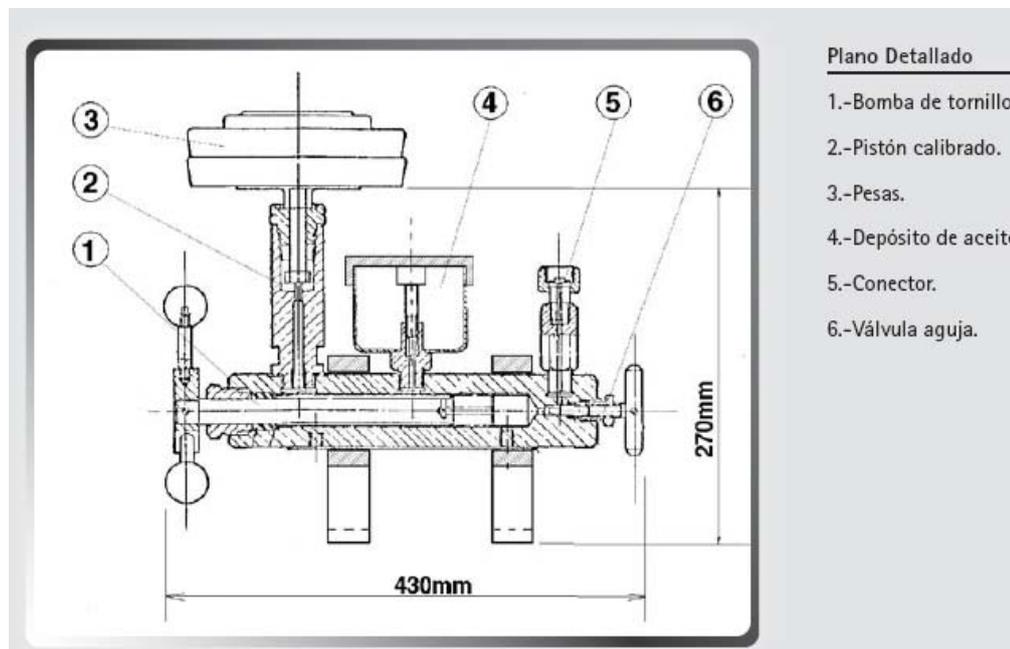


Fig. 3.2- Esquema de la balanza de presión TGB BPM 700K

La esencia de una balanza de presión es el ensamble pistón cilindro. Estos ensambles son maquinados con tolerancias muy cerradas y terminados en forma hasta cierto punto artesanal antes de ser montados verticalmente. La presión generada en una

balanza de presión es calculada de la relación entre la fuerza generada por pesas y el área en la cual es aplicada.

$$P = F/A = (m * g)/A \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 2.1}$$

Donde m es la masa del pistón y las masas asociadas, g es el valor local de aceleración debido a la gravedad y A es el área efectiva de la combinación pistón-cilindro. La ecuación proporciona el valor de presión, tomando como referencia la presión que rodea la parte superior (externa) del pistón y las masas aplicadas. De esta forma, si la balanza esta rodeada por la atmósfera local, el valor de presión calculado es una presión relativa, si esta montado en una cámara de vacío, la presión medida será una presión absoluta.

El ensamble pistón-cilindro es diseñado para tener un pequeño huelgo, sin embargo si el huelgo entre el pistón y el cilindro es muy pequeño el pistón no se moverá libremente y las fuerzas de fricción inducirán errores significativos. Por otra parte, si el huelgo es muy grande el fluido manométrico fugara rápidamente, causando que el equilibrio de fuerzas establecido en la balanza (entre la presión interna de la balanza y la fuerza ejercida por las masas en el pistón) se pierda por la caída de presión dentro de la balanza debido a la fuga.

Las masas son generalmente cargadas directamente sobre la parte superior del pistón o sobre un portamasas; la estabilidad de presión puede mejorarse si se diseña el portamasas con un centro de gravedad bajo. Es preferible que tanto las masas como los portamasas se fabriquen, preferentemente, de aceros inoxidable no magnéticos ya que este metal es más estable que otros (como el bronce y el hierro) al mismo tiempo que resiste más el envejecimiento y el ataque del medio ambiente.

3.1 Descripción.

Una balanza de presión es un instrumento para la medición de presión existente en un medio, se basa en el principio de balance de fuerzas sobre un área conocida. En este caso particular, la fuerza es determinada por las masas aplicadas y la atracción gravitacional local en donde se encuentra la balanza. En las balanzas de presión con carga directa, la fuerza aplicada por las pesas actúa directamente sobre el pistón por lo que el área para la determinación de la presión es el área efectiva del ensamble pistón-cilindro.

Los componentes principales de una balanza de presión son:

- El ensamble pistón cilindro. El cual esta formado de un pistón de forma cilíndrica insertado en un cilindro hueco (fig. 2.3). El portapesas o portamasas, tiene normalmente la forma de un sombrero de copa y su posición de instalación es descansando

sobre la parte superior libre del pistón, el uso primordial del portamasas es permitir agregar pesas o masas sobre el pistón en forma centrada.

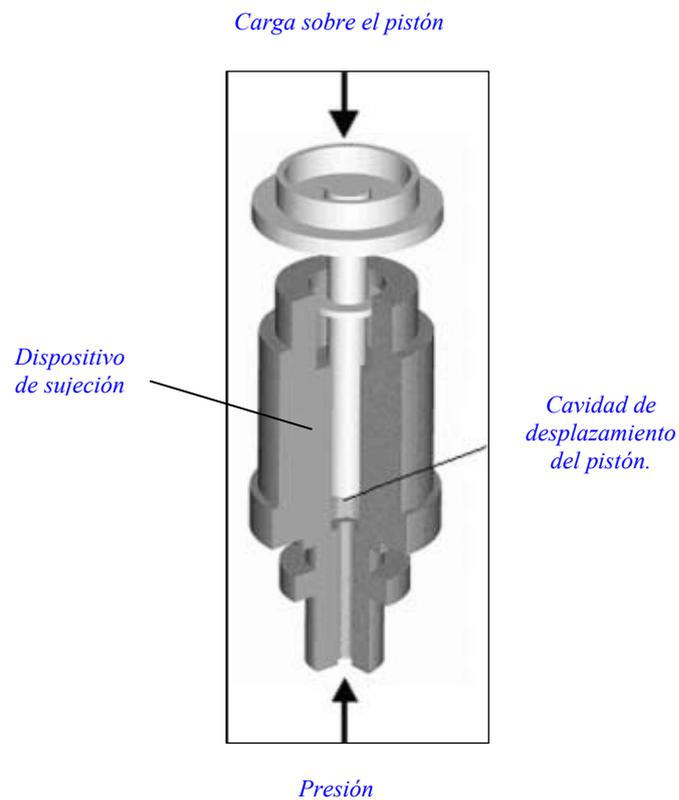


Fig. 3.3 **Ensamble pistón-cilindro de una balanza de presión**

- Las pesas o masas. Juego de discos con masas determinadas de diferente valor nominal y que permiten aplicar una presión determinada de acuerdo al valor de cada masa.
- El dispositivo de sujeción del ensamble pistón cilindro. Este dispositivo permite montar el ensamble pistón cilindro al cuerpo de la balanza al tiempo que sella, en forma adecuada, la balanza para evitar fugas del fluido manométrico que se

encuentra en el interior de la balanza por el hueco dispuesto para el ensamble pistón cilindro.

Con el propósito de asegurar la estabilidad del ensamble pistón-cilindro y mantener su posición vertical en la estructura o base de la balanza se incluyen dispositivos niveladores y un nivel de burbuja. Los componentes auxiliares más importantes en una balanza de presión son:

- El controlador de presión. Dispositivo que no necesariamente forma parte de la balanza y es utilizado para producir y controlar la presión en la balanza. Un dispositivo comúnmente utilizado es un pistón sellado dentro de un cilindro (amplificador neumático o hidráulico).
- La tubería de conexión. Tubos y/o mangueras que conectan partes individuales del sistema de presión de la balanza, que en algunos casos están equipadas con una o más válvulas para conectar y desconectar en forma rápida durante una prueba.

3.2 Tipos de ensamble Pistón Cilindro.

Un ensamble pistón-cilindro consiste, esencialmente, de un pistón dentro de un cilindro hueco y de un sistema para la aplicación de una carga vertical conocida sobre el pistón.

Los principales requerimientos para un ensamble pistón-cilindro ideal son:

- Materiales que soportan altos esfuerzos de compresión bajo condiciones elásticas y con un coeficiente de expansión térmico pequeño (típicamente, carburo de tungsteno).
- Unidades de maquinado y pulido de superficie por debajo de niveles micrométricos.
- Un huelgo pequeño y constante entre el pistón y el cilindro (típicamente, sin fricción entre las dos partes, de 0,5 μm a 1 μm).

Para el arreglo del ensamble pistón-cilindro se utilizan básicamente tres configuraciones, las cuales toman en consideración la mejor exactitud y un alcance de medición más amplio en la medición de presión de las balanzas, estos son:

- Tipo simple.
- Tipo reentrante.
- Tipo huelgo controlado.

3.2.1 Tipo Simple

En este arreglo, la presión a ser medida se aplica en la base del pistón. El pistón equilibra esa presión con la fuerza proporcionada por las masas colocadas sobre él. Entre el pistón y el cilindro se encuentra el fluido manométrico, el cual ejerce un esfuerzo en la pared externa del pistón y la interna del cilindro, dependiendo de la presión aplicada (Fig. 2.4). A altas presiones la expansión del orificio del cilindro y la reducción del diámetro del pistón ocasiona un incremento en la fuga del fluido de prueba, no permitiendo mantener presión estable suficiente tiempo, requisito indispensable durante la toma de lecturas en una medición o calibración.



Figura 3.4. Ensamble pistón-cilindro tipo simple

Por esta razón el ensamble tipo simple es normalmente utilizado para presiones relativamente bajas (alrededor de 70 MPa); ya que a presiones altas, tanto el pistón como el cilindro, presenta deformaciones que hacen variar considerablemente el espacio anular entre estos. Sin embargo, este ensamble se utiliza para presiones altas en los casos donde no se requieren incertidumbres de medición muy pequeñas.

3.2.2 Tipo Reentrante

Cuando la presión se incrementa, el pistón tiende a reducir su diámetro mientras que el cilindro tiende a ensancharse, el uso de un diseño reentrante reduce este efecto aplicando presión por el lado exterior del cilindro, así el cilindro se deformara hacia adentro, de acuerdo al incremento en la presión. Dentro

del diseño de este ensamble, el fluido de prueba se conecta a una cámara sobre el lado exterior del cilindro y al interior del cilindro (fig. 2.5). Ya que el área exterior del cilindro es más grande que la interior, cuando la presión se incrementa, el orificio del cilindro y el área del pistón se reducen. El efecto que esto produce es la reducción del huelgo entre el pistón y el cilindro cuando se aplican altas presiones, por lo que este arreglo encuentra su mejor uso a presiones por arriba de 200 MPa. Otro efecto de la reducción del huelgo entre el pistón y el cilindro es que el tiempo de prueba es mayor ya que la pérdida de fluido de prueba no es excesiva. Este ensamble presenta un problema. Cuando la presión aumenta mucho el huelgo entre el pistón y el cilindro se puede reducir demasiado lo que puede provocar la fricción seca entre pistón-cilindro y en un caso puede causar daño en el pistón.

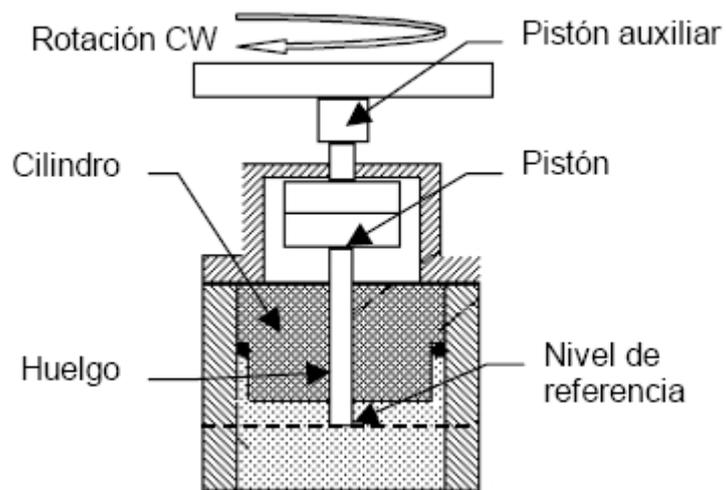


Fig. 3.5 Ensamble pistón-cilindro tipo reentrante

3.2.3 Tipo Huelgo Controlado

Este diseño permite la medición de presión en un alcance muy amplio, desde baja presión hasta alta presión y con la mejor exactitud. En la balanza de huelgo controlado, la distorsión elástica del cilindro (en su diámetro interno) es controlada por una presión externa que proviene de un sistema de presión regulada, lo que presenta la ventaja de controlar el huelgo a las condiciones óptimas de operación para cada presión específica. Esta presión externa se aplica en una cavidad especialmente diseñada en el interior del cilindro, cercana a su diámetro interno. Este tipo de ensamble se puede utilizar en alcances de medición desde 2 kPa hasta 3 Gpa.

3.3 Balanza tipo esfera

En comparación con las balanzas con ensambles de pistón-cilindro, esta balanza utiliza un pistón esférico en lugar de un pistón.

En esta balanza, se suministra aire limpio desde un regulador de flujo a una cámara esférica localizada debajo de la esfera (o pistón esférico). En operación, la esfera con la portamasas y las masas que se encuentran en este, flotan sobre una película de aire sin fricción. De la cámara esférica el aire sale a través de una tobera cónica sobre la cual la esfera o pistón esférico es colocada. Esta conicidad permite una salida variable del flujo, funcionando además como un regulador de flujo para mantener la esfera acomodada sobre la tobera en posición

vertical. La presión aumenta dentro de la cámara esférica debajo de la esfera hasta que la esfera y las masas son suspendidas. La presión dentro de la cámara esférica es conectada a través de una tubería estabilizadora que permite eliminar cualquier oscilación de la presión.

Para lograr una calibración correcta de presión es necesario obtener el equilibrio entre la presión neumática interna de la balanza y el peso de las masas aplicadas sobre el poste de montaje (incluye la esfera y el portamasas). Durante la operación, la esfera es centrada por una película dinámica de aire, eliminando el contacto físico entre la esfera y la tobera.

CAPITULO 4

MEDICIÓN DE LA PRESIÓN CON BALANZA DE PRESIÓN

Esencialmente, un ensamble pistón-cilindro es un medidor acoplado a una cámara con algún fluido. Dicho ensamble es cargado con pesas conocidas y se hace girar a su eje para reducir la fricción. El total de la fuerza hacia arriba es igual a la presión en el sistema interno actuando sobre el área transversal del pistón, la cual es balanceada por la fuerza total hacia abajo ejercida por la fuerza de las pesas (masas multiplicadas por la acción de la aceleración de gravitacional local). Como la fuerza puede ser medida con mejor exactitud que el área, la limitación de la exactitud de las balanzas de presión es la determinación del área efectiva y como cambia por la distorsión elástica del pistón y el cilindro ocasionados por los cambios de la presión.

La ecuación 2.1 esta simplificada a la mínima expresión, en la práctica tiene que ser expandida para tomar en cuenta magnitudes de influencia en la medición de la presión. El cambio de área efectiva con la temperatura y con la presión es un ejemplo. El efecto producido por los cambios de temperatura puede ser corregido conociendo el coeficiente de expansión térmico del material con que están hechos el pistón y el cilindro. Sin embargo, el coeficiente de distorsión debido a la presión debe ser determinado por calibración; a muy altas presiones (> 100 MPa) la incertidumbre en la medición ocasionada por la distorsión puede ser dominante.

Otros ejemplos de factores de influencia son:

- La fuerza total actuando sobre el pistón (debido a las masas), se debe tomar en cuenta el efecto de flotación en el aire sobre el pistón y las masas.
- La diferencia de alturas entre la parte inferior del pistón y el punto en el cual la presión es aplicada al instrumento bajo prueba.
- El fluido manométrico empleado.
- La aceleración local de la gravedad.

Las mediciones con balanzas de presión, independientemente del tipo de balanza, son significativamente afectadas por las variaciones en la aceleración debido a la gravedad alrededor de la tierra. Excepto para el caso de un uso de baja exactitud, el valor local de la aceleración debida a la gravedad debe ser conocido y empleado.

La mayoría de las balanzas de presión usan pistones y cilindros hechos de aceros para herramientas, templados y revenidos o carburo de tungsteno, los cuales son resistentes al uso; algunas otras utilizan componentes cerámicos que también tienen buena resistencia.

4.1 Modelo analítico para balanzas de presión de alta exactitud.

Una ecuación para calcular la presión con una balanza de presión de alta exactitud, incluyendo todas las magnitudes de influencia es:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) * g_l - v * g_l * \rho_f + \gamma * C}{A_o * \left(1 + \alpha_{p-c} * (t - t_r)\right) * (1 + b * p_n)} + P_{col} \dots\dots\dots (Ecuación 3.1)$$

Donde:

p : presión a ser conocida (Pa).

$\sum m_i$: es la suma de las masas de las pesas, (kg)

ρ_a : Densidad local del aire (kg/m³) ρ_m : Densidad de las masas (kg/m³)

g_l : aceleración de la gravedad local (m/s²)

v : volumen del pistón sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.

ρ_f : Densidad del fluido manométrico (kg/m³)

γ : Tensión superficial del fluido manométrico (N/m).

C : Circunferencia del pistón (m)

P_{col} : presión de columna $P_{col} = (\rho_f * g_l * h)$

A_o : área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica (m²).

α_{p-c} : coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón – cilindro (°C⁻¹)

t_r : temperatura de referencia (°C)

t : temperatura del pistón al momento de la medición (°C)

b : coeficiente de deformación elástica del pistón (Pa⁻¹)

P_n : presión nominal (Pa)

Una balanza de presión es un medidor de presión diferencial. Cuando la balanza es usada con la parte superior del pistón a presión atmosférica, la balanza funciona en forma manométrica. Cuando la balanza se usa aislada de la presión atmosférica y se hace vacío, la balanza trabaja en forma absoluta, en este caso, la fuerza de flotación de las masas se considera despreciable.

4.1.1 Correcciones por flotación de las pesas.

La corrección por flotación de las masas en el aire representa la fuerza ejercida hacia arriba sobre las masas, debida al volumen de aire desplazado y esta dada por:

$$\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) * g_i$$

El aire es un fluido, como tal, ejerce una fuerza de empuje sobre todos los objetos que rodea actuando contra la atracción gravitacional. El valor del empuje del aire es una función directa del volumen del objeto bajo consideración y la densidad del aire relativa (*Volumen * Densidad*) alrededor de el. La densidad del aire depende de la temperatura, humedad y la presión atmosférica.

Por ejemplo: Una pesa de acero inoxidable de 1 kg con un volumen de 125 cm³ y una densidad del aire de 1,2 kg/m³, se ejerce una fuerza de empuje de 150 mg sobre la pesa de acero inoxidable. Y si la densidad del aire varía entre 1,1 kg/m³ y 1,3 kg/m³ es equivalente a un cambio de ±12,5 mg en el peso de la pesa de acero inoxidable.

$$E = V_m * \rho_a$$

E = Empuje que sufre el cuerpo por el aire.

V_m = Volumen de las pesas, rodeadas por el aire.

ρ_a = Densidad del aire

$$E = V_m * \rho_a = \left(\frac{m_m}{\rho_m} \right) * \rho_a = m_m * \left(\frac{\rho_a}{\rho_m} \right)$$

m_m = Masas de las pesas.

ρ_m = Densidad de las pesas.

Como el empuje es contrario a la acción de la gravedad, tenemos que la fuerza actuante sobre el pistón, producto de las pesas influenciadas por la densidad del aire es la siguiente:

$$\text{Carga sobre el pistón} = (m_m - E) * g = \left(m_m - m_m * \left(\frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right) * g = m_m \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) * g$$

g = gravedad local (m/s²).

E = Empuje que sufre el cuerpo por el aire.

m_m = Masas de las pesas.

Como se van a colocar distintas pesos encima del pistón y todos estos pesos van a estar influenciados por el empuje del aire, la formula anterior cambia a la siguiente forma:

$$\text{Carga sobre el pistón} = \sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) * g_i$$

$\sum_{i=1}^n m_i$ = sumatoria de todas las pesas colocadas encima del pistón.

4.1.2 Correcciones por empuje del fluido hidrostático sobre el pistón.

El producto $v * g_l * \rho_f$ que es una componente de la formula 3.1, especifica el empuje que sufre parte del pistón en el momento de equilibrio de la presión, esto se ve con más detalle en el siguiente grafico:

Como lo muestra este grafico, parte del pistón esta contenido en el cilindro y una parte esta sumergido en el fluido hidráulico, por lo tanto esta parte sumergida esta sometida al empuje propio del fluido hidráulico.

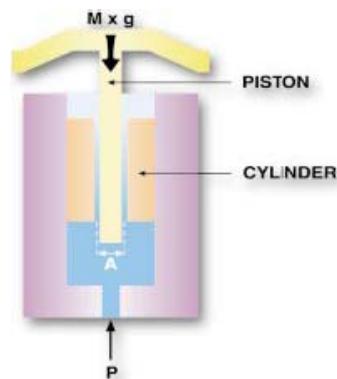


Figura 4.1 Parte del pistón sumergido en el fluido hidrostático

Como el empuje producto del fluido es una fuerza contraria a la aceleración de la gravedad dicho componente $v * g_l * \rho_f$ va restando en el numerador de la ecuación 3.1

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) * g_l - v * g_l * \rho_f + \gamma * C}{A_o * (1 + \alpha_{p-c}(t - t_r)) * (1 + b * p_n)} + P_{col}$$

Para algunos diseños de ensamble pistón-cilindro el producto de $v * g_l * \rho_f$ es igual a cero, porque “v” (volumen del pistón sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión) es igual a cero; este caso se ve en el siguiente grafico.

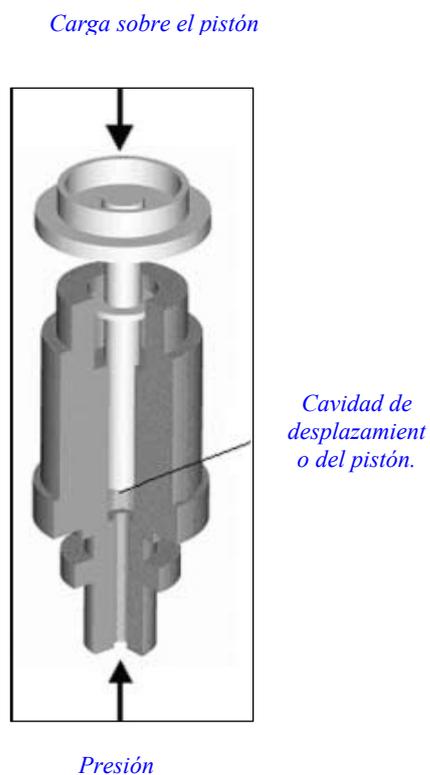


Figura 4.2

Pistón totalmente dispuesto dentro de su cavidad de desplazamiento.

Como vemos en el gráfico anterior el pistón se desplaza hacia arriba debido a la presión a la que es sometida en su base del pistón, para este caso no interfiere el empuje del fluido hidráulico porque ninguna parte del pistón está sumergido en el fluido.

4.1.3 Corrección por tensión superficial.

La corrección por efecto de la tensión superficial " $\gamma \cdot C$ " es la fuerza generada por la tensión superficial del fluido que actúa sobre el pistón.

γ : Tensión superficial del fluido manométrico (N/m).

C : Circunferencia del pistón (m).

El valor de la tensión superficial para aceites más utilizados en las balanzas de presión es $3,05 \times 10^{-2}$ N/m con una incertidumbre de $\pm 10\%$ (según

publicación técnica CNM-MMF-PT-003 del CENAM) o con una variación de $\pm 1 \frac{mN}{m}$ (ver ítem 9.12). Esta corrección es pequeña y tal vez despreciable para medidores con alta presión, pero puede ser significativa para balanzas de aceite operando a baja presión. Esta corrección no aplica para balanzas que operan a gas.

La tabla 3.1 presenta los valores de tensión superficial de los fluidos más comúnmente usados en balanzas de presión.

Fluido de lubricación	Aceite Mineral	Glicerina	Petróleo	Agua	Aceite Oliva
Tensión superficial γ , N/m	0,031	0,063	0,026	0,075	0,033

Tabla 3.1. Tensión superficial (γ) para diferentes fluidos

Nota: es recomendable usar el tipo de aceite que indica el fabricante para la balanza de presión, usualmente de recomienda que sea un SAE 20.

4.1.4 Corrección por dilatación térmica.

El factor que multiplica al área A_0 (área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica) es “ $1 + \alpha_{p-c}(t - t_r)$ ”.

α_{p-c} : coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón–cilindro ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

t : temperatura del pistón al momento de la medición ($^{\circ}\text{C}$)

t_r : temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$)

El cual corrige el efecto por la dilatación térmica del área del pistón, debida a los siguientes factores:

- Debido al calentamiento adiabático en el fluido por cambios rápidos de presión; por fricción debido al flujo de fluido o fricción seca generada por la rotación del pistón.
- Debido al calentamiento generado por el flujo de fluido a través del huelgo se puede formar un gradiente de temperatura a lo largo del cilindro de una balanza de presión y es dependiente de la presión, viscosidad del fluido y la localización a lo largo de su longitud.
- La temperatura se mide normalmente a la altura del arreglo pistón-cilindro por medio de un termómetro que se introduce en un termopozo. Los factores que influyen en la temperatura son: la velocidad de rotación, huelgo, presión, viscosidad y conductividad térmica del fluido así como el tipo de materiales del ensamble pistón-cilindro.
- Para medir la temperatura, se pueden usar termómetros de mercurio, termopares o resistencias de platino.

4.1.5 Corrección por coeficiente de presión

El factor que multiplica al área A_0 (área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica) es “ $(1 + b * p_n)$ ”, el cual corrige el efecto de distorsión que sufre el área del pistón por la presión que soporta durante su ensayo.

b : coeficiente de deformación elástica del pistón (Pa^{-1})

p_n : presión nominal (Pa)

4.1.6 Corrección por la diferencia de alturas de fluido manométrico

El termino “ P_{col} ” (presión de columna del fluido manométrico) se debe a la diferencia de niveles que hay en las bases de los pistones de las balanzas de presión; a calibrar y la patrón, en el momento de equilibrio entre ambas. La ecuación utilizada para el cálculo de esta presión es:

$$P_{col} = \rho_f * g_l * h \dots\dots(4.8)$$

Donde:

P_{col}	Presión generada por la columna de fluido en Pa.
ρ_f	Densidad del fluido de trabajo en kg/m ³
g_l	Aceleración de la gravedad local en m/s ²
h	Diferencia de alturas entre el nivel de referencia del instrumento a calibrar y el nivel de referencia de la balanza de presión en metros (m).

Nota: La medición de la diferencia de alturas siempre se lleva a cabo tomando como base el nivel de referencia de la balanza de presión a calibrar. Si el nivel de referencia del instrumento a calibrar se encuentra por arriba del nivel de referencia del patrón, el producto se considera negativo y en caso contrario positivo.

4.2 Modelo analítico para balanzas de presión industriales.

El siguiente modelo deberá aplicarse para la determinación de la presión corregida generada por una balanza de presión industrial.

$$P = P_n * \frac{g_l}{g_n} * \frac{1 - \rho_a / \rho_m}{1 - \rho_{an} / \rho_m} * \frac{1}{1 + \alpha_{p-c}(t - t_r)} + P_{COL} \dots\dots\dots (Ecuación 4.9)$$

Donde:

P	presión corregida, generada por el patrón.
P_n	presión nominal a condiciones de referencia.
g_l	aceleración de la gravedad.
ρ_a	densidad del aire al momento de la calibración
ρ_m	densidad de las masas
α_{p-c}	coeficiente de expansión térmica del pistón-cilindro
t	temperatura del pistón-cilindro
P_{COL}	Presión de la columna de fluido

Condiciones normalizadas:

Aceleración normal de la gravedad $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$

Densidad normalizada del aire $\rho_{an} = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Temperatura de referencia $t_r = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

La ecuación anterior es empleada para balanzas con una exactitud de 0,05 % hasta 0,2 %.

4.2.1 Presión Nominal

- Las balanzas de presión industriales han sido calibradas a la aceleración de la gravedad, temperatura y densidad del aire, establecidas en el certificado de calibración.
- Generalmente, la aceleración de la gravedad utilizada corresponde a la aceleración de la gravedad normalizada (9,806650 m/s²).
- La temperatura de referencia, normalmente, es 23 °C para balanzas calibradas de fábrica de estados Unidos y de 20 °C para balanzas calibradas en Europa.
- La ecuación para corregir la presión y los factores de corrección deben establecerse en los certificados de calibración del fabricante, para poder ajustar cualquier variación a las condiciones ambientales de trabajo.

- Cada pesa es identificada y se proporciona el valor nominal de presión que es capaz de generar cada una a las condiciones de calibración.
- La presión total es igual a la suma de las generadas por todas las pesas más el pistón y el portamasas.

CAPITULO 5

CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS DE UNA BALANZA DE PRESIÓN

5.1 Características Metrológicas de una Balanza de Presión

5.1.1 Alcance de medición

Alcance de medición de una balanza de presión.

5.1.1.1 Límite superior del alcance de medición (P_{\max}). Máxima presión que se puede medir.

5.1.1.2 Límite inferior de medición (P_{\min}). Mínima presión que se puede medir.

5.1.2 Ecuación de conversión

Ecuación que relaciona la presión generada y la masa de las pesas utilizadas, tomando en cuenta otras magnitudes de influencia y/o de entrada.

5.1.3 Área efectiva

El área determinada de un ensamble pistón – cilindro, la cual es utilizada en la ecuación de conversión para el cálculo de la presión medida.

4.1.4 Posición de trabajo del pistón

La posición del pistón en la cual la balanza de presión mantiene sus características metrológicas.

5.1.5 Velocidad de caída del pistón

La velocidad de caída del pistón en su posición de trabajo, (flotación en la carrera vertical) bajo condiciones específicas.

5.1.6 Tiempo de rotación libre del pistón

Tiempo durante el cual el pistón gira libremente, (sin empuje adicional o motor), después de hacerlo girar a su velocidad de rotación especificada hasta que se detiene.

5.2 Propiedades Metrológicas de una Balanza de Presión

5.2.1 Umbral de Movilidad

El más pequeño cambio en la presión aplicada que produce un cambio perceptible en la respuesta de la balanza de presión.

5.2.2 Repetibilidad

Capacidad de una balanza de presión de proporcionar indicaciones similares de la presión medida por múltiples aplicaciones de la misma carga, bajo condiciones constantes de medición.

5.2.3 Método de indicación de una balanza de presión

5.2.3.1 Indicación adicionando los valores de presión correspondientes a las pesas utilizadas.

5.2.3.2 Indicación adicionando masas y calculando la presión.

Indicación obtenida adicionando los valores de masa de las pesas utilizadas y haciendo el cálculo del valor de la presión medida por medio de la ecuación.

5.3 Términos Generales en la Medición de Presión

5.3.1 Valor verdadero de presión

Valor de presión perfectamente consistente con la definición de presión.

5.3.2 Valor convencionalmente verdadero de presión

Valor de presión que se considera suficientemente cercano al correspondiente valor verdadero y es utilizado para propósitos de evaluación del error.

5.3.3 Incertidumbre de la medición de presión

Parámetro asociado con el resultado de la medición de presión que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos a la presión medida.

5.3.4 Error de la presión medida

El resultado de la medición de presión menos el valor del valor convencionalmente verdadero de la presión medida.

5.3.5 Error máximo tolerado

Diferencia máxima permitida (positiva o negativa) entre la indicación de la balanza de presión y el correspondiente valor convencionalmente verdadero.

5.3.6 Clase de exactitud

Clase de la balanza de presión que cumple con ciertas características metrológicas para mantener el error dentro de límites especificados.

5.3.7 Calibración

Conjunto de operaciones, que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de presión indicados por la balanza de presión y los correspondientes valores de presión realizados por un patrón de referencia.

5.3.8 Sensibilidad de la flotación cruzada

Para una balanza de presión calibrada con una balanza de presión patrón, el cambio mínimo en la masa que resulta en un cambio detectable en el equilibrio de ambas balanzas.

5.4 Condiciones Generales

5.4.1 Condiciones de operación específicas

Condiciones de uso de la balanza de presión para las cuales sus características metrológicas están diseñadas y cumple los requerimientos de error máximo tolerado.

5.4.2 Condiciones de referencia

Las condiciones de uso prescritas para verificar el funcionamiento de una balanza de presión o para intercomparación de los resultados de las mediciones.

5.5 Niveles

5.5.1 Nivel de operación del pistón

El nivel de flotación del pistón, definido claramente, respecto a una parte del poste de montaje o de la base de la balanza de presión.

5.5.2 Nivel de referencia de presión

Nivel vertical, definido claramente, respecto a una parte del poste de montaje o a la base de la balanza de presión, a la cual la presión medida es relacionada cuando el pistón está en su nivel de operación.

5.6 Descripción del Instrumento

5.6.1 Generalidades

5.6.1.1 La balanza de presión es un instrumento diseñado para medir la presión de un fluido, basado en el principio de equilibrio de la fuerza producida por la presión medida sobre un área conocida con la fuerza gravitacional de las pesas aplicadas sobre el ensamble pistón – cilindro.

5.6.1.2 En una balanza de presión con carga directa, las pesas actúan directamente sobre el pistón.

5.6.1.3 Balanza de presión con ensamble tipo simple. El sistema de medición consiste de un pistón cilíndrico y un cilindro simple. La presión atmosférica actúa sobre la superficie exterior del cilindro.

5.6.1.4 Balanza de presión con ensamble tipo re-entrante. La presión bajo medición actúa sobre una porción de la superficie exterior del cilindro.

4.6.1.5 Balanza de presión con ensamble tipo huelgo controlado. Una presión controlada e independiente actúa sobre la superficie exterior del cilindro o sobre una porción de la superficie.

5.7 Componentes principales

5.7.1 El ensamble pistón–cilindro

Está compuesto de un pistón de forma cilíndrica insertado en un cilindro. Puede tener un portapesas sobre la parte superior del pistón.

5.7.2 La conexión del ensamble pistón–cilindro

Es la parte que sirve para fijar y sellar el ensamble a la base.

5.7.3 La base de la balanza asegura la estabilidad del ensamble y su posición vertical por medio de un dispositivo nivelador y sirve para fijar las partes auxiliares del instrumento, por ejemplo la tubería de presión, válvulas, etc.

5.8 Componentes auxiliares

5.8.1 El compresor es la parte de la balanza, el cual no necesariamente forma parte de ésta, su función es la de producir y controlar la presión bajo medición por medio de cambios de volumen, comúnmente consiste en un pistón sellado en un cilindro.

5.8.2 La tubería sirve para conectar las partes individuales del sistema de presión y cuenta con una o más válvulas para desconectar una o más partes durante la calibración.

5.8.3 El juego de pesas son los discos utilizados para generar la presión requerida.

5.9 Unidad de medición

La unidad de medición usada en las balanzas de presión es el pascal, Pa. El fabricante debe proporcionar el factor de equivalencia para otras unidades de medición.

CAPITULO 6

REQUISITOS METROLOGICOS

6.1 División del Alcance de Medición

Para la aplicación de errores máximos tolerados, el alcance de la medición de una balanza de presión con $P_{\min} < 0,1 P_{\max}$ es dividido en dos partes:

- El alcance de la medición principal de $0,1 P_{\max}$ a P_{\max} , y
- El alcance de la medición suplementario de P_{\min} a $0,1 P_{\max}$.

Para las balanzas de presión con $P_{\min} \geq 0,1 P_{\max}$, hay sólo alcance de medición principal de P_{\min} a P_{\max} .

6.2 Clase de Exactitud

Las balanzas de presión son clasificadas en las siguientes clases de exactitud:

0,005 0,01 0,02 0,05 0,1 0,2

Pueden desarrollarse balanzas de presión de clase de exactitud más alta en el futuro.

6.3 Errores Máximos Tolerados

Los errores máximos tolerados para balanzas de presión serán el mismo para la aprobación de modelo y para las comprobaciones iniciales y subsecuentes.

Los errores máximos tolerados para las balanzas de presión bajo las condiciones de referencia, por ejemplo, a temperatura de $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ y para la aceleración de la gravedad normal, ($9,80665\text{ m/s}^2$), se dan en la tabla 5.1 para varias clases de exactitud. Se expresan como porcentajes de la presión medida dentro del alcance de medición principal y como porcentajes del límite más bajo del alcance de medición principal ($0,1\text{ Pmax}$) dentro del alcance de medición suplementario, si existe.

Tabla 5.1

Clase de exactitud	Máximo error tolerado	
	alcance de medición principal (porcentaje de la lectura)	alcance de medición suplementario (porcentaje del $0,1\text{ Pmax}$)
0,005	0,005	0,005
0,01	0,01	0,01
0,02	0,02	0,02
0,05	0,05	0,05
0,1	0,1	0,1
0,2	0,2	0,2

6.4 Incertidumbre de una Balanza de Presión

Se estimará la incertidumbre de una balanza de presión a partir de la evaluación de las incertidumbres individuales de las magnitudes medidas y aquellas magnitudes predeterminadas usadas para calcular el resultado de la medición.

6.4.1 Incertidumbres individuales

Las incertidumbres de la medición y magnitudes predeterminadas pueden dividirse en los siguientes grupos:

- a) La incertidumbre de la determinación del área efectiva (dado por la incertidumbre de la balanza de presión patrón usada y por ciertas incertidumbres debidas al método) que incluye:
- La incertidumbre del coeficiente de deformación del ensamble pistón-cilindro.
 - La incertidumbre debida a la influencia de la temperatura (la medición de la temperatura del ensamble y la determinación del coeficiente de expansión térmica del material del ensamble).
- b) Las incertidumbres de las masas de las pesas (la determinación de las masas y su ajuste, si se realizó).
- c) Incertidumbres que son el resultado de otras magnitudes de influencia:
- La determinación de la aceleración de la gravedad.
 - La desviación de la vertical del pistón.
 - La determinación de la diferencia en los niveles de referencia.
 - La determinación de la densidad del fluido de presión.
 - La sensibilidad de la flotación cruzada.

6.4.2 Incertidumbres que son el resultado de otras magnitudes de influencia.

Las incertidumbres listadas en 5.4.1(c) normalmente no se evalúan en las calibraciones. Las instrucciones y constantes proporcionadas en el manual del funcionamiento de la balanza de presión deben ser

presentadas de tal manera que el efecto global de estas incertidumbres sea mantenido a un nivel práctico mínimo, menor al 10% de la incertidumbre total (vea 5.4.3).

6.4.3 Incertidumbre del total de la balanza de presión

Cada uno de éstos grupos de incertidumbre se evalúan de manera independiente. La raíz cuadrada de la suma de cuadrados de todas las incertidumbres, después de la aplicación de todas las correcciones, es recomendable que no exceda la mitad el error máximo tolerado, de acuerdo a 5.3.

Nota: Es aconsejable que los valores de los grupos de incertidumbre diferentes, expresados como los porcentajes de la incertidumbre total, siga la distribución:
 5.4.1(a): 50%
 5.4.1(b): 40%
 5.4.1(c): 10%

6.5 Tiempo de Rotación Libre del Pistón

El tiempo de la rotación libre del pistón es de acuerdo a especificaciones del fabricante. En la ausencia de cualquier especificación, el tiempo de la rotación libre del pistón no será menor a los valores de la Tabla 5.2 bajo las condiciones especificadas en el punto 9.5.1.1.

Tabla 5.2

Límite superior del alcance de medición (MPa)	tiempo de rotación libre (min) para clases de exactitud					
	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
de 0,1 a 6 (incluido)	4	4	3	2	2	2
más de 6 hasta 500	6	6	5	3	3	3

Nota: Un balanza de presión con rotación del pistón proporcionada por un motor cumplirá con estas condiciones con el motor desconectado.

6.6 Velocidad de Caída del Pistón

La velocidad de caída del pistón cumplirá las especificaciones del fabricante.

En ausencia de cualquier especificación, la velocidad de caída del pistón no excederá los valores de la Tabla 5.3 bajo las condiciones especificadas en 9.5.2.1.

Tabla 6.3

Fluido de presión en el ensamble	Límite superior del alcance de medición (MPa)	velocidad máxima de caída del pistón (mm/min) para clases de exactitud					
		0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
gas	0,1 a 1 incluido	1	1	1	2	2	-
gas	mayor a 1	2	2	2	3	3	-
líquido	0,6 a 6 incluido	0,4	0,4	0,4	1	2	3
líquido	de 6 a 500 incluido	1,5	1,5	1,5	1,5	3	3

6.7 Ajuste de la Masa de las Pesas

Cuando sea aplicable, las pesas de las balanzas de presión se ajustarán por el fabricante para el uso bajo condiciones específicas, (aceleración de la gravedad, densidad del aire, temperatura del ensamble pistón-cilindro). Los valores de estas pesas no deben diferir del valor calculado en una cantidad mayor a los valores declarados en la Tabla 5.4. Para las balanzas de presión de exactitud más alta, las pesas no necesitan ajuste si su masa real se usa para calcular la presión medida.

Tabla 6.4

Clase de exactitud	Error máximo permisible (valor relativo) para el ajuste de la masa de las pesas
0,005	$0,5 \times 10^{-5}$
0,01	$1,5 \times 10^{-5}$
0,02	$1,5 \times 10^{-5}$
0,05	5×10^{-5}
0,1	16×10^{-5}
0,2	16×10^{-5}

CAPITULO 7

REQUISITOS TÉCNICOS

7.1 Condiciones Ambientales

Generalmente están diseñadas para operar bajo las siguientes condiciones ambientales:

- Temperatura, dentro del intervalo de 15 °C a 30 °C.
- La humedad relativa máxima del aire ambiente: 80%.

Otras condiciones ambientales para el uso de una balanza de presión pueden especificarse por el fabricante.

7.2 Condiciones de la Balanza de Presión

Una balanza de presión no mostrará rastros significativos de corrosión o daño que sea capaz de influir en sus características metrológicas.

7.3 Medios para Observar y Determinar el Nivel Vertical del Pistón

La balanza de presión incorporará un medio o dispositivo para observar y determinar el nivel vertical del pistón durante las mediciones.

7.4 Dispositivo de Indicación de Nivel

Una balanza de presión tendrá un dispositivo para ajustar la verticalidad del pistón-cilindro y la indicación deberá tener una desviación máxima permisible de 5 min.

7.5 Posición de la Superficie del Portapesas y el Pistón

Si la superficie de carga del portapesas está fija al pistón, éste debe ser perpendicular al eje del pistón de tal manera que el componente de incertidumbre debido a desviación de verticalidad no rebase los requerimientos de 6.4.

7.6 Requisitos para las Pesas

6.6.1 Masa total de las pesas

La masa total de las pesas proporcionada con la balanza de presión será suficiente para alcanzar el límite superior del alcance de la medición.

7.6.2 Graduación de las pesas

La masa de las pesas debe corresponder a los valores de presión nominales de la serie $(1, 2, 5) \times 10^n$ unidades de presión dónde n es un número del entero. Otros valores pueden usarse en casos especiales (en particular, ver 5.6.3 y 5.6.4).

7.6.3 Masa de la primera pesa

La masa de la primera pesa necesaria para obtener la presión que corresponde al límite inferior del alcance de medición no requiere producir una presión que corresponda a un valor como se especifica en 6.6.2.

7.6.4 Pesas de balanzas de presión de exactitud más alta

Ninguna restricción se pondrá en los valores de masa de balanzas de presión de clases de exactitud 0,005; 0,01 y 0,02 que normalmente se usan para calibración u otros propósitos especiales.

7.6.5 Formas y dimensiones de pesas de masa igual

Las pesas de masa nominal igual que pertenece a la misma balanza de presión deben ser de la misma forma y dimensiones.

7.6.6 Carga de las pesas

Las pesas de la balanza deben apilarse en el portapesas en alineación con el eje de rotación y de manera que se facilite su carga y descarga.

7.6.7 Material de las pesas

Se recomienda que las pesas se fabriquen con materiales resistentes a la abrasión y corrosión o con una capa superficial protectora que las cubra para asegurar la estabilidad de la masa durante el uso. La estabilidad será tal que las variaciones de masa bajo las condiciones normales de uso sean despreciables con respecto a los errores máximos tolerados. Las pesas de las balanzas de presión con clase de exactitud 0,005; 0,01 y 0,02 se harán de un material no-magnético.

7.7 Material del Ensamble Pistón-Cilindro

El material usado por fabricar el ensamble pistón-cilindro cumplirá con los requisitos para el material de las pesas como se especifica en 6.6.7 y tendrán una forma y volumen estables para asegurar la estabilidad a largo plazo en el área efectiva de la balanza de presión. El fabricante debe proporcionar la información acerca de la estabilidad y calidades del material que usaron.

7.8 Fugas en el Sistema de Presión de una Balanza de presión

La velocidad de caída del pistón debe realizarse sin fugas en el sistema de presión para verificar que cumple los requisitos de 5.6.

7.9 Marcas

6.9.1 Una balanza de presión llevará las marcas siguientes:

- Nombre o marca comercial del fabricante.
- Número de serie y modelo.
- Año de fabricación.
- Clase de exactitud.
- Alcance de medición y
- Número de aprobación de modelo.

El número de aprobación de modelo se requiere para las regulaciones nacionales.

CAPITULO 8

CONCEPTOS METROLOGICOS

Antes de entrar al procedimiento de medición es necesario definir algunos términos muy utilizados en el campo de la metrología y que en muchos casos se desconocen o confunden.

8.1 Magnitud.

Propiedad de un fenómeno, de un cuerpo o de una sustancia a la cual se puede asignar un número con relación a una referencia.

Ejemplo:

Ejemplo de magnitud en sentido general		Ejemplo de magnitud particular
longitud, l	radio, r	radio del círculo A, r_A o $r(A)$
	longitud de onda, λ	longitud de onda de la radiación D del sodio, λ_D o $\lambda(D; Na)$
energía, E	energía cinética, T	energía cinética de la partícula i en un sistema dado, T_i
	calor, Q	calor de vaporización de la muestra i de agua, Q_i
Carga eléctrica, Q		Carga eléctrica del protón, e
Resistencia eléctrica, R		Resistencia eléctrica del resistor i en un circuito dado, R_i
Dureza Rockwell C (carga de 150 kg), HRC (150 kg)		Dureza Rockwell C de la muestra i de acero , HRC _{i} (150 kg)

Nota: La referencia puede ser una unidad de medida, un procedimiento de operación o un material de referencia.

8.2 **Medición**

Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Notas:

1. Una medición implica una comparación de magnitudes o un conteo de entidades.
2. Una medición supone una descripción de la magnitud, compatible con el uso previsto del resultado de la medida, un procedimiento de medición y un sistema de medida calibrado que opera de acuerdo a un procedimiento de medición especificado.

8.3 **Mensurando**

Magnitud propuesta para medirse

Notas:

1. La especificación del mensurando requiere la descripción del estado del fenómeno, cuerpo o sustancia a la cual está asociada la magnitud; incluye las componentes necesarias y las entidades químicas involucradas.
2. En la 2^{da} edición del VIM, el mensurando está definido como la “magnitud sujeta a medición”.

8.4 **Metrología**

Campo del conocimiento que trata de las mediciones.

Nota:

La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, independientemente de la incertidumbre de la medida y del campo de aplicación.

8.5 **Principio de medida.**

Fenómeno que sirve como base de una medición

Ejemplos:

1. El efecto termoeléctrico aplicado a la medición de temperatura.
2. La absorción de energía aplicada a la medición de la concentración de cantidad de sustancia.

3. El decremento de la concentración de glucosa en la sangre de un conejo en ayunas aplicado a la medición de la concentración de insulina en una preparación.

8.6 Método de medida

Descripción genérica de una organización lógica de operaciones usadas en una medición.

Nota:

Los métodos de medida pueden ser clasificados de varias maneras tales como:

1. Método de medida por sustitución.
2. Método de medida diferencial, y
3. Método de medida por nulo; o
4. Método de medida directo, y
5. Método de medida indirecto.

8.7 Procedimiento de medición.

Descripción detallada de una medición de acuerdo a uno o más principios de medida y a un método de medida dado, con base en un modelo de medida y que incluye los cálculos para obtener un incertidumbre de medida.

Notas:

- 1 Un procedimiento de medición usualmente se documenta con suficiente detalle para que un operador pueda realizar una medición.
- 2 Un procedimiento de medición puede incluir una incertidumbre de medida objetivo.
- 3 Un procedimiento de medición se denomina a veces un procedimiento de operación estándar.

8.8 Resultado de medición.

Conjunto de valores de una magnitud atribuidos a un mensurando acompañados de cualquier otra información relevante disponible.

Notas:

1. Una medición generalmente provee información sobre un conjunto de valores de una magnitud, tales que algunos pueden representar mejor al mensurando que otros. Lo anterior puede ser mostrado en forma de una función de densidad de probabilidad.
2. Un resultado de medición se expresa generalmente como un valor medido único y una incertidumbre de la medida. Si la incertidumbre de la medida se considera despreciable para algún propósito, el resultado de la medición puede expresarse como un único valor medido de la magnitud.
3. En la literatura tradicional y en la edición precedente del VIM, el término resultado de medición estaba definido como un valor atribuido al mensurando y su significado se entendía como una indicación, o un resultado no corregido, o un resultado corregido, según el contexto.

8.9 Exactitud de medida.

Proximidad de concordancia entre un valor medido de la magnitud y un valor verdadero del mensurando

Notas

1. El concepto “exactitud de medida” no se expresa numéricamente, si no que se dice que una medición es más exacta cuando ofrece una incertidumbre de medida más pequeña.
2. El término “exactitud de medida” no debería ser usado en lugar de “veracidad de medida”, y el término “precisión de la medida” no debería ser usado en lugar de “exactitud de la medida”.

8.10 Precisión de medida.

Proximidad de concordancia entre valores medidos obtenidos por mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas.

Notas:

1. La precisión de una medición usualmente se expresa en forma numérica por medidas de la imprecisión, tales como la desviación estándar, la varianza o el coeficiente de variación bajo las condiciones especificadas de la medición.
2. Las “condiciones especificadas” pueden ser condiciones de repetibilidad de la medición, condiciones de precisión intermedia, o condiciones de reproducibilidad de la medición.
3. La precisión de una medida se utiliza para definir la repetibilidad de medida, precisión intermedia de medida y reproducibilidad de medida.

4. Con frecuencia, “precisión” se usa erróneamente en el sentido de “exactitud de medida”.

8.11 Error de medida.

Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia

Notas:

1. El concepto de error puede ser usado cuando existe un solo valor de referencia al cual referirse, lo cual ocurre si se hace una calibración mediante un patrón de medida de incertidumbre de medida despreciable o si se da un valor convencional de la magnitud, o si el mensurando se supone representado por un valor verdadero único o por un conjunto de valores verdaderos con amplitud despreciable.
2. Debe notarse el signo de la diferencia.
3. El error de medida no debería ser confundido con error de producción o con error humano.

8.12 Repetibilidad de medida.

Precisión de una medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad de medición.

8.13 Reproducibilidad de medida.

Precisión de una medida bajo condiciones de reproducibilidad de medición

8.14 Incertidumbre de medida.

Parámetro que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, con base en la información usada.

Notas:

1. La incertidumbre de medida incluye componentes provenientes de efectos sistemáticos, tales como componentes asociadas a correcciones y a los valores asignados de patrones de medida, así como a la incertidumbre intrínseca. Algunas veces no se corrigen los efectos sistemáticos y en su lugar se tratan como componentes de la incertidumbre.
2. El parámetro puede ser por ejemplo, una desviación estándar en cuyo caso se denomina incertidumbre estándar de medición (o un múltiplo de ella), o el semiancho de un intervalo a un nivel de confianza determinado.
3. En general la incertidumbre de medida comprende muchos componentes. Algunos de éstos pueden ser evaluados por una

evaluación tipo A de la incertidumbre de medida a partir de la distribución estadística de valores que provienen de series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones estándar experimentales. Las otras componentes, que pueden ser evaluadas por evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones estándar, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad con base en la experiencia o en otra información.

8.15 Evaluación tipo A de la incertidumbre de medida.

Evaluación de una componente de la incertidumbre de medida mediante un análisis estadístico de los valores de la magnitud obtenidos bajo condiciones de medición definidas.

Nota: Algunos tipos de condiciones de medición son condición de repetibilidad de medición, condición de precisión intermedia de medición y condición de reproducibilidad de medición.

8.16 Evaluación tipo B de la incertidumbre de medida.

Evaluación de una componente de la incertidumbre de medida por medios distintos a una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida.

Ejemplos:

- Evaluación con base en información:
- Asociada con valores de la magnitud publicados y con reconocimiento.
- Asociada con el valor de la magnitud de un material de referencia certificado.
- Obtenida de un certificado de calibración y a la cual se agrega la consideración a la deriva.
- Obtenida de la clase de exactitud de un instrumento para medir verificado.
- Obtenida de límites deducidos por experiencia personal.

8.17 Presupuesto de incertidumbre.

Declaración de una incertidumbre de medida, de los componentes de esa incertidumbre, de su cálculo y combinación.

Nota:

El presupuesto de incertidumbre debería incluir el modelo de medición, estimados de las incertidumbres de medición de las magnitudes en el modelo de medición, covarianzas, tipo de funciones de densidad de probabilidad consideradas, grados de libertad, tipo de evaluación de la incertidumbre y factor de cobertura.

8.18 Incertidumbre expandida de medida.

Producto de una incertidumbre estándar combinada de medida y un factor numérico mayor que uno.

Notas:

1. La incertidumbre expandida de medición es denominada “incertidumbre total”.
2. El término “factor” en esta definición se refiere a un factor de cobertura.

8.19 Intervalo de cobertura.

Intervalo que contiene el conjunto de valores verdaderos de un mensurando con una probabilidad declarada con base en la información disponible.

Notas:

1. El intervalo de cobertura no necesita estar centrado en el valor medido de la magnitud.
2. Un intervalo de cobertura no debiera ser denominado “intervalo de confianza” a fin de evitar confusión con el concepto estadístico.
3. Un intervalo de cobertura puede derivarse de una incertidumbre expandida de medida.

8.20 Nivel de confianza.

Probabilidad de que el conjunto de los valores verdaderos de un mensurando esté contenido en un intervalo de cobertura especificado.

Notas:

1. Esta definición pertenece al Enfoque en la Incertidumbre presentado en la GUM.

2. La probabilidad de cobertura se denomina también “nivel de confianza” en la GUM.

8.21 Calibración.

Operación que bajo condiciones especificadas, en una primera etapa establece una relación entre los valores de la magnitud y sus incertidumbres de medida obtenidos de los patrones de medida y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas, y, en una segunda etapa, usa esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medición a partir de una indicación.

Notas:

1. Una calibración puede expresarse por una declaración, una función de calibración, un diagrama de calibración, una curva de calibración o una tabla de calibración. En algunos casos puede dar lugar a una corrección aditiva o multiplicativa de la indicación con su respectiva incertidumbre.
2. Una calibración no debería confundirse con el ajuste de un sistema de medición, a menudo llamada incorrectamente “autocalibración”, ni con la verificación de la calibración.
3. A veces se percibe como que únicamente la primera etapa de esta definición corresponde a la calibración.

8.22 Trazabilidad metrológica.

Propiedad de un resultado de medición por la cual el resultado puede ser relacionado a una referencia establecida mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

Notas:

1. Para esta definición, una “referencia establecida” puede ser la definición de una unidad de medida mediante su realización práctica, un procedimiento de medición que incluya la unidad de medida o un patrón de medida.
2. La trazabilidad metrológica requiere una jerarquía de calibración establecida.

3. La especificación de la referencia establecida debe incluir la fecha en la cual se utilizó dicha referencia, junto con cualquier otra información metrológica relevante sobre la referencia, tal como el momento en que se haya realizado la primera calibración de la jerarquía de calibración.
4. Para mediciones con más de una magnitud de entrada en el modelo de medición, cada magnitud de entrada debiera ser metrológicamente trazable y la jerarquía de calibración implicada puede formar una estructura ramificada o una red. Los esfuerzos desarrollados para establecer la trazabilidad metrológica para cada magnitud de entrada deberían ser acordes a su contribución relativa al resultado de la medición.
5. La trazabilidad metrológica por sí misma no asegura que la incertidumbre de medida es adecuada o la ausencia de equivocaciones.
6. Una comparación entre dos patrones de medida puede considerarse como una calibración si la comparación se usa para verificar y, de ser necesario, corregir el valor de la magnitud y la incertidumbre de medida atribuidos a uno de los patrones.
7. Algunas veces el término “trazabilidad” se usa en lugar de “trazabilidad metrológica” así como para otros conceptos como “trazabilidad de una muestra” o “trazabilidad de un documento” o “trazabilidad de un instrumento” en el sentido de la historia (“traza”) del elemento de que se trate. Por tanto, se prefiere el término completo “trazabilidad metrológica”.

8.23 Validación.

Demostrar que las características de desempeño de un método de medición son adecuadas para la exactitud requerida. Para asegurar que la trazabilidad de las mediciones se mantiene y que el valor de la incertidumbre de la medición es válido, el laboratorio evaluado puede demostrarlo mediante lo siguiente:

1. Comparación de resultados alcanzados con otros métodos. El nuevo método se puede validar si al comparar los resultados obtenidos entre este y otro método diferente validado los resultados que se obtienen son comparables entre ambos métodos.
2. Evaluación sistemática de los factores que tienen influencia en los resultados. Consiste en cuantificar la variabilidad de cada factor que afecta los resultados de la medición; dicha cuantificación se realiza de manera individual, suele aplicarse cuando no se cuenta con un modelo matemático que incluya todas las variables de influencia. A esto se le llama también caracterización.

Esto también puede hacerse para mejora de incertidumbre sobre un modelo matemático ya conocido.

3. Evaluación de la incertidumbre de los resultados con base en el conocimiento científico de los principios teóricos del método y de la experiencia práctica.
4. Esta evaluación aplica principalmente cuando el laboratorio desea mejorar su incertidumbre o no tiene bien caracterizadas las variables de influencia que afectan las mediciones durante la calibración de balanzas de presión.

Se pueden aplicar uno o varios de los incisos anteriores, tomando en cuenta que el fin es demostrar que el método se encuentra validado y que se identificaron y validaron los aspectos que puedan influir sobre la trazabilidad y la incertidumbre de las mediciones.

CAPITULO 9

CALIBRACIÓN DE BALANZAS DE PRESIÓN

El presente procedimiento tiene por objeto mostrar un método para la calibración de balanzas de presión, mediante el método de flotación cruzada (flotación simultanea), La calibración de una balanza de presión incluye, además de la determinación del área efectiva y el coeficiente de deformación con la presión del elemento en flotación según se detalla en el apéndice 1; el método de determinación de la masa de las pesas y del elemento en flotación se detallan en el anexo 2.

El método de flotación cruzada, es el método para la calibración entre dos balanzas de presión, las cuales están conectadas entre sí. Consiste en hacer que el fluido empleado en la calibración haga flotar tanto la balanza de presión patrón como a la balanza de presión a calibrar. La presión en la balanza de presión a calibrar se mide mediante el equilibrio de fuerzas de las masas colocadas sobre el ensamble pistón-cilindro con la presión generada por el fluido de presurización. (Ver figura 9.1)



Fig. 8.1
Calibración por flotación
Cruzada

Este procedimiento es aplicable a aquellas balanzas de presión relativa que funcionan usando como fluido transmisor de la presión un gas o un líquido y en las que el elemento en flotación es un conjunto pistón cilindro simple o reentrante. No es aplicable a la calibración de balanzas de presión absoluta, ni a aquellas balanzas en las que elemento en flotación es un tronco de cono o esfera. Tampoco es aplicable a la calibración de balanzas con divisores o multiplicadores hidráulicos, ni a balanzas con balance electromagnético.

Este procedimiento no cubre otros métodos tales como la determinación del área efectiva a partir de mediciones dimensionales pero no niega su uso cuando este sea aplicable. Las balanzas de presión tratadas cubren el rango de 0,1 MPa a 500 MPa, según la Recomendación Internacional OIML R 110 – Balanzas de Presión.

Cuando la balanza está en equilibrio, se considera que la parte inferior del pistón es el nivel de referencia de la balanza. En algunos casos la balanza está ajustada por el fabricante para que el nivel de referencia sea la conexión de salida de la balanza.

La presión generada por la balanza de presión patrón al nivel de referencia de la balanza a calibrar, se obtiene de la ecuación 3.1:

$$p_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) * g_{l-v} * g_l * \rho_f + \gamma * C}{A_o * (1 + \alpha_{p-c} * (t - t_r)) * (1 + b * p_n)} + P_{col} \dots \dots \dots (Ec. 8.1)$$

Teniendo en cuenta que la presión medida por las dos balanzas tiene que ser la misma y que la generada por la balanza a calibrar se obtiene de una formula similar, se puede obtener el área efectiva de la balanza a calibrar a presión p_p y temperatura de referencia.

$$A_{oc} * (1 + b_c * p_n) = \frac{\sum_{i=1}^n m_{iC} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}}\right) * g_{l-vC} * g_l * \rho_f + \gamma * C_C}{p_p * (1 + \alpha_{p-c} * (t - t_r))} \dots \dots \dots (Ec. 8.2)$$

Donde:

p_p : Presión generada por la balanza de presión patrón al nivel de referencia de la balanza a calibrar presión a ser conocida (Pa).

$\sum m_{iC}$: es la suma de las masas de las pesas de la balanza a calibrar (kg).

ρ_a : Densidad local del aire (kg/m³).

ρ_{mC} : Densidad de las masas de la balanza a calibrar (kg/m³)

g_l : aceleración de la gravedad local (m/s²)

v_c : volumen del pistón de la balanza a calibrar sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.

ρ_f : Densidad del fluido manometrico (kg/m³)

γ : Tensión superficial del fluido manometrico (N/m).

C_C : Circunferencia del pistón (m)

A_{oc} : área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza a calibrar (m²).

$\alpha_{C\text{-p-c}}$: coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón – cilindro de la balanza a calibrar ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

t_r : temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$)

t : temperatura del pistón al momento de la medición ($^{\circ}\text{C}$)

b_C : coeficiente de deformación elástica del pistón de la balanza a calibrar (Pa^{-1})

p_n : Presión nominal (Pa)

9.1 Principio funcional de una balanza manométrica

9.1.1 La balanza manométrica consiste centralmente en un pistón vertical que rota libre dentro de su cilindro. Ambos elementos poseen alta calidad de terminación superficial y definen una superficie de acción conocida como “área efectiva”. La presión a medir se aplica a la base del pistón generando una fuerza vertical con sentido ascendente. Esta fuerza se equilibra con una fuerza gravitacional debida a las masas inmersas en el campo gravitatorio local y ubicada sobre el pistón en su zona superior. El pistón es, a su vez, parte de la carga.

9.1.2 A veces, por razones prácticas, y esencialmente a baja presión, rota el cilindro en lugar del pistón. Los principios y los métodos de ensayo son exactamente los mismos en este caso.

9.1.3 La presión se trasmite al elemento en movimiento por el fluido que puede ser gaseoso (en general nitrógeno seco) o líquido (aceite de baja viscosidad).

9.1.4 Cuando el conjunto de masas está sometido a la acción de la presión atmosférica que también actúa sobre la cabeza del pistón, la balanza mide la presión relativa a la atmosférica (presión manométrica). En algunos casos un adaptador permite invertir el montaje pistón cilindro. La balanza medirá en estos casos presión manométrica negativa. El equilibrio se obtiene con la fuerza resultante ascendente que genera la presión atmosférica.

9.1.5 La definición analítica general de la presión que mide la balanza se obtiene del balance de las diferentes fuerzas que actúan sobre el sistema. Para balanzas neumáticas (que miden presión respecto de la atmosférica) resulta:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) * g_l - v * g_l * \rho_f}{A_p (1 + \alpha_{p-c} * (t - t_r))} \dots\dots\dots (Ec. 8.3)$$

Donde:

p : es la presión manométrica medida en la base del pistón (Pa).

$\sum m_i$: es la suma de las masas de las pesas que actúa sobre el pistón incluyendo todos los elementos flotantes (kg).

ρ_a : Densidad local del aire (kg/m³). ρ_m : Densidad de las masas (kg/m³).

g_l : aceleración de la gravedad local (m/s²).

v : volumen del pistón sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.

ρ_f : Densidad del fluido manométrico (kg/m³).

α_{p-c} : coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón – cilindro (°C⁻¹).

t_r : temperatura de referencia (°C).

t : temperatura del pistón al momento de la medición (°C).

A_p : área efectiva del conjunto pistón cilindro a temperatura de referencia y a presión de referencia (Normalmente 20 °C y presión atmosférica normal).

Dependiendo del tipo y rango de la balanza, el área efectiva puede expresarse como:

- a) Como una constante A_0 igual al valor medio de todas las determinaciones.
- b) A partir del área efectiva a presión nula A_0 y del primer orden del coeficiente de distorsión asociado a la presión.

$$A_p = A_0(1+b*p)$$

Donde:

p : es un valor aproximado de la presión de trabajo. Puede ser su valor nominal.

- c) Eventualmente, cuando se justifique la utilización de un polinomio de segundo orden, la expresión pasara a ser:

$$A_p = A_0(1+b*p+b'*p^2)$$

La expresión final en este caso será:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) * g_l - v * g_l * \rho_f}{A_0 (1 + b * p + b' * p^2) (1 + \alpha_{p-c} * (t - t_r))} \dots\dots\dots (Ec. 8.4)$$

Donde:

b : Es el coeficiente de distorsión lineal conjunta del sistema.

b' : Es el coeficiente de distorsión de segunda orden conjunta del sistema.

Si todas las magnitudes se expresan en unidades SI sin prefijos, la presión resultante quedará expresada en pascal (Pa).

9.1.6 Para balanzas hidráulicas se podría considerar una expresión similar.

La fuerza producida por la tensión superficial del líquido deberá sumarse a la fuerza gravitatoria. La expresión analítica resulta:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) * g_l - v * g_l * \rho_f + \gamma * C}{A_p (1 + \alpha_{p-c} * (t - t_r))} \dots\dots\dots (Ec. 8.5)$$

γ : Tensión superficial del fluido manométrico (N/m).
 C : Circunferencia del pistón (m).

9.1.7 Se considera que el nivel correspondiente a la base del pistón cuando este queda en equilibrio es el de referencia. En algunos casos, por razones de operación práctica, el fabricante ajusta alguna indicación en la balanza para dar referencia de éste nivel y así aplicar las correcciones que resulten sobre la presión de salida.

9.2 Equipo de Calibración.

- Como instrumento de medida patrón se utilizara una balanza de presión, con apropiado alcance de medición y clase de exactitud, de acuerdo a 8.5.6.2.
- Equipo auxiliar como indicador de nivel, termómetro calibrado, regla calibrada, higrómetro calibrado, barómetro calibrado.

9.3 **Pruebas y Condiciones de la Calibración.**

Las calibraciones se llevarán a cabo en un laboratorio con temperatura controlada, bajo las siguientes condiciones:

- a) Temperatura ambiente: $20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$; la humedad relativa $60\% \pm 20\%$.
- b) Estabilidad de temperatura ambiente alrededor del instrumento mejor que 1 °C/h durante la calibración.
- c) Instalación de la balanza de presión y equipo a calibrar en el laboratorio por lo menos 6 horas antes de la prueba.
- d) Balanza de presión apropiadamente nivelada, de acuerdo al manual del fabricante.
- e) Medición de temperatura del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión con un termómetro apropiado, con una incertidumbre de $\pm 0,5\text{ °C}$.
- f) Condiciones de la referencia serán:
 - Temperatura de 20 °C .
 - Aceleración normal de la gravedad ($9,806\ 65\text{ m/s}^2$). El informe de la calibración se emitirá para estas condiciones de referencia.
- g) Control sobre la apertura de puertas y el movimiento de operadores para la conservación de una atmósfera estable y control de los sistemas de ventilación para prevenir excesos de intensidad en el flujo de aire por encima o por debajo del sistema.
- h) Verificar que el aceite se encuentre libre de impurezas. Caso contrario drenar todas las tuberías y reemplazar el aceite del tanque. Con el circuito de presión cerrado y la mitad del conjunto de pesas ubicadas sobre el pistón, este debe desplazarse hacia arriba y hacia abajo por intermedio de la bomba a tornillo. En tal forma se examina la movilidad del pistón sobre su rango total de desplazamiento.
- i) Cuando sea necesario, podrá desmontarse el conjunto pistón – cilindro, del modo que lo indique el manual técnico de uso y limpiar las superficies de ambas piezas con el solvente o detergente adecuado y con paño suave y seco respetando las recomendaciones del fabricante. Las superficies del pistón y del cilindro se inspeccionan verificando que no existan marcas, rayas ni ataques químicos. Concluido esto se lubrica el conjunto con el aceite indicado limpio y puro, toda vez que se trate de sistemas hidráulicos o neumáticos lubricados con aceite.

9.4 Pruebas de Cumplimiento de los Requisitos Técnicos

9.4.1 Instalación inicial

La balanza de presión debe instalarse de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, usando las herramientas y los instrumentos de medición incluidos con los accesorios de la balanza de presión o recomendados por el fabricante. Debe darse especial atención a la limpieza del sistema, sobre todo al pistón y cilindro, y a la verticalidad del eje del pistón.

9.4.2 Dispositivos para observar el nivel vertical del pistón

Los medios usados por observar el nivel vertical del pistón deben ser verificados, puede realizarse por medio de una escuadra.

9.4.3 Instrumento indicador de nivel

La prueba se llevará a cabo antes de cargar las pesas. La verticalidad del eje del pistón se verifica con un nivel de la burbuja.

8.4.4 Perpendicularidad del eje del pistón y el portapesas

Esta prueba aplica cuando el portapesas y el pistón están permanentemente conectados y debe ser realizada antes de cargar las pesas. Después de que el eje del pistón ha sido alineado verticalmente, el nivel de la burbuja se coloca en la superficie superior del portapesas en dos direcciones perpendiculares entre si.

8.4.5 Prueba de fugas en la balanza

La presión en el instrumento se incrementa al límite superior del alcance de medición de la balanza de presión; hasta alcanzar el equilibrio térmico (5 min – 30 min), se detiene el incremento de la presión y la fuga se observará midiendo la velocidad de caída de pistón con el pistón girando.

9.5 Prueba para el Cumplimiento de los Requisitos Metrológicos.

9.5.1 Tiempo de la rotación Libre del pistón.

9.5.1.1 El tiempo de la rotación libre de pistón se determinará bajo las siguientes condiciones:

- a) El sistema de medición del instrumento tendrá un fluido de presión de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

- b) La presión se incrementa al 20 % del alcance de medición.
- c) La velocidad de la rotación inicial del pistón no excederá el valor especificado por el fabricante, o $(2 \pm 0,15) \text{ s}^{-1}$ cuando no se especifique.
- d) Se realizarán dos pruebas sucesivas con el pistón girando en sentidos opuestos.
- e) En la práctica es necesario un tiempo mucho menor a 1 min., para la toma de las lecturas de las indicaciones de presión en los instrumentos, por lo tanto los tiempos de rotación libre para las diversas clases de balanzas (Tabla 5.2) pueden ser acortados; entendiéndose que para mayor peso el tiempo de rotación tiende a aumentar por la inercia.

9.5.1.2 La exactitud de las mediciones de tiempo, rotación, y

temperatura será como sigue:

- El tiempo de rotación libre del pistón se medirá con una incertidumbre no mayor a ± 10 segundos.
- La temperatura del ensamble pistón-cilindro se medirá con una incertidumbre no mayor $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura del ensamble deberá estar comprendida dentro del intervalo de las condiciones de referencia o dentro de la temperatura de operación especificada por el fabricante.
- La velocidad inicial de rotación de pistón se medirá con una incertidumbre menor a $0,15 \text{ s}^{-1}$.

9.5.2 Velocidad de caída del pistón

9.5.2.1 La velocidad de caída del pistón se determinará bajo las

siguientes condiciones:

- a) El sistema de medición del instrumento debe tener un fluido de presión acorde a las especificaciones del fabricante.
- b) La presión debe ser igual al límite superior del alcance de la medición.
- c) La temperatura del ensamble pistón-cilindro deberá estar dentro del intervalo de las condiciones de la

referencia o dentro de la temperatura de operación especificada por el fabricante.

- d) El instrumento debe estar aislado, lo más lejos posible de otro sistema.

9.5.3 La velocidad de caída del pistón se debe medir con una incertidumbre no mayor a ± 10 segundos.

9.5.4 La prueba se repetirá tres veces y el valor promedio de las tres mediciones será considerado como el resultado de la prueba.

9.5.5 Determinación de la masa del pistón y de las pesas individuales.

La masa del pistón con el portapesas y las pesas individuales se determinará por calibración en masa.

Nota: La determinación de masa no es necesaria si el solicitante tiene un certificado de calibración en masa emitido por un laboratorio autorizado.

9.5.6 Determinación del área efectiva

9.5.6.1 Método de determinación

La determinación del área efectiva de una balanza de presión se llevará a cabo por comparación con una balanza de presión patrón por el método de flotación cruzada.

La comparación con una balanza de presión patrón se hará por el método de balance directo, donde la comparación de la balanza de presión se realizará en varios puntos de presión, cargando las pesas adecuadas y agregando pesas pequeñas sobre la balanza de presión patrón para lograr el equilibrio de presiones en ambas balanzas.

9.5.6.2 Requisitos Generales

La balanza de presión patrón seleccionada para calibrar una balanza de presión de clase de exactitud 0,05; 0,1; ó 0,2 deberá tener una mejor incertidumbre, en una relación de 2:1 que la clase de exactitud de la balanza bajo calibración. La balanza de presión patrón seleccionada para calibrar un balanza de presión de clase de exactitud 0,005; 0,01; ó 0,02 deberá tener una incertidumbre tal que, combinada con la incertidumbre del método, la incertidumbre total sea mejor que 0,005%; 0,01%; ó 0,02%, respectivamente, del valor de la presión.

La calibración debe de realizarse a valores de presión que se aumentan gradualmente hasta el límite superior del instrumento y entonces gradualmente se disminuyen, hasta completar un ciclo. Se deben de medir al menos dos ciclos en las balanzas de presión de alta exactitud y ciclo y medio en las balanzas tipo industriales.

El número de puntos de medición y su distribución se determinarán según Tabla 9.1.

Tabla 9.1

Número de puntos de calibración y su distribución

Clase de exactitud	Número de puntos	valor nominal de los valores de presión como porcentaje del límite superior del alcance de medición del instrumento											
0,01 0,01 0,02	10	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100		
0,05 0,1 0,2	6	10	20	40	60	80	100						

Nota: Al calibrar una balanza de presión de clase de exactitud de 0,005; 0,01; ó 0,02, se pueden omitir tres puntos de calibración con tal de que ellos no sean adyacentes.

Se deberán nivelar las dos balanzas con una exactitud adecuada para asegurar que la incertidumbre debida a esta magnitud de influencia no exceda 10% del error máximo tolerado.

Durante la calibración, se considera que el equilibrio es suficiente cuando no se observan cambios en la velocidad de caída de los pistones. En este estado, la adición o levantamiento de una pequeña pesa de un valor que corresponde a la presión del 10% del error máximo tolerado del instrumento, causará un cambio obvio en la velocidad de caída del pistón.

Nota: Durante la calibración, la balanza de presión bajo calibración puede separarse de la balanza patrón por medio de un manómetro diferencial que se utiliza como detector de nulos para facilitar la observación del equilibrio entre ambas balanzas.

9.6 Instalación de los equipos

- Instalar los equipos lejos de turbulencias de aire que puedan generarse tanto por sistemas de ventilación como de acondicionamiento de aire.
- Instalar la balanza a calibrar tan cerca como resulte posible del instrumento patrón de referencia.
- Utilizar una mesa adecuada y robusta que pueda soportar toda la carga que resulte necesaria sin deformaciones que afecten su correcta nivelación.
- Utilizar para tal verificación un nivel de burbuja con sensibilidad de 2 mm/m o mejor.

- Minimizar las diferencias de alturas entre los niveles de referencia de los dos instrumentos a comparar.
- Respetar la verticalidad del pistón según lo recomiende el fabricante utilizando el nivel de burbuja incorporado en el equipo u otro nivel de precisión del laboratorio, apoyado sobre la superficie superior del pistón para evitar la inclinación. Esto deberá verificarse también cuando opere el total de la carga.
- Utilizar caños cortos de orificios relativos grandes para las conexiones, fundamentalmente cuando se trabaje a bajas presiones.
- Asegurar la limpieza y el ajuste de los tubos.
- Instalar drenajes adecuados para controlar la naturaleza del fluido en la cañería.
- Vincular al equipo un adecuado sistema de medición de temperaturas.

9.7 Generación de la presión

9.7.1 Para presión neumática

- Utilizar un gas limpio y seco (por ejemplo nitrógeno) a una temperatura igual o próxima a la ambiente.
- Ajustar la entrada de presión al rango de trabajo de los instrumentos a intercompararse.
- Limpiar la cañería de todo líquido (para sistemas del tipo de los lubricados con aceite).

9.7.2 Para presión hidráulica

- Utilizar el líquido hidráulico que recomiende el fabricante.
- Cuando el líquido no sea el mismo que el utilizado en la balanza a calibrar utilizar un adecuado sistema de separación de fases para evitar cualquier mezcla entre ambos líquidos.
- Limpiar las tuberías de cualquier otro líquido.
- Purgar el sistema de toda burbuja interna de gas que pueda haber quedado atrapada.

9.8 Proceso de calibración

La calibración se realiza por el método de flotación cruzada que consiste en llevar a los dos conjuntos pistón-cilindro, el de la balanza a calibrar y el de la balanza patrón, a su posición de flotación, realizar el ajuste del estado de equilibrio con pesas pequeñas sobre uno de ambos equipos (convencionalmente aquel que sea mas sensible al cambio de masa, idealmente es el patrón) para que ambas balanzas permanezcan equilibradas por la presión del circuito.

Para la calibración se tomarán en cuenta las series y los puntos de calibración indicados en el ítem 8.5.6.2 para cada tipo de balanza de presión con su respectiva clase.

Una serie de medidas consiste en la comparación de las indicaciones del patrón y del instrumento a calibrar, en todos los puntos de calibración, alcanzado estos de forma consecutiva, empezando por el límite inferior de medida e incrementando la presión del sistema punto a punto hasta llegar al límite superior. Una vez alcanzado el límite superior se alcanzan otra vez los puntos, de manera consecutiva decrementando la presión del sistema hasta volver a presión cero.

Para generar las distintas presiones nominales de una serie se colocan masas sobre los pistones, hasta obtener el valor de presión buscado y mediante aporte del fluido de transmisión o compresión del mismo se sitúan los pistones, con las masas, en posición de flotación. En ese momento se añaden o quitan masas sobre el patrón hasta conseguir que las balanzas se encuentren equilibradas.

Cuando se utiliza el método de flotación cruzada se considera alcanzado el equilibrio en cualquiera de los siguientes casos:

- Los dos pistones cilindro, el patrón y el mensurando, se encuentren en su posición media de flotación de forma estable.

- Los dos pistones cilindro, el patrón y el mensurando, caen a sus respectivas velocidades de caída.
- Al realizar el ajuste de la masa colocada sobre el patrón se llega a la masa más pequeña (se considerara que las masas añadidas sean del mismo material de las pesas de la balanza de presión) que produce un cambio en el sentido del equilibrio de manera sensible.

Nota: La masa más pequeña que produce un cambio en el equilibrio se denomina masa de sensibilidad.

Antes de tomar cada medida habrá que comprobar que la balanza se encuentra nivelada, que se ha alcanzado el equilibrio en la flotación y que no hay problemas de fugas.

Después de la realización de cada serie de medidas se dejara sin presión al sistema.

9.9 Toma y tratamiento de datos.

Los datos a tomar son los siguientes.

- Datos a tomar para cada punto de calibración:
 - Masa total del patrón, incluye la masa del pistón y las masas colocadas sobre el.
 - Temperatura del conjunto pistón-cilindro de cada balanza. Cuando la balanza no esta equipada con facilidades para tomar esta temperatura, deberá registrarse la temperatura del aire utilizando un termómetro apropiado vinculado en alguna zona apropiada de la balanza.

- Masa total del mensurando, incluye la masa del pistón y las masas colocadas sobre el.

- Datos a tomar al inicio y al final de la calibración.
 - Temperatura ambiente.
 - Humedad relativa.
 - Presión ambiente.

- Datos a tomar una sola vez para toda la calibración.
 - Diferencia de alturas entre los niveles de referencia.
 - Tipo de fluido hidráulico o neumático utilizado.
 - Coeficiente de expansión térmica lineal del conjunto pistón-cilindro en calibración (en caso de que no se les determine experimentalmente, se tomaran datos de la literatura de base utilizada dejando sentado el caso que corresponda).
 - Coeficiente de distorsión elástica por presión (si se obtuviera por método teórico).

Se calcularan los siguientes parámetros:

- El área efectiva del conjunto pistón cilindro a presión atmosférica y temperatura de referencia.
- El coeficiente de deformación de la presión del conjunto pistón cilindro.
- La incertidumbre expandida para un intervalo de confianza de aproximadamente 95,45%.

Normalmente los resultados se presentaran para el valor de gravedad normal 9,80665 m/s² (a menos que el cliente lo solicite para el valor correspondiente a la gravedad local de uso) y la temperatura de referencia de 20 °C.

Nota: Las mediciones realizadas en carreras crecientes pueden considerarse totalmente equivalentes a las realizadas en carreras decrecientes toda vez que el sistema de referencia sea también una balanza manométrica, dado que estos sistemas no presentan efectos de histéresis detectables cuando operan adecuadamente.

Con los puntos obtenidos graficar Área vs Presión. De dicho gráfico se determinará el área efectiva del pistón a presión atmosférica (sin carga) y temperatura de referencia, que será el valor en que la recta obtenida corte al eje de las coordenadas, aplicando el método de mínimos cuadrados (Ver Anexo 1).

De estos datos también obtenemos la incertidumbre de la curva de ajuste, al igual que la incertidumbre de los coeficientes de dicha curva. Para calcular el área se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$A_{oC} * (1 + b_C * p_n + b'_C * p_n^2) = \frac{\left[(m_{C \text{ Piston}} + \delta m_{C \text{ Piston}}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n (m_{iC} + \delta m_{iC}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_l - v_C * g_l * \rho_f + \gamma * C_C}{p_P * (1 + \alpha_{C \text{ p-c}} * (t_C - t_r))} \quad \text{..... (Ec. 8.6)}$$

Donde:

p_P : Presión generada por la balanza de presión patrón al nivel de referencia de la balanza a calibrar presión a ser conocida (Pa).

$$p_P = \frac{\left[(m_{P \text{ Piston}} + \delta m_{P \text{ Piston}}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n (m_{iP} + \delta m_{iP}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l - v_P * g_l * \rho_f + \gamma * C_P}{(A_{oP} + \delta A_{oP}) * (1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r)) * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)} + P_{col} \quad \text{..... (Ec. 8.7)}$$

$\sum m_{iC}$: es la suma de las masas de las pesas de la balanza a calibrar (kg).

$m_{C\ Piston}$: masa del pistón de la balanza a calibrar (kg).

$\delta m_{C\ Piston}$: deriva de la masa del pistón de la balanza de presión a calibrar.

δm_{iC} : deriva de la masa de las pesas de la balanza de presión a calibrar.

$\sum m_{iP}$: es la suma de las masas de las pesas de la balanza patrón (kg).

$m_{P\ Piston}$: masa del pistón de la balanza patrón (kg).

$\delta m_{P\ Piston}$: deriva de la masa del pistón de la balanza de presión patrón.

δm_{iP} : deriva de la masa de las pesas de la balanza de presión patrón.

ρ_a : Densidad local del aire (kg/m³).

ρ_{mC} : Densidad de las masas de la balanza a calibrar (kg/m³)

$\rho_{mC\ Piston}$: Densidad de la masa del pistón de la balanza a calibrar (kg/m³)

ρ_{mP} : Densidad de las masas de la balanza patrón (kg/m³)

$\rho_{mP\ Piston}$: Densidad de la masa del pistón de la balanza patrón (kg/m³)

g_l : aceleración de la gravedad local (m/s²)

v_C : volumen del pistón de la balanza a calibrar sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.

v_P : volumen del pistón de la balanza patrón sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.

ρ_f : Densidad del fluido manométrico (kg/m³)

γ : Tensión superficial del fluido manométrico (N/m).

C_C : Circunferencia del pistón de la balanza a calibrar (m)

C_P : Circunferencia del pistón de la balanza patrón (m)

A_{oC} : área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza a calibrar (m²).

A_{oP} : área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza patrón (m²).

δA_{op} : Deriva del área efectiva del conjunto pistón cilindro de la balanza de presión patrón.

$\alpha_{C\ p-c}$: coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón – cilindro de la balanza a calibrar ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$\alpha_{P\ p-c}$: coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón – cilindro de la balanza patrón ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

t_r : temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$)

t_C : temperatura del ensamble pistón – cilindro al momento de la medición de la balanza de presión a calibrar ($^{\circ}\text{C}$)

t_P : temperatura del ensamble pistón – cilindro al momento de la medición de la balanza de presión patrón ($^{\circ}\text{C}$)

b_C : coeficiente de deformación elástica del pistón de la balanza a calibrar (Pa^{-1})

b'_C : coeficiente de deformación elástica de segundo orden del pistón de la balanza a calibrar (Pa^{-2})

b_P : coeficiente de deformación elástica del pistón de la balanza patrón (Pa^{-1})

b'_P : coeficiente de deformación elástica de segundo orden del pistón de la balanza patrón (Pa^{-2})

p_n : Presión nominal (Pa)

P_{col} : Presión generada por la columna de fluido en Pa. $P_{col} = \rho_f * g_l * h$

Donde:

ρ_f Densidad del fluido de trabajo en kg/m^3

g_l Aceleración de la gravedad local en m/s^2

h Diferencia de alturas entre el nivel de referencia del instrumento a calibrar y el nivel de referencia de la balanza de presión en metros (m).

9.10 Determinación de la presión ejercida por cada pesa.

Utilizar la ecuación 8.8 para determinar la presión que ejerce cada pesa de la balanza de presión a calibrar.

$$P = \frac{k \cdot m \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)}{A_{oC}} \cdot g_l \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 8.8})$$

Donde:

- m = Masa de la pesa (kg)
- g_l = aceleración de la gravedad local (m/s²)
- ρ_a = Densidad del aire en el ambiente (kg/m³)
- ρ_p = Densidad de la pesa (kg/m³)
- k = Factor de Conversión a otra unidad de presión
- A_{oC} = Área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza a calibrar (m²).

CAPITULO 10

CALCULO DE INCERTIDUMBRES

Para la estimación y cálculo de las incertidumbres se seguirá lo establecido en la guía para la Expresión en la Medición.

La incertidumbre estándar combinada es la incertidumbre estándar del resultado de una medición, que se obtiene a partir de los valores de otras magnitudes.

Esta es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, siendo estos términos las varianzas y covarianzas de dichas magnitudes, ponderadas de acuerdo a como varia el resultado de la medición por cambios en dichas magnitudes.

La incertidumbre combinada, expresada como $u_c(y)$, depende de las incertidumbres $u(x_i)$ de cada uno de los estimados de entrada. Cada $u(x_i)$ es una incertidumbre estándar evaluada como Tipo A o como Tipo B.

$$y = f(x_1; x_2; \dots; x_N)$$

La $u_c(y)$ depende también de que tanto influye x sobre y . Por ejemplo si x_i aparece elevada a la cuarta potencia en la función f influirá muchísimo más que si solo estuviera elevada a la primera potencia.

Que tanto influye x_i sobre y esta dado por los llamados coeficientes de sensibilidad c_i . Matemáticamente c_i se evalúa tomando la derivada parcial de la función f respecto de x_i .

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$$

Luego se suma cuadráticamente todas estas componentes según esta ley:

$$u_c^2(y) = c_1^2 \cdot u^2(x_1) + c_2^2 \cdot u^2(x_2) + \dots + c_N^2 \cdot u^2(x_N)$$

En forma de sumatoria:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

La $u_c(y)$ es una desviación estándar combinada que caracteriza (al nivel estándar de aproximadamente 68,3%) la dispersión de los valores que pueden atribuirse al mensurando y de acuerdo a nuestros mejores conocimientos.

Desarrollando la ecuación 9,6

$$A_{eC} = \frac{\left[\left[\left(m_{C \text{ Piston}} + \delta m_{C \text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_l - v_C * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right]}{\left[\left(A_{oP} + \delta A_{oP} \right) * \left[1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r) \right] * \left(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2 \right) \right]} * \left[\left[\left(m_{P \text{ Piston}} + \delta m_{P \text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iP} + \delta m_{iP} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l \right] * \left[-v_P * g_l * \rho_f + \gamma * C_P + \left[Pcol * \left(A_{oP} + \delta A_{oP} \right) * \left[1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r) \right] * \left(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2 \right) \right] \right] * \left[1 + \alpha_{C \text{ p-c}} * (t_C - t_r) \right]$$

$$A_{eC} = A_{oC} * \left(1 + b_C * p_n + b'_C * p_n^2 \right)$$

Área efectiva del pistón de la balanza de presión a calibrar.

Sea el numerador de la expresión:

$$N = \frac{\left[\left(m_{C\ Piston} + \delta m_{C\ Piston} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\ Piston}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_l - v_C * g_l * \rho_f + \gamma * C_C}{\left[(A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) \right]}$$

Y sea el denominador de la expresión:

$$D = \left[\left(m_{P\ Piston} + \delta m_{P\ Piston} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP\ Piston}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iP} + \delta m_{iP} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l - v_P * g_l * \rho_f + \gamma * C_P + [P_{col} * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)]$$

$$\left[1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r) \right]$$

10.1 Valor certificado de la masa (m_C) de las pesas colocadas sobre el pistón de

la balanza de presión a calibrar. Esta masa incluye la masa del propio pistón

$$\left[\left(m_{C\ Piston} + \delta m_{C\ Piston} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\ Piston}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right]$$

El valor de la masa y su incertidumbre $u(m_{C\ Piston})$ y $u(m_{iC})$ se obtienen de los cálculos del APENDICE 2. Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_1 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial m_{C\ Piston}}$$

$$C_1 = \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\ Piston}} \right) * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

$$C_2 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial m_{iC}}$$

$$C_2 = \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}}\right) * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

10.2 Valor certificado de la masa (m_p) de las pesas colocadas sobre el pistón de la balanza de presión patrón. Esta masa incluye la masa del propio pistón.

$$\left[(m_{P\ Piston} + \delta m_{P\ Piston}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP\ Piston}}\right) + \sum_{i=1}^n (m_{iP} + \delta m_{iP}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}}\right) \right].$$

El valor de la masa y su incertidumbre $u(m_{P\ Piston})$ y $u(m_{iP})$ se obtienen de los cálculos del Anexo 2. Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_3 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial m_{P\ Piston}}$$

$$C_3 = -N * \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP\ Piston}}\right) * g_l * [1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

$$C_4 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial m_{iP}}$$

$$C_4 = -N * \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}}\right) * g_l * [1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.3 Deriva de la masa (δm_c) de las pesas colocadas sobre el pistón de la balanza de presión a calibrar. Esta deriva afecta también a la masa del propio pistón. El valor de la masa puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre.

La incertidumbre debida a la deriva de la masa de las pesas de la balanza de presión a calibrar, se puede calcular de la siguiente manera:

- A partir del histórico de las calibraciones sucesivas, se puede obtener una variación, dada por la diferencia de masa entre las dos últimas calibraciones. La incertidumbre debida a la deriva será:

$$u(\delta m_c) = \frac{\delta m_c}{\sqrt{3}}$$

- Si no se tiene un histórico de las calibraciones sucesivas, la incertidumbre debida a la deriva puede darse como:

$$u(\delta m_c) = \frac{U(m_c)}{\sqrt{3}}$$

En caso de realizar la calibración con varias pesas:

$$U(m_c) = \sum (U(m_c))_i$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_5 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \delta m_{c \text{ Piston}}}$$

$$C_5 = \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC \text{ Piston}}}\right) * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

$$C_6 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \delta m_{iC}}$$

$$C_6 = \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}}\right) * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

- 10.4 Deriva de la masa (δm_p) de las pesas colocadas sobre el pistón de la balanza de presión patrón.** Esta deriva afecta también a la masa del propio pistón. El valor de la masa puede variar entre calibraciones, esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre.

La incertidumbre debida a la deriva de la masa de las pesas de la balanza de presión patrón, se puede calcular de la siguiente manera:

- A partir del histórico de las calibraciones sucesivas, se puede obtener una variación, dada por la diferencia de masa entre las dos últimas calibraciones. La incertidumbre debida a la deriva será:

$$u(\delta m_p) = \frac{\delta m_p}{\sqrt{3}} \quad \dots 10.26$$

- Si no se tiene un histórico de las calibraciones sucesivas, la incertidumbre debida a la deriva puede darse como:

$$u(\delta m_p) = \frac{U(m_p)}{\sqrt{3}} \quad \dots 10.27$$

En caso de realizar la calibración con varias pesas:

$$U(m_p) = \sum (U(m_p))_i \quad \dots 10.28$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_7 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \delta m_{P \text{ Piston}}}$$

$$C_7 = -N * \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP \text{ Piston}}}\right) * g_l * [1 + \alpha_{C_{p-c}} * (t_c - t_r)] * (1 + b_C * p_n + b'_C * p_n^2)}{D^2}$$

$$C_8 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \delta m_{iP}}$$

$$C_8 = -N * \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}}\right) * g_l * [1 + \alpha_{C_{p-c}} * (t_c - t_r)] * (1 + b_C * p_n + b'_C * p_n^2)}{D^2}$$

10.5 Densidad del aire (ρ_a): para calcular la densidad del aire se sigue los cálculos del APÉNDICE 4, partiendo de la ecuación (A4.1) tenemos:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009024 \cdot hr \cdot \exp(0,061 \cdot t)}{273,15 + t}$$

Derivando cada una de sus componentes con respecto a cada componente de la ecuación, tenemos:

$$\left(\frac{u(\rho_a)}{\rho_a}\right)^2 = \left(\frac{uf}{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} \cdot \frac{u(p)}{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} \cdot \frac{u(t)}{\rho_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} \cdot \frac{u(hr)}{\rho_a}\right)^2$$

$$\frac{u_f}{\rho_a} = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p} = \frac{0,34848}{273,15 + t}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = \frac{-0,009024 \cdot \exp(0,061 \cdot t)}{273,15 + t}$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = \frac{-[(273,15 + t)(0,009024 \cdot 0,061 \cdot hr \cdot \exp(0,061 \cdot t))] - [0,34848 \cdot p - 0,009024 \cdot hr \cdot \exp(0,061 \cdot t)]}{(273,15 + t)^2}$$

$$\rho_a = \frac{\rho_{a_{inicial}} + \rho_{a_{final}}}{2} ;$$

$$p = \frac{p_{inicial} + p_{final}}{2} ;$$

$$hr = \frac{hr_{inicial} + hr_{final}}{2} ;$$

$$t = \frac{t_{inicial} + t_{final}}{2} ;$$

$$u(p) = \sqrt{\left(\frac{p_{final} - p_{inicial}}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{resolución}{\sqrt{3}}\right)^2 + (u_{p,certificado})^2} ;$$

$$u(hr) = \sqrt{\left(\frac{hr_{final} - hr_{inicial}}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{resolución}{\sqrt{3}}\right)^2 + (u_{hr,certificado})^2} \quad y$$

$$u(t) = \sqrt{\left(\frac{t_{final} - t_{inicial}}{\sqrt{12}}\right)^2 + \left(\frac{resolución}{\sqrt{3}}\right)^2 + (u_{t,certificado})^2}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_9 = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_a}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_a} = \frac{\left[\left(m_{C\text{ Piston}} + \delta m_{C\text{ Piston}} \right) \left(-\frac{1}{\rho_{mC\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(-\frac{1}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_l * \left[\left(A_{oP} + \delta A_{oP} \right) * \left[1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r) \right] \right] * D - N * \left[\left(m_{P\text{ Piston}} + \delta m_{P\text{ Piston}} \right) \left(-\frac{1}{\rho_{mP\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iP} + \delta m_{iP} \right) \left(-\frac{1}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l * \left[1 + \alpha_{C\text{ p-c}} * (t_C - t_r) \right]}{D^2}$$

10.6 Densidad de las pesas (ρ_{mC}) y el pistón ($\rho_{mC\text{ Piston}}$) utilizados por la balanza

de presión a calibrar. Se pueden dar los siguientes casos:

- a. Que se puedan obtener de los valores de un Certificado de Calibración,

$U_C(\rho_{mC})$ y $U_C(\rho_{mC\text{ Piston}})$, para el factor de cobertura correspondiente k .

$$u(\rho_{mC}) = \frac{U_C(\rho_{mC})}{k}; \quad u(\rho_{mC\text{ Piston}}) = \frac{U_C(\rho_{mC\text{ Piston}})}{k}$$

En ocasiones se proporciona en normas o guías internacionales, con un factor de cobertura correspondiente.

Aleación/material	Densidad supuesta	Incertidumbre ($k = 2$)
Platino	21 400 kg m ⁻³	± 150 kg m ⁻³
Plata níquel	8 600 kg m ⁻³	± 170 kg m ⁻³
Bronce	8 400 kg m ⁻³	± 170 kg m ⁻³
Acero inoxidable	7 950 kg m ⁻³	± 140 kg m ⁻³
Acero al carbono	7 700 kg m ⁻³	± 200 kg m ⁻³
Hierro	7 800 kg m ⁻³	± 200 kg m ⁻³
Hierro fundido (blanco)	7 700 kg m ⁻³	± 400 kg m ⁻³
Hierro fundido (gris)	7 100 kg m ⁻³	± 600 kg m ⁻³
Aluminio	2 700 kg m ⁻³	± 130 kg m ⁻³

Nota: Referencia de la Norma Metrológica del Perú NMP-004-2007, anexo B, pagina 96

- b. Que sean datos suministrados por el fabricante, $U_C(\rho_{mC})$ y $U_C(\rho_{mC\text{ Piston}})$.

En ese caso, generalmente, el fabricante no indica para que factor de cobertura esta dada dicha incertidumbre, por tanto se considera una distribución rectangular:

$$u(\rho_{mC}) = \frac{U_C(\rho_{mC})}{\sqrt{3}}; \quad u(\rho_{mC \text{ Piston}}) = \frac{U_C(\rho_{mC \text{ Piston}})}{\sqrt{3}}$$

Material	Density	Manufacturer
Stainless Steel	7 895 kg/m ³	Ametek, Pressurements
Brass	8 390 kg/m ³	Chandler, Dewit
KirkSITE	6 700 kg/m ³	Ametek, Ashcroft-Dresser, Terris.
Aluminum	2 710 kg/m ³	Ametek

Nota: Lista de materiales comúnmente usados para las pesas de la balanza de presión de acuerdo a su fabricante - Referencia de la GUÍA METAS – Diciembre 2007, pagina 6.

Material	Density	Manufacturer
Tungsten Carbide	13 300 kg/m ³	DH Instruments, DH Budenberg, Ruska, Pressurements
Stainless Steel	7 800 kg/m ³	Ametek, Ashcroft-Dresser, Terris, Chandler, Dewit

Nota: Lista de materiales comúnmente usados para los pistones de las balanzas de presión de acuerdo a su fabricante - Referencia de la GUÍA METAS – Diciembre 2007, pagina 6.

- c. Que pueda ser obtenida a partir de valores tabulados en función del material basándonos, por ejemplo, en bibliografía u otros documentos. Si lo que tenemos es un intervalo donde se espera encontrar el valor de dicha densidad, $[\rho_{mC \text{ max}}; \rho_{mC \text{ min}}]$ y $[\rho_{mC \text{ Piston max}}; \rho_{mC \text{ Piston min}}]$ a partir de este intervalo se estimara la incertidumbre como:

$$u(\rho_{mC}) = \frac{[\rho_{mC \text{ max}} - \rho_{mC \text{ min}}]}{\sqrt{12}}; \quad u(\rho_{mC \text{ Piston}}) = \frac{[\rho_{mC \text{ Piston max}} - \rho_{mC \text{ Piston min}}]}{\sqrt{12}}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{10} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mC}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mC}} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_{iC} + \delta m_{iC}) \left(\frac{\rho_a}{\rho_{mC}^2} \right) * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

$$C_{11} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mC\ Piston}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mC\ Piston}} = \frac{(m_{C\ Piston} + \delta m_{C\ Piston}) \left(\frac{\rho_a}{\rho_{mC\ Piston}^2} \right) * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

10.7 Densidad de las pesas (ρ_{mP}) y el pistón ($\rho_{mP\ Piston}$) utilizados por la balanza de presión patrón. Se pueden dar los siguientes casos:

- a. Que se puedan obtener de los valores de un Certificado de Calibración, $U_C(\rho_{mP})$ y $U_C(\rho_{mP\ Piston})$, para el factor de cobertura correspondiente k.

$$u(\rho_{mP}) = \frac{U_C(\rho_{mP})}{k}; \quad u(\rho_{mP\ Piston}) = \frac{U_C(\rho_{mP\ Piston})}{k}$$

En ocasiones se proporciona en normas o guías internacionales, con un factor de cobertura correspondiente.

- b. Que sean datos suministrados por el fabricante, por el fabricante, $U_C(\rho_{mP})$ y $U_C(\rho_{mP\ Piston})$. En ese caso, generalmente, el fabricante no

indica para que factor de cobertura esta dada dicha incertidumbre, por tanto se considera una distribución rectangular:

$$u(\rho_{mP}) = \frac{U_c(\rho_{mP})}{\sqrt{3}}; \quad u(\rho_{mP \text{ Piston}}) = \frac{U_c(\rho_{mP \text{ Piston}})}{\sqrt{3}}$$

- c. Que pueda ser obtenida a partir de valores tabulados en función del material basándonos, por ejemplo, en bibliografía u otros documentos. Si lo que tenemos es un intervalo donde se espera encontrar el valor de dicha densidad, $[\rho_{mP \text{ max}}; \rho_{mP \text{ min}}]$ y $[\rho_{mP \text{ Piston max}}; \rho_{mP \text{ Piston min}}]$ a partir de este intervalo se estimara la incertidumbre como:

$$u(\rho_{mP}) = \frac{[\rho_{mP \text{ max}} - \rho_{mP \text{ min}}]}{\sqrt{12}}; \quad u(\rho_{mP \text{ Piston}}) = \frac{[\rho_{mP \text{ Piston max}} - \rho_{mP \text{ Piston min}}]}{\sqrt{12}}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{12} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mP}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mP}} = -N \frac{\sum_{i=1}^n (m_{iP} + \delta m_{iP}) \left(\frac{\rho_a}{\rho_{mP}^2} \right) * g_l * [1 + \alpha_{C \text{ p-c}} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

$$C_{13} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mP \text{ Piston}}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_{mP \text{ Piston}}} = -N \frac{(m_{P \text{ Piston}} + \delta m_{P \text{ Piston}}) \left(\frac{\rho_a}{\rho_{mP \text{ Piston}}^2} \right) * g_l * [1 + \alpha_{C \text{ p-c}} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.8 Gravedad Local(g_l), el valor de la gravedad local y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , se obtienen del certificado de calibración de la gravedad en el lugar de utilización de la balanza.

$$u(g_l) = \frac{U(g_l)}{k}$$

Si en su certificado no se especificara el factor de cobertura k , se asumirá una distribución rectangular y su incertidumbre será:

$$u(g_l) = \frac{U(g_l)}{\sqrt{3}}$$

En caso de no disponer de un certificado de calibración de la gravedad local, se empleara los cálculos del Anexo 3.

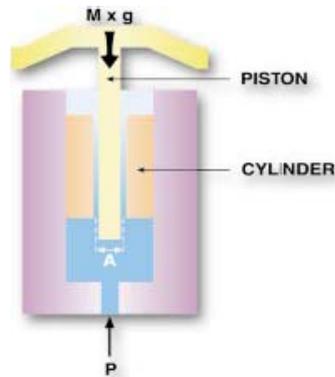
Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{14} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial g_l}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial g_l} = \frac{\left[\left(m_{C \text{ Piston}} + \delta m_{C \text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) - v_C * \rho_f \right] * \left[(A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) \right] * D - N * \left[\left(m_{P \text{ Piston}} + \delta m_{P \text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iP} + \delta m_{iP} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) - v_P * \rho_f \right] * [1 + \alpha_{C \text{ p-c}} * (t_C - t_r)] + \gamma * C_P + \rho_f * h * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P \text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D^2}$$

10.9 Volumen del pistón de la balanza de presión a calibrar sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión.(v_C), su valor y su incertidumbre se pueden obtener bien de las especificaciones del fabricante o

mediante una sencilla determinación dimensional mediante el uso de un calibre (micrómetro o vernier y mediante diferencias de alturas).



El volumen del cilindro se determinara empleando la siguiente formula:

$$v_C = \pi \left(\frac{D_C}{2} \right)^2 \cdot H_C \rightarrow v_C = \frac{\pi}{4} (D_C)^2 \cdot H_C$$

D_C : Diámetro del pistón de la balanza de presión a calibrar.

H_C : Altura del pistón de la balanza de presión a calibrar que esta sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión

Se observa que el volumen esta en función del diámetro y la altura $f(D_C, H_C)$.

La incertidumbre combinada se obtiene mediante:

$$u^2(v_C) = \left(\frac{\partial v_C}{\partial D_C} \right)^2 \cdot u^2(D_C) + \left(\frac{\partial v_C}{\partial H_C} \right)^2 \cdot u^2(H_C)$$

Derivando la función respecto a D_C tenemos:

$$\frac{\partial v_C}{\partial D_C} = \frac{1}{2} \pi \cdot D_C \cdot H_C$$

Derivando la función respecto a H_C tenemos:

$$\frac{\partial v_C}{\partial H_C} = \frac{\pi}{4} (D_C)^2$$

Las incertidumbres $u(D_C)$ y $u(H_C)$ se obtiene del certificado de calibración del instrumento empleado para la toma de las medidas.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{15} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial v_C}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial v_C} = \frac{g_l \cdot \rho_f \cdot (A_{oP} + \delta A_{oP}) \cdot [1 + \alpha_{P-p-c} \cdot (t_P - t_r)] \cdot (1 + b_P \cdot p_n + b'_P \cdot p_n^2)}{D}$$

10.10 Volumen del pistón de la balanza de presión patrón sometido al empuje

del fluido de transmisión de la presión. (v_P), su valor y su incertidumbre se pueden obtener bien de las especificaciones del fabricante o mediante una sencilla determinación dimensional mediante el uso de un calibre (micrómetro o vernier y mediante diferencias de alturas).

El volumen del cilindro se determinara empleando la siguiente formula:

$$v_P = \pi \left(\frac{D_P}{2} \right)^2 \cdot H_P \quad \rightarrow \quad v_P = \frac{\pi}{4} (D_P)^2 \cdot H_P$$

D_P : Diámetro del pistón de la balanza de presión patrón.

H_P : Altura del pistón de la balanza de presión patrón que esta sometido al empuje del fluido de transmisión de la presión

Se observa que el volumen esta en función del diámetro y la altura $f(D_P, H_P)$.

La incertidumbre combinada se obtiene mediante:

$$u^2(v_P) = \left(\frac{\partial v_P}{\partial D_P} \right)^2 \cdot u^2(D_P) + \left(\frac{\partial v_P}{\partial H_P} \right)^2 \cdot u^2(H_P)$$

Derivando la función respecto a D_P tenemos:

$$\frac{\partial v_P}{\partial D_P} = \frac{1}{2} \pi \cdot D_P \cdot H_P$$

Derivando la función respecto a H_p tenemos:

$$\frac{\partial v_p}{\partial H_p} = \frac{\pi}{4} (D_p)^2$$

Las incertidumbres $u(D_p)$ y $u(H_p)$ se obtiene del certificado de calibración del instrumento empleado para la toma de las medidas.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{16} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial v_p}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial v_p} = N \frac{g_l * \rho_f * [1 + \alpha_{C_{p-c}} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.11 Densidad del Fluido de transmisión de la presión (ρ_f), el valor de la densidad del fluido y su incertidumbre se obtienen, normalmente de las especificaciones del fabricante.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\rho_f) = \frac{\delta \rho_f}{\sqrt{3}}$$

$\delta \rho_f$ es el límite máximo de variación de la densidad del fluido, generalmente las densidades de los aceites empleados en las balanzas de presión se encuentran en el rango de $890 \frac{kg}{m^3} \pm 10 \frac{kg}{m^3}$.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{17} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_f}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \rho_f} = \frac{-v_C * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) * D - N * [-v_P * g_l + g_l * h * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)] * [1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.12 Tensión superficial del fluido de transmisión de la presión (γ), el valor de la tensión superficial del fluido y su incertidumbre se obtienen normalmente de las especificaciones del fabricante.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(\gamma) = \frac{\delta\gamma}{\sqrt{3}}$$

$\delta\gamma$ es el límite máximo de variación de la tensión superficial del fluido, el rango de la tensión superficial para los aceites comúnmente empleados en las balanzas de presión estarán entre $30 \text{ mN/m} \pm 1 \text{ mN/m}$ entonces

$$\delta\gamma = \pm 1 \text{ mN/m}.$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \gamma} = \frac{C_C * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) * D - N * C_P * [1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

$$C_{18} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \gamma}$$

10.13 Longitud de la circunferencia del pistón de la balanza de presión a calibrar (C_C), se obtiene a partir del diámetro del pistón que se midió en el ítem. 10,9.

D_C : Diámetro del pistón de la balanza de presión a calibrar.

$$C_C = \pi \cdot D_C \rightarrow u(C_C) = \frac{\partial C_C}{\partial D_C} \pi = \pi \cdot u(D_C)$$

La incertidumbre $u(D_C)$ se obtiene del certificado de calibración del instrumento empleado para la toma de medida.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{19} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial C_C}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial C_C} = \frac{\gamma * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P-p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)}{D}$$

10.14 Longitud de la circunferencia del pistón de la balanza de presión patrón

(C_P), se obtiene a partir del diámetro del pistón que se midió en el ítem. 9,10.

D_P : Diámetro del pistón de la balanza de presión patrón.

$$C_P = \pi \cdot D_P \rightarrow u(C_P) = \frac{\partial C_P}{\partial D_P} \pi = \pi \cdot u(D_P)$$

La incertidumbre $u(D_P)$ se obtiene del certificado de calibración del instrumento empleado para la toma de medida.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{20} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial C_P}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial C_P} = -N \frac{\gamma * [1 + \alpha_{C-p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.15 Área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la

balanza patrón (A_{oP}), el valor del área efectiva del conjunto pistón cilindro y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k, se obtienen del certificado de calibración patrón.

$$u(A_{oP}) = \frac{U(A_{oP})}{k}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{21} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial A_{oP}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial A_{oP}} = \frac{\left[\left[\left(m_{C\ Piston} + \delta m_{C\ Piston} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\ Piston}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_{l-vC} * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right] * \left[1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r) \right] * \left(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2 \right) * D - N * Pcol * \left[1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r) \right] * \left(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2 \right) * \left[1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r) \right]}{D^2}$$

9.16 Deriva del área efectiva a la temperatura de referencia y a presión

atmosférica de la balanza patrón (δA_{oP}), el valor del área efectiva del conjunto pistón cilindro puede variar entre calibraciones esto es lo que normalmente se conoce como deriva. Se considera que su valor es cero y se incluye como una contribución a la incertidumbre.

Si el intervalo de deriva es $\pm \delta A_{oP}$, la incertidumbre debida a la deriva es:

$$u(\delta A_{oP}) = \frac{\delta A_{oP}}{\sqrt{3}}$$

Cuando solo se tiene una calibración se puede utilizar la incertidumbre expandida del área efectiva del pistón de la balanza de presión patrón como la deriva.

$$u(\delta A_{oP}) = \frac{U(A_{oP})}{\sqrt{3}}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

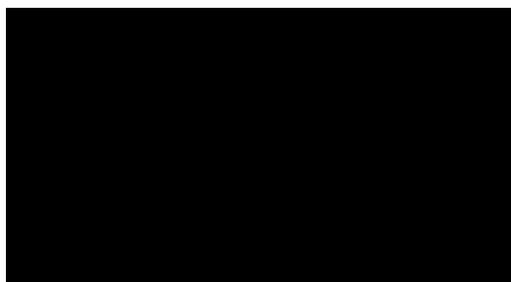
$$C_{22} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \delta A_{oP}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \delta A_{oP}} = \frac{\left[\left[\left(m_{C\ Piston} + \delta m_{C\ Piston} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\ Piston}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_{l-vC} * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right] * \left[1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r) \right] * \left(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2 \right) * D - N * Pcol * \left[1 + \alpha_{P\ p-c} * (t_P - t_r) \right] * \left(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2 \right) * \left[1 + \alpha_{C\ p-c} * (t_C - t_r) \right]}{D^2}$$

10.17 Coeficiente de dilatación térmica del ensamble pistón cilindro de la

balanza de presión a calibrar ($\alpha_{C\ p-c}$), el área del ensamble pistón-cilindro

se incrementa con el aumento de la temperatura, el coeficiente de expansión térmica del pistón-cilindro es el resultado de la suma del coeficiente de expansión térmica del pistón mas el coeficiente de expansión térmica del material del cilindro, en el siguiente cuadro se muestra las combinaciones de los materiales mas comunes en ensamble pistón- cilindro.



Nota: Lista de coeficientes de expansión térmica de los materiales comúnmente usados para el ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión - Referencia de la GUÍA METAS – Agosto 2002, pagina 4.

El valor también puede ser obtenido de las especificaciones del fabricante o de las características del material con el que esta construido y se asume que su valor puede variar en un $\pm 10\%$.

$$u(\alpha_{C_{p-c}}) = \frac{\delta(\alpha_{C_{p-c}})}{\sqrt{3}}$$

$$\delta(\alpha_{C_{p-c}}) = \pm 10\% \text{ del coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón-cilindro}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{23} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \alpha_{C_{p-c}}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \alpha_{C_{p-c}}} = -N \frac{\left[\left[\left(m_{P \text{ Piston}} + \delta m_{P \text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP \text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iP} + \delta m_{iP} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l \right]}{D^2} * [(t_C - t_r)]$$

$$- v_P * g_l * \rho_f + \gamma * C_P + \left[\frac{P_{col} * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P_{p-c}} * (t_P - t_r)] *}{(1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)} \right]$$

10.18 Coeficiente de dilatación térmica del ensamble pistón cilindro de la

balanza de presión patrón ($\alpha_{P_{p-c}}$), el área del ensamble pistón-cilindro se incrementa con el aumento de la temperatura, el coeficiente de expansión térmica del pistón-cilindro es el resultado de la suma del coeficiente de expansión térmica del pistón mas el coeficiente de expansión térmica del material del cilindro, en el siguiente cuadro se muestra las combinaciones de los materiales mas comunes en ensamble pistón- cilindro.

El valor también puede ser obtenido de las especificaciones del fabricante o de las características del material con el que esta construido y se asume que su valor puede variar en un $\pm 10\%$.

$$u(\alpha_{P-p-c}) = \frac{\delta(\alpha_{P-p-c})}{\sqrt{3}}$$

$$\delta(\alpha_{P-p-c}) = \pm 10\% \text{ del coeficiente de expansión térmica del ensamble pistón-cilindro}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{24} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial \alpha_{P-p-c}}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial \alpha_{P-p-c}} = \frac{\left[\left[\left(m_{C\text{ Piston}} + \delta m_{C\text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_l - v_C * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right] * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * (t_P - t_r) * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) * D - N * P_{col} * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * (t_P - t_r) * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) * [1 + \alpha_{C-p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.20 Temperatura del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión

(t_C) , la temperatura del ensamble pistón-cilindro se mide a través de una sonda de temperatura.

La incertidumbre expandida con su respectivo factor de cobertura que se obtienen a partir del certificado de calibración, mas la deriva de la sonda por el método de medida de la temperatura del ensamble pistón-cilindro, entre otros; se puede asumir que esta en un intervalo de variación máxima de $\pm 0,5$ °C (ver ítem 8,3 (e)); con la condición que la incertidumbre del instrumento de medición de temperatura sea menor o igual que la mitad del intervalo requerido de $\pm 0,5$ °C en las pruebas y condiciones de la calibración.

$$u(t_C) = \frac{\delta(t_C)}{\sqrt{3}}; \quad \delta(t_C) = \pm 0,5 \text{ °C}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{25} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial t_c}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial t_c} = -N \frac{\left[\left[\left(m_{P\text{ Piston}} + \delta m_{P\text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iP} + \delta m_{iP} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l \right.}{D^2} \left. * \alpha_{C\text{ p-c}} \right] - v_P * g_l * \rho_f + \gamma * C_P + [Pcol * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2)]$$

10.21 Coeficiente de deformación elástica lineal del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión patrón (b_p), el valor del coeficiente de deformación con la presión del conjunto pistón cilindro y su incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k, normalmente k = 2, se obtienen del certificado de calibración del patrón.

$$u(b_p) = \frac{U(b_p)}{2}$$

Nota: En caso no se especifique el coeficiente de deformación elástica, por experiencia técnica, se asumirá un valor promedio de $1 * 10^{-9}$ con una incertidumbre estándar de igual valor nominal, para este caso se considera una distribución rectangular.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{27} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial b_p}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial b_p} = \frac{\left[\left[\left(m_{C\text{ Piston}} + \delta m_{C\text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_l - v_C * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right.}{D^2} \left. * \left(A_{oP} + \delta A_{oP} \right) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * p_n * D - N * Pcol * \left(A_{oP} + \delta A_{oP} \right) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * p_n * [1 + \alpha_{C\text{ p-c}} * (t_C - t_r)] \right]$$

10.22 Coeficiente de deformación elástica cuadrática del ensamble pistón-cilindro de la balanza de presión patrón (b'_p), el valor del coeficiente de deformación con la presión cuadrática del conjunto pistón cilindro y su

incertidumbre expandida, para un factor de cobertura k , normalmente $k = 2$, se obtienen del certificado de calibración del patrón.

$$u(b'_p) = \frac{U(b'_p)}{2}$$

En caso no se especifique en el certificado de calibración que el comportamiento de la deformación con la presión del pistón sigue un comportamiento cuadrático, se asumirá que la deformación con la presión del pistón sigue un comportamiento lineal, por lo tanto $b'_p = 0$ al igual que su incertidumbre.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{28} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial b'_p}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial b'_p} = \frac{\left[\left[\left(m_{C\text{ Piston}} + \delta m_{C\text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_{l-vC} * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right] * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * p_n^2 * D - N * Pcol * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * p_n^2 * [1 + \alpha_{C\text{ p-c}} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.23 Presión nominal p_n , su incertidumbre se obtiene de las especificaciones del fabricante o del certificado de calibración para la presión generada por la balanza de presión patrón en las condiciones de utilización.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(p_n) = \frac{\delta(p_n)}{\sqrt{3}}$$

$\delta(p_n)$ es la variación de la presión que se da en las especificaciones del fabricante para el valor nominal de la presión generada en las condiciones de utilización. $U(p_n)$.

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{29} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial p_n}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial p_n} = \frac{\left[\left[\left(m_{C\text{ Piston}} + \delta m_{C\text{ Piston}} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n \left(m_{iC} + \delta m_{iC} \right) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right] * g_{l-vC} * g_l * \rho_f + \gamma * C_C \right] * \left[(A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (b_P + 2 * b'_p * p_n) \right] * D - N * Pcol * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_P - t_r)] * (b_P + 2 * b'_p * p_n) * [1 + \alpha_{C\text{ p-c}} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

10.24 Diferencia de altura entre los niveles de referencia de las balanzas (h), la

diferencia de altura se mide a través de una regla. La incertidumbre expandida que se obtiene se su certificado de calibración, mas la deriva de la regla y el método de medida de la diferencia de alturas; esta dentro de un intervalo $\pm \delta h$ y se asumirá que este intervalo será igual a 10 veces la incertidumbre expandida de la regla.

Su incertidumbre se trata como una distribución rectangular:

$$u(h) = \frac{\delta h}{\sqrt{3}}$$

Su coeficiente de sensibilidad se calculara de la siguiente manera:

$$C_{30} = \frac{\partial A_{eC}}{\partial h}$$

$$\frac{\partial A_{eC}}{\partial h} = -N \frac{\rho_f * g_l * (A_{oP} + \delta A_{oP}) * [1 + \alpha_{P-p-c} * (t_P - t_r)] * (1 + b_P * p_n + b'_P * p_n^2) * [1 + \alpha_{C-p-c} * (t_C - t_r)]}{D^2}$$

Partiendo de las formulas anteriores, se construye la tabla del presupuesto de la incertidumbre.

10.25 Determinación de la incertidumbre de A_{oC} por regresión lineal

La incertidumbre de A_{oC} se determinara:

$$u(A_{oC}) = \sqrt{(u(A_{eC(\max)}))^2 + (S_{er})^2}$$

Donde:

$u(A_{eC(\max)})$ = es la máxima incertidumbre obtenida en cualquier punto de medición.

S_{er} = incertidumbre de la curva de ajuste o de la regresión lineal (VER Anexo 1).

9.26 Determinación del cociente de deformación elástica

De las formulas del Anexo 1 tenemos:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m = a_0 \left(1 + \frac{a_1}{a_0} \cdot x + \frac{a_2}{a_0} \cdot x^2 + \dots + \frac{a_m}{a_0} \cdot x^m \right)$$

De las formulas anteriores sabemos que la variación del área con la presión

esta dada por la siguiente formula $A_{eC} = A_{oC} (1 + b_C \cdot p_n + b'_C \cdot p_n^2)$.

Por analogía:

Área efectiva $A_{eC} = y$

Área efectiva a temperatura de referencia y presión atmosférica $A_{oC} = a_0$

Coefficiente de deformación elástica lineal $b_C = \frac{a_1}{a_0}$

Coefficiente de deformación elástica cuadrática $b'_C = \frac{a_2}{a_0}$

Presión nominal $p_n = x$

10.27 Incertidumbre del coeficiente de deformación elástica lineal b_C

La incertidumbre del coeficiente de deformación elástica lineal (considerando que la correlación es despreciable) será:

$$u(b_C) = b_C \sqrt{\left(\frac{u(a_1)}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{u(A_{oC})}{A_{oC}} \right)^2}$$

$u(a_1)$ = Incertidumbre estándar del coeficiente a_1 , se calcula a partir del APÉNDICE 1.

10.28 Incertidumbre del coeficiente de deformación elástica cuadrática b'_c

La incertidumbre del coeficiente de deformación elástica cuadrática (considerando que la correlación es despreciable) será:

$$u(b'_c) = b'_c \sqrt{\left(\frac{u(a_2)}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{u(A_{oC})}{A_{oC}}\right)^2}$$

$u(a_2)$ = Incertidumbre estándar del coeficiente a_2 , se calcula a partir del Anexo 1.

TABLA DE PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE					
Magnitud de entrada X_i	Valor estimado	Incertidumbre Típica $u(x_i)$	Distribución de probabilidad	Coficiente de sensibilidad $ C_i $	Contribución a la incertidumbre $u(y_i)$
$m_{C\ Piston}$	$m_{C\ Piston}$	$\frac{U(m_{C\ Piston})}{k}$	Normal	C_1	$C_1 \frac{U(m_{C\ Piston})}{k}$
m_{iC}	m_{iC}	$\frac{U(m_{iC})}{k}$	Normal	C_2	$C_2 \frac{U(m_{iC})}{k}$
$m_{P\ Piston}$	$m_{P\ Piston}$	$\frac{U(m_{P\ Piston})}{k}$	Normal	C_3	$C_3 \frac{U(m_{P\ Piston})}{k}$
m_{iP}	m_{iP}	$\frac{U(m_{iP})}{k}$	Normal	C_4	$C_4 \frac{U(m_{iP})}{k}$
$\delta m_{C\ Piston}$	0	$\frac{\delta m_{C\ Piston}}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(m_{C\ Piston})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_5	$C_5 \frac{\delta m_{C\ Piston}}{\sqrt{3}}$ o $C_5 \frac{U(m_{C\ Piston})}{\sqrt{3}}$
δm_{iC}	0	$\frac{\delta m_{iC}}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(\delta m_{iC})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_6	$C_6 \frac{\delta m_{iC}}{\sqrt{3}}$ o $C_6 \frac{U(\delta m_{iC})}{\sqrt{3}}$
$\delta m_{P\ Piston}$	0	$\frac{\delta m_{P\ Piston}}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(m_{P\ Piston})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_7	$C_7 \frac{\delta m_{P\ Piston}}{\sqrt{3}}$ o $C_7 \frac{U(m_{P\ Piston})}{\sqrt{3}}$
δm_{iP}	0	$\frac{\delta m_{iP}}{\sqrt{3}}$ o $\frac{U(\delta m_{iP})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_8	$C_8 \frac{\delta m_{iP}}{\sqrt{3}}$ o $C_8 \frac{U(\delta m_{iP})}{\sqrt{3}}$
ρ_a	ρ_a	$u(\rho_a)$	Normal	C_9	$C_9 u(\rho_a)$

ρ_{mC}	ρ_{mC} (certificado) o	$\frac{U_C(\rho_{mC})}{k}$ o	Normal	C_{10}	$C_{10} \frac{U_C(\rho_{mC})}{k}$ o
	ρ_{mC} (fabricante) o	$\frac{U_C(\rho_{mC})}{\sqrt{3}}$ o	Rectangular		$C_{10} \frac{U_C(\rho_{mC})}{\sqrt{3}}$ o
	$\rho_{mC} = \frac{\rho_{mC \max} + \rho_{mC \min}}{2}$	$\frac{\left \begin{array}{l} \rho_{mC \max} \\ \rho_{mC \min} \end{array} \right }{\sqrt{12}}$	Rectangular		$C_{10} \frac{\left \begin{array}{l} \rho_{mC \max} \\ \rho_{mC \min} \end{array} \right }{\sqrt{12}}$
$\rho_{mC \text{ Piston}}$	$\rho_{mC \text{ Piston}}$ (certificado) o	$\frac{U_C(\rho_{mC \text{ Piston}})}{k}$ o	Normal	C_{11}	$C_{11} \frac{U_C(\rho_{mC \text{ Piston}})}{k}$ o
	$\rho_{mC \text{ Piston}}$ (fabricante) o	$\frac{U_C(\rho_{mC \text{ Piston}})}{\sqrt{3}}$ o	Rectangular		$C_{11} \frac{U_C(\rho_{mC \text{ Piston}})}{\sqrt{3}}$ o
	$\rho_{mC \text{ Piston}} = \frac{\rho_{mC \text{ Piston max}} + \rho_{mC \text{ Piston min}}}{2}$	$\frac{\left \begin{array}{l} \rho_{mC \text{ Piston max}} \\ \rho_{mC \text{ Piston min}} \end{array} \right }{\sqrt{12}}$	Rectangular		$C_{11} \frac{\left \begin{array}{l} \rho_{mC \text{ Piston max}} \\ \rho_{mC \text{ Piston min}} \end{array} \right }{\sqrt{12}}$
ρ_{mP}	ρ_{mP} (certificado) o	$\frac{U_C(\rho_{mP})}{k}$ o	Normal	C_{12}	$C_{12} \frac{U_C(\rho_{mP})}{k}$ o
	ρ_{mP} (fabricante) o	$\frac{U_C(\rho_{mP})}{\sqrt{3}}$ o	Rectangular		$C_{12} \frac{U_C(\rho_{mP})}{\sqrt{3}}$ o
	$\rho_{mP} = \frac{\rho_{mP \max} + \rho_{mP \min}}{2}$	$\frac{\left \begin{array}{l} \rho_{mP \max} \\ \rho_{mP \min} \end{array} \right }{\sqrt{12}}$	Rectangular		$C_{12} \frac{\left \begin{array}{l} \rho_{mP \max} \\ \rho_{mP \min} \end{array} \right }{\sqrt{12}}$

$\rho_{mP Piston}$	$\rho_{mP Piston}$ (certificado) o	$\frac{U_C(\rho_{mP Piston})}{k}$ o	Normal	C_{13}	$C_{13} \frac{U_C(\rho_{mP Piston})}{k}$ o
	$\rho_{mP Piston}$ (fabricante) o	$\frac{U_C(\rho_{mP Piston})}{\sqrt{3}}$ o	Rectangular		$C_{13} \frac{U_C(\rho_{mP Piston})}{\sqrt{3}}$ o
	$\rho_{mP Piston} = \frac{\rho_{mP Piston \max} + \rho_{mP Piston \min}}{2}$	$\frac{\left \begin{matrix} \rho_{mP Piston \max} \\ \rho_{mP Piston \min} \end{matrix} \right }{\sqrt{12}}$	Rectangular		$C_{13} \frac{\left \begin{matrix} \rho_{mP Piston \max} \\ \rho_{mP Piston \min} \end{matrix} \right }{\sqrt{12}}$
g_l	g_l (certificado) o	$\frac{U(g_l)}{k}$ o	Normal	C_{14}	$C_{14} \frac{U(g_l)}{k}$ o
	g_l (sin factor k) o	$\frac{U(g_l)}{\sqrt{3}}$ o	Rectangular		$C_{14} \frac{U(g_l)}{\sqrt{3}}$ o
	g_l (según APÉNDICE 3)	$g_l (\pm 0,01\%)$	Normal		$C_{14} g_l (\pm 0,01\%)$
v_C	v_C	$u(v_C)$	Normal	C_{15}	$C_{15} u(v_C)$
v_P	v_P	$u(v_P)$	Normal	C_{16}	$C_{16} u(v_P)$
ρ_f	ρ_f	$\frac{\delta\rho_f}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{17}	$C_{17} \frac{\delta\rho_f}{\sqrt{3}}$
γ	γ	$\frac{\delta\gamma}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{18}	$C_{18} \frac{\delta\gamma}{\sqrt{3}}$
C_C	C_C	$u(C_C)$	Normal	C_{19}	$C_{19} u(C_C)$
C_P	C_P	$u(C_P)$	Normal	C_{20}	$C_{20} u(C_P)$

A_{oP}	A_{oP}	$\frac{U(A_{oP})}{k}$	Normal	C_{21}	$C_{21} \frac{U(A_{oP})}{k}$
δA_{oP}	0	$\frac{\delta A_{oP}}{\sqrt{3}} \circ \frac{U(A_{oP})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{22}	$C_{22} \frac{\delta A_{oP}}{\sqrt{3}} \circ$ $C_{22} \frac{U(A_{oP})}{\sqrt{3}}$
$\alpha_{C_{p-c}}$	$\alpha_{C_{p-c}}$	$\frac{\delta(\alpha_{C_{p-c}})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{23}	$C_{23} \frac{\delta(\alpha_{C_{p-c}})}{\sqrt{3}}$
$\alpha_{P_{p-c}}$	$\alpha_{P_{p-c}}$	$\frac{\delta(\alpha_{P_{p-c}})}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{24}	$C_{24} \frac{\delta(\alpha_{P_{p-c}})}{\sqrt{3}}$
t_C	t_C	$\frac{\delta(t_C)}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{25}	$C_{25} \frac{\delta(t_C)}{\sqrt{3}}$
t_P	t_P	$\frac{\delta(t_P)}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{26}	$C_{26} \frac{\delta(t_P)}{\sqrt{3}}$
b_P	b_P	$\frac{U(b_P)}{2}$	Normal	C_{27}	$C_{27} \frac{U(b_P)}{2}$
b'_P	b'_P	$\frac{U(b'_P)}{2}$	Normal	C_{28}	$C_{28} \frac{U(b'_P)}{2}$
p_n	p_n (certificado) o	$\frac{U_C(\rho_{mP})}{\sqrt{3}}$ o	Rectangular	C_{29}	$C_{29} \frac{U_C(\rho_{mP})}{\sqrt{3}}$ o
	p_n (fabricante)	$\frac{\delta(p_n)}{\sqrt{3}}$	Rectangular		$C_{29} \frac{\delta(p_n)}{\sqrt{3}}$
h	h	$\frac{\delta h}{\sqrt{3}}$	Rectangular	C_{30}	$C_{30} \frac{\delta h}{\sqrt{3}}$

10.29 Calculo de la incertidumbre de la presión generada por el conjunto

pistón y pesas.

Teniendo el modelo matemático de la ecuación 9.8.

$$P = \frac{k \cdot m \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)}{A_{oC}} \cdot g_l \quad \dots\dots\dots(\text{Ec. 8.8})$$

Donde:

- m = Masa de la pesa (kg)
- g_l = aceleración de la gravedad local (m/s²)
- ρ_a = Densidad del aire en el ambiente (kg/m³)
- ρ_p = Densidad de la pesa (kg/m³)
- k = Factor de Conversión a otra unidad de presión
- A_{oC} = Área efectiva a la temperatura de referencia y a presión atmosférica de la balanza a calibrar (m²).

Aplicando el método de la guía de la expresión de la incertidumbre

$$u^2(P) = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_a}\right)^2 \cdot u^2(\rho_a) + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho_p}\right)^2 \cdot u^2(\rho_p) + \left(\frac{\partial P}{\partial g_l}\right)^2 \cdot u^2(g_l) + \left(\frac{\partial P}{\partial m}\right)^2 \cdot u^2(m) + \left(\frac{\partial P}{\partial A_{oC}}\right)^2 \cdot u^2(A_{oC})$$

Donde:

$$C_{1P} = \frac{\partial P}{\partial \rho_a} = \frac{k \cdot m \cdot g_l}{A_{oC}} \left(\frac{-1}{\rho_p}\right); \quad C_{2P} = \frac{\partial P}{\partial \rho_p} = \frac{k \cdot m \cdot g_l \cdot \rho_a}{A_{oC}} \cdot \frac{1}{(\rho_p)^2};$$

$$C_{3P} = \frac{\partial P}{\partial g_l} = \frac{k \cdot m}{A_{oC}} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right); \quad C_{4P} = \frac{\partial P}{\partial m} = \frac{k \cdot g_l}{A_{oC}} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right);$$

$$C_{5P} = \frac{\partial P}{\partial A_{oC}} = -\frac{k \cdot m \cdot g_l}{(A_{oC})^2} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}\right)$$

10.30 Validación del método: Demostrar que las características de desempeño de un método de medición son adecuadas para la exactitud requerida.

Para asegurar que la trazabilidad de las mediciones se mantiene y que el valor de la incertidumbre de la medición es válido, el laboratorio evaluado puede demostrarlo mediante lo siguiente:

a) Comparación de resultados alcanzados con otros métodos.

El nuevo método se puede validar si al comparar los resultados obtenidos entre éste y otro método diferente validado los resultados que se obtienen son comparables entre ambos métodos.

b) Comparaciones entre laboratorios.

Cuando se comparan los resultados obtenidos por uno o más laboratorios externos (preferentemente acreditados) utilizando un método. Se analizan por medio de normas y/o documentos técnicamente válidos, p. e. ISO-5725.

c) Evaluación sistemática de los factores que tienen influencia en los resultados.

Consiste en cuantificar la variabilidad de cada factor que afecta los resultados de la medición; dicha cuantificación se realiza de manera individual, suele aplicarse cuando no se cuenta con un modelo matemático que incluya todas las variables de influencia. A esto se le llama también caracterización.

Esto también puede hacerse para mejora de incertidumbre sobre un modelo matemático ya conocido.

d) Evaluación de la incertidumbre de los resultados con base en el conocimiento científico de los principios teóricos del método y de la experiencia práctica.

Esta evaluación aplica principalmente cuando el laboratorio desea mejorar su incertidumbre o no tiene bien caracterizadas las variables de influencia que afectan las mediciones durante la calibración de balanzas de presión.

Nota: Cuando se hacen algunos cambios en los métodos no normalizados validados, la influencia de tales cambios debe ser documentada.

e) Evaluación de la incertidumbre del laboratorio.

Ésta puede ser determinada mediante el uso de los resultados de ensayos de aptitud, pruebas R y r, análisis de varianzas o cualquier otro método que asegure la confiabilidad en las mediciones derivadas de factores humanos.

La validación del método debe incluir las especificaciones de los requisitos, determinación de las características del método, una verificación de que se pueden cumplir los requisitos usando dicho método y una declaración en la validez.

Se pueden aplicar uno o varios de los incisos anteriores, tomando en cuenta que el fin es demostrar que el método se encuentra validado y que se identificaron y validaron los aspectos que puedan influir sobre la trazabilidad y la incertidumbre de las mediciones.

Para validar nuestros resultados emplearemos el método “a”, comparando nuestros resultados contra los reportados por el Servicio Nacional de Metrología – INDECOPI empleando el índice de compatibilidad, C , conocido también como Error Normalizado (E_n), definido como un coeficiente que determina la bondad del aseguramiento de la calidad de los resultados de las calibraciones.

La determinación de C se realiza en función de los valores e incertidumbre reportados, tanto por el laboratorio participante como por el laboratorio piloto.

Su definición viene dada por:

$$C = \frac{|E_L - E_P|}{\sqrt{u_L^2 + u_P^2}}$$

Donde:

E_L es el resultado (error promedio) obtenido en el laboratorio o profesional participante.

E_P es el resultado que aparece en el certificado del patrón o valor aportado por el laboratorio piloto.

u_L es la incertidumbre de medición calculada por el laboratorio o profesional participante.

u_P es la incertidumbre de medición que aparece en el certificado de calibración o valor aportado por el laboratorio piloto.

Para una buena aceptación de los resultados, debe tener un índice de compatibilidad $C \leq 1$.

CAPITULO 11

DATOS Y RESULTADOS

Para los ensayos de calibración de la balanza de presión hemos empleado como patrón:

La balanza de presión de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Marca: CHANDLER ENGINEERING CO.

Modelo: 23-1

Serie: 8554

Certificado de Calibración: LFP-358-2008

La balanza a calibrar es de la empresa METROLOGÍA E INGENIERÍA LINO S.A.C.

Marca: No indica

Modelo: No indica

Identificación: IP-034

Certificado de Calibración: LFP-171-2007

Instrumentos auxiliares:

Balanzas:

Certificado de calibración:

M-257-2008 de METROIL S.A.C.

M-741-2008 de METROIL S.A.C.

Pesas:

Certificados de calibración:

LM-1714-DKD-K-35001-2008-01 del SNM-INDECOPI

LM-1627-DKD-K-35001-2007-11 del SNM-INDECOPI

LM-1620-DKD-K-35001-2007-11 del SNM-INDECOPI
LM-1020-2007 del SNM-INDECOPI
LM-1031-2007 del SNM-INDECOPI

Termohigrometros:

Certificados de calibración:

T-499-2008 de METROIL S.A.C.
T-500-2008 de METROIL S.A.C.

Barómetros:

Certificados de calibración:

LFP-338-2008 del SNM-INDECOPI

Pie de Rey, regla y nivel:

Certificados de calibración:

LLA-365-2008 del SNM-INDECOPI
LLA-051-2008 del SNM-INDECOPI
LLA-212-2008 del SNM-INDECOPI

Todos los documentos de los instrumentos empleados se muestran en el Anexo F;

TRAZABILIDADES.

Tabla 11.1

DATOS GENERALES			Incertidumbre u (λ)	
Coefficiente de Tensión Superficial Aceite Mineral	(N/m)	0,0305	±	0,00057735
Densidad del fluido	ρ_f (kg/m ³)	890	±	5,773502692
Gravedad Normalizada	g (m/s ²)	9,80665		
Gravedad Local	g_L (m/s ²)	9,78260008	±	2,88675E-07
Temperatura de Referencia	t_r (°C)	20		Internacional Europeo

BALANZA DE PESO MUERTO PATRON			Incertidumbre u (λ)	
Coefficiente de Dilatación Térmica del Pistón	PP_C (°C ⁻¹)	2,94E-05	±	1,70E-06
Densidad de las pesas	m_P (kg/m ³)	8 390	±	85

Pesas: Chandler, Dewit

Valores de un Certificado de Calibración (k = 2)

PISTON DE BAJA PRESIÓN DE LA BALANZA PATRÓN			Incertidumbre u (λ)	
Area del Pistón de Baja	$A_{PBP(0,20)}$ (m ²)	1,78370E-05	±	1,75E-09
Masa Pistón - Platillo de Baja Presión	m_{PBP} (kg)	6,26600E-02	±	1,00E-05
Coefficiente de Deformación Elástica Pistón-Cilindro de Baja Presión	b_{PBP} (m ² /N)	1,00E-09	±	5,77E-11
Longitud del Pistón de Baja Presión	L_{PBP} (m)	0,0655	±	3,25E-08
Diametro del Pistón de Baja Presión	D_{PBP} (m)	0,00435	±	3,25E-08
Altura del portamasa del Pistón - Nivel de Referencia de Baja	H_{PBP} (m)	0,189	±	0,00057735
Densidad del Pistón de Baja Presión	PBP (kg/m ³)	7 800	±	70

Piston: Ametek, Ashcroft-Dresser, Terris, Chandler, Dewit

Valores de un Certificado de Calibración (k = 2)

PISTON DE ALTA PRESIÓN DE LA BALANZA PATRÓN			Incertidumbre u (λ)	
Area del Pistón de Alta	$A_{PAP(0,20)}$ (m ²)		±	
Masa Pistón - Platillo de Alta Presión	m_{PAP} (kg)		±	
Coefficiente de Deformación Elástica Pistón-Cilindro de Alta Presión	b_{PAP} (m ² /N)		±	
Longitud del Pistón de Alta Presión	L_{PAP} (m)		±	3,25E-08
Diametro del Pistón de Alta Presión	D_{PAP} (m)		±	3,25E-08
Altura del portamasa del Pistón - Nivel de Referencia de Alta	H_{PAP} (m)		±	0,00057735
Densidad del Pistón de Alta Presión	PAP (kg/m ³)	13 300	±	0

Piston: DH Instruments, DH Budenberg, Ruska, Pressureme

Valores de un Certificado de Calibración (k = 2)

Continúa en la siguiente página →

BALANZA DE PESO MUERTO A CALIBRAR			Incertidumbre U (%)	
Coefficiente de Dilatación Térmica del Pistón	$\bar{c}_{P.C} (°C^{-1})$	2,94E-05	±	1,70E-06
Densidad de las pesas	$\bar{\rho}_{nc} (kg/m^3)$	7 950	±	70

Acero inoxidable ▼

Valores de un Certificado de Calibración (k = 2) ▼

PISTON DE BAJA PRESION DE LA BALANZA A CALIBRAR			Incertidumbre U (%)	
Masa Pistón - Platillo de Baja	$m_{CBP} (kg)$	1,42E-01	±	8,00E-07
Longitud del Pistón de Baja Presión	$L_{CBP} (m)$	0,10698	±	3,25E-08
Diametro del Pistón de Baja Presión	$D_{CBP} (m)$	0,007162	±	3,25E-08
Altura del portamasa del Pistón de Baja - Nivel de Referencia	$H_{CBP} (m)$	0,249	±	0,00057735
Densidad del Pistón de Baja Presión	$\bar{\rho}_{CBP} (kg/m^3)$	7 800	±	70

Piston: Ametek, Ashcroft-Dresser, Terris, Chandler, Dewit ▼

Valores de un Certificado de Calibración (k = 2) ▼

PISTON DE ALTA PRESION DE LA BALANZA A CALIBRAR			Incertidumbre U (%)	
Masa Pistón - Platillo de Alta	$m_{CAP} (kg)$		±	
Longitud del Pistón de Alta Presión	$L_{CAP} (m)$		±	3,25E-08
Diametro del Pistón de Alta Presión	$D_{CAP} (m)$		±	3,25E-08
Altura del portamasa del Pistón de Alta - Nivel de Referencia	$H_{CAP} (m)$		±	0,00057735
Densidad del Pistón de Alta Presión	$\bar{\rho}_{CAP} (kg/m^3)$	7 800	±	70

Piston: Ametek, Ashcroft-Dresser, Terris, Chandler, Dewit ▼

Valores de un Certificado de Calibración (k = 2) ▼

VOLUMEN DEL PISTON DE LAS BALANZAS DE PRESION SOMETIDO AL EMPUJE DEL FLUIDO			Incertidumbre U (%)	
% de la long. del Pistón a calibrar sometido al empuje del fluido	$\%_{CBP}$	50		
Volumen del Pistón a Calibrar sometido al empuje del fluido	$V_{CBP} (m^3)$	2,15492E-06	±	1,96E-11
% de la long. del Pistón a calibrar sometido al empuje del fluido	$\%_{CAP}$			
Volumen del Pistón a Calibrar sometido al empuje del fluido	$V_{CAP} (m^3)$	0	±	0,00E+00
% de la long. del Pistón patrón sometido al empuje del fluido	$\%_{PBP}$	10		
Volumen del Pistón patrón sometido al empuje del fluido	$V_{PBP} (m^3)$	9,73441E-08	±	1,53E-12
% de la long. del Pistón patrón sometido al empuje del fluido	$\%_{PAP}$			
Volumen del Pistón patrón sometido al empuje del fluido	$V_{PAP} (m^3)$	0	±	0,00E+00

CARACTERISTICAS DE LOS INSTRUMENTOS AUXILIARES	
Termohigrometro (Condiciones ambientales)	
Temperatura	
División mínima (°C)	Incertidumbre (°C) (k=2)
0,1	0,7
Humedad	
División mínima (%)	Incertidumbre (%) (k=2)
1	4,8
Barometro (Condiciones ambientales)	
Presión	
División mínima (mbar)	Incertidumbre (mbar) (k=2)
1	0,3
Vernier	
Diámetro - Longitud (Pistón)	
División mínima (mm)	Incertidumbre (mm) (k=2)
0,05	0,065
Regla	
Altura	
División mínima (mm)	Incertidumbre (mm) (k=2)
1	0,1
Termometro (Temp. Ensamble Pistón - Cilindro)	
Temperatura	
División mínima (°C)	Incertidumbre (°C) (k=2)
0,1	0,12

Incertidumbre del aire	
u (pa)	kg/m ³
0,001868611	

		Relación de presión (Alta / Baja) =	0	Clase asumida del patrón =	0,1		
BALANZA DE PESO MUERTO PATRON							
Nº Pesas	Codigo Identif.	PRESION		psi		Masa (kg)	Incert. (k = 2)
		Baja	Incertidumbre (k = 2)	Alta	Incertidumbre (k = 2)		
1	P _{BP}	5	0,005			0,06266 ± 0,00001	
2	P _{AP}					±	
3	5	10	0,005	0		0,06238 ± 0,000015	
4	10	10	0,005	0		0,12497 ± 0,000015	
5	20-1	20	0,005	0		0,25027 ± 0,00002	
6	20-2	20	0,005	0		0,25014 ± 0,00002	
7	20-3	20	0,005	0		0,25023 ± 0,00002	
8	20-4	20	0,005	0		0,25021 ± 0,00002	
9	100-1	100	0,01	0		1,25414 ± 0,000035	
10	100-2	100	0,01	0		1,25398 ± 0,000035	
11	100-3	100	0,01	0		1,25369 ± 0,000035	
12	100-4	100	0,01	0		1,25403 ± 0,000035	
13	500-1	500	0,01	0		6,2736 ± 0,00012	
14	500-2	500	0,01	0		6,273 ± 0,00012	

		Relación de presión (Alta / Baja) = 5		BALANZA DE PESO MUERTO A CALIBRAR			
Nº Pesas	Codigo	PRESION psi		Masa Convencional			Masa Real
	Identif.	Baja	Alta	kg	± mg	(kg) Incertidumbre (k = 2)	(kg)
1	Pistón + Porta masas 5 PSI	5		0,14163	± 0,8	0,14163 ± 0,000008	0,141630545
2	P _{AP}		25				
3	5 / 25 psi	5	25	0,141992	± 0,9	0,141992 ± 0,000009	0,141992134
4	A 10 / 50 psi	10	50	0,283387	± 0,8	0,283387 ± 0,000008	0,283387
5	B 10 / 50 psi	10	50	0,283361	± 0,9	0,283361 ± 0,000009	0,283361
6	C 10 / 50 psi	10	50	0,283392	± 0,9	0,283392 ± 0,000009	0,283392
7	A 20 / 100 psi	20	100	0,56678	± 9	0,56678 ± 0,000009	0,56678
8	B 20 / 100 psi	20	100	0,5668	± 9	0,5668 ± 0,000009	0,5668
9	A 40 / 200 psi	40	200	1,13127	± 9	1,13127 ± 0,000009	1,13127
10	B 40 / 200 psi	40	200	1,13219	± 9	1,13219 ± 0,000009	1,13219
11	C 40 / 200 psi	40	200	1,13219	± 9	1,13219 ± 0,000009	1,13219
12	A 100 / 500 psi	100	500	2,83225	± 14	2,83225 ± 0,000014	2,83225
13	B 100 / 500 psi	100	500	2,83223	± 11	2,83223 ± 0,000011	2,83223
14	C 100 / 500 psi	100	500	2,83225	± 11	2,83225 ± 0,000011	2,83225
15	E 100 / 500 psi	100	500	2,83229	± 18	2,83229 ± 0,000018	2,83229
16	F 100 / 500 psi	100	500	2,83231	± 16	2,83231 ± 0,000016	2,83231
17	G 100 / 500 psi	100	500	2,83229	± 12	2,83229 ± 0,000012	2,83229
18	H 100 / 500 psi	100	500	2,83229	± 18	2,83229 ± 0,000018	2,83229
19	I 100 / 500 psi	100	500	2,83226	± 11	2,83226 ± 0,000011	2,83226
20	J 100 / 500 psi	100	500	2,83238	± 14	2,83238 ± 0,000014	2,83238
21	K 100 / 500 psi	100	500	2,83235	± 11	2,83235 ± 0,000011	2,83235
22	L 100 / 500 psi	100	500	2,8324	± 12	2,8324 ± 0,000012	2,8324
23	M 100 / 500 psi	100	500	2,83226	± 11	2,83226 ± 0,000011	2,83226
24	N 100 / 500 psi	100	500	2,83237	± 11	2,83237 ± 0,000011	2,83237
25	O 100 / 500 psi	100	500	2,83228	± 12	2,83228 ± 0,000012	2,83228
26	P 100 / 500 psi	100	500	2,83238	± 11	2,83238 ± 0,000011	2,83238
27	Q 100 / 500 psi	100	500	2,83237	± 12	2,83237 ± 0,000012	2,83237
28	R 100 / 500 psi	100	500	2,83241	± 14	2,83241 ± 0,000014	2,83241
29	S 100 / 500 psi	100	500	2,83232	± 11	2,83232 ± 0,000011	2,83232

Prueba Ascendente														
BALANZA DE PESO MUERTO PATRON			CALCULO DE LA MASA CONVENCIONAL DE EQUILIBRIO											
SECUENCIA	PBP	PAP	5	10	20-1	20-2	20-3	20-4	100-1	100-2	100-3	100-4	500-1	
1 ^{era}	1	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	0	0	0	0
	2	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	1,25398	0	0	0
	3	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	1,25398	1,25369	1,25403	0
	4	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	0	0	0	0	6,2736
	5	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	1,25398	0	0	6,2736
	6	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	1,25398	1,25369	0	6,2736
	7	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	0	0	0	0	6,2736
	8	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	0	0	0	6,2736
	9	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	1,25398	1,25369	0	6,2736
	10	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	1,25398	1,25369	1,25403	6,2736

BALANZA DE PESO MUERTO A CALIBRAR			CALCULO DE LA MASA CONVENCIONAL DE EQUILIBRIO										
SECUENCIA	Pistón + Porta masas 5 PSI	PAP	5 / 25 psi	A 10 / 50 psi	B 10 / 50 psi	C 10 / 50 psi	A 20 / 100 psi	B 20 / 100 psi	A 40 / 200 psi	B 40 / 200 psi	C 40 / 200 psi	A 100 / 500 psi	B 100 / 500 psi
1 ^{era}	1	0,14163	0,141992				0,56678	0,5668				2,83225	
	2	0,14163	0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223
	3	0,14163	0,141992						1,13127			2,83225	2,83223
	4	0,14163	0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223
	5	0,14163	0,141992						1,13127			2,83225	2,83223
	6	0,14163	0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223
	7	0,14163	0,141992				0,56678	0,5668				2,83225	2,83223
	8	0,14163	0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223
	9	0,14163	0,141992						1,13127			2,83225	2,83223
	10	0,14163	0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223

E 100 / 500 psi	F 100 / 500 psi	G 100 / 500 psi	H 100 / 500 psi	I 100 / 500 psi	J 100 / 500 psi	K 100 / 500 psi	L 100 / 500 psi	M 100 / 500 psi	N 100 / 500 psi	O 100 / 500 psi
2,83229										
2,83229	2,83231									
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229							
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226						
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235				
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235	2,8324			
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235	2,8324	2,83226	2,83237	
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235	2,8324	2,83226	2,83237	2,83228

Tabla 11.5 (Primer ensayo con el Método de Flotación Cruzada – Prueba Ascendente)

Prueba Descendente

BALANZA DE PESO MUERTO PATRON CALCULO DE LA MASA CONVENCIONAL DE EQUILIBRIO

SECUENCIA	PBP	PAP	5	10	20-1	20-2	20-3	20-4	100-1	100-2	100-3	100-4	500-1	500-2
1	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	0	0	0	0	0
2	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	1,25398	0	0	0	0
3	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	1,25398	1,25369	1,25403	0	0
4	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	0	0	0	0	6,2736	0
5	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	1,25398	0	0	6,2736	0
6	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	1,25398	1,25369	0	6,2736	0
7	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	0	0	0	0	6,2736	6,273
8	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	0	0	0	6,2736	6,273
9	0,06266	0	0	0	0,25027	0,25014	0	0	1,25414	1,25398	1,25369	0	6,2736	6,273
10	0,06266	0	0	0,12497	0,25027	0,25014	0,25023	0,25021	1,25414	1,25398	1,25369	1,25403	6,2736	6,273

BALANZA DE PESO MUERTO A CALIBRAR CALCULO DE LA MASA CONVENCIONAL DE EQUILIBRIO

SECUENCIA	Pistón + Porta masas 5 PSI	PAP	5 / 25 psi	A 10 / 50 psi	B 10 / 50 psi	C 10 / 50 psi	A 20 / 100 psi	B 20 / 100 psi	A 40 / 200 psi	B 40 / 200 psi	C 40 / 200 psi	A 100 / 500 psi	B 100 / 500 psi	C 100 / 500 psi
1	0,14163		0,141992				0,56678	0,5668				2,83225		
2	0,14163		0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223	
3	0,14163		0,141992						1,13127			2,83225	2,83223	2,83225
4	0,14163		0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223	2,83225
5	0,14163		0,141992						1,13127			2,83225	2,83223	2,83225
6	0,14163		0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223	2,83225
7	0,14163		0,141992				0,56678	0,5668				2,83225	2,83223	2,83225
8	0,14163		0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223	2,83225
9	0,14163		0,141992						1,13127			2,83225	2,83223	2,83225
10	0,14163		0,141992	0,283387					1,13127	1,13219		2,83225	2,83223	2,83225

E 100 / 500 psi	F 100 / 500 psi	G 100 / 500 psi	H 100 / 500 psi	I 100 / 500 psi	J 100 / 500 psi	K 100 / 500 psi	L 100 / 500 psi	M 100 / 500 psi	N 100 / 500 psi	O 100 / 500 psi
2,83229										
2,83229	2,83231									
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229							
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83229	2,83226					
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235				
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235	2,8324			
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235	2,8324	2,83226	2,83237	
2,83229	2,83231	2,83229	2,83229	2,83226	2,83238	2,83235	2,8324	2,83226	2,83237	2,83228

$$p_p = \frac{\left[(m_{P\text{ Piston}} + \delta m_{P\text{ Piston}}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP\text{ Piston}}} \right) + \sum_{i=1}^n (m_{iP} + \delta m_{iP}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mP}} \right) \right] * g_l - v_p * g_l * \rho_f + \gamma * C_p}{(A_{oP} + \delta A_{oP}) * (1 + \alpha_{P\text{ p-c}} * (t_p - t_r)) * (1 + b_p * p_n + b'_p * p_n^2)} + P_{col}$$

Presión generada por la Balanza de Presión Patrón (p_p)								
Valor Nominal Pa	Temperatura Pistón-Cilindro (°C)	Masa Real del Pistón (kg)	Masa Real de las pesas (kg)	Area Efectiva A_{oP} (m ²)	Fuerza Efectiva (N)	Presión de la Columna de Fluido Pa (N/m ²)	Presión Real (p_p) Pa	
Creciente	1 034 213,6	22,9	0,0627	1,8175	1,78404E-05	18,390	-161,245	1 030 660,9
	2 068 427,1	22,9	0,0627	3,6969	1,78422E-05	36,773	-161,245	2 060 844,4
	3 102 640,7	23,0	0,0627	5,5772	1,78441E-05	55,165	-161,245	3 091 310,1
	4 136 854,2	23,0	0,0627	7,4564	1,7846E-05	73,545	-161,245	4 120 944,0
	5 171 067,8	23,0	0,0627	9,3361	1,78478E-05	91,931	-161,245	5 150 661,0
	6 205 281,3	23,1	0,0627	11,2152	1,78497E-05	110,311	-161,245	6 179 812,6
	7 239 494,9	23,1	0,0627	13,0959	1,78515E-05	128,707	-161,245	7 209 687,2
	8 273 708,4	23,1	0,0627	14,9735	1,78534E-05	147,072	-161,245	8 237 579,4
	9 307 922,0	23,2	0,0627	16,8527	1,78553E-05	165,453	-161,245	9 266 168,6
	10 342 135,5	23,2	0,0627	18,7311	1,78571E-05	183,826	-161,245	10 294 120,4
Decreciente	1 034 213,6	23,2	0,0627	1,8175	1,78405E-05	18,390	-161,245	1 030 651,8
	2 068 427,1	23,2	0,0627	3,6969	1,78424E-05	36,773	-161,245	2 060 826,2
	3 102 640,7	23,2	0,0627	5,5762	1,78442E-05	55,155	-161,245	3 090 743,8
	4 136 854,2	23,2	0,0627	7,4564	1,78461E-05	73,545	-161,245	4 120 919,8
	5 171 067,8	23,2	0,0627	9,3351	1,78479E-05	91,921	-161,245	5 150 082,6
	6 205 281,3	23,2	0,0627	11,2142	1,78497E-05	110,301	-161,245	6 179 246,5
	7 239 494,9	23,2	0,0627	13,0939	1,78516E-05	128,687	-161,245	7 208 570,2
	8 273 708,4	23,3	0,0627	14,9735	1,78535E-05	147,072	-161,245	8 237 531,0
	9 307 922,0	23,3	0,0627	16,8527	1,78553E-05	165,453	-161,245	9 266 141,4
	10 342 135,5	23,3	0,0627	18,7311	1,78572E-05	183,826	-161,245	10 294 090,2
Creciente	1 034 213,6	23,2	0,0627	1,8175	1,78405E-05	18,390	-161,245	1 030 651,8
	2 068 427,1	23,2	0,0627	3,6969	1,78424E-05	36,773	-161,245	2 060 826,2
	3 102 640,7	23,2	0,0627	5,5762	1,78442E-05	55,155	-161,245	3 090 743,8
	4 136 854,2	23,2	0,0627	7,4559	1,78461E-05	73,540	-161,245	4 120 645,7
	5 171 067,8	23,2	0,0627	9,3351	1,78479E-05	91,921	-161,245	5 150 082,6
	6 205 281,3	23,2	0,0627	11,2142	1,78497E-05	110,301	-161,245	6 179 246,5
	7 239 494,9	23,2	0,0627	13,0939	1,78516E-05	128,687	-161,245	7 208 570,2
	8 273 708,4	23,2	0,0627	14,9735	1,78534E-05	147,072	-161,245	8 237 555,2
	9 307 922,0	23,2	0,0627	16,8527	1,78553E-05	165,453	-161,245	9 266 168,6
	10 342 135,5	23,2	0,0627	18,7311	1,78571E-05	183,826	-161,245	10 294 120,4

$$A_{oC} * (1 + b_C * p_n + b'_C * p_n^2) = \frac{\left(m_{CPiston} + \delta m_{CPiston} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mCPiston}} \right) + \sum_{i=1}^n (m_{iC} + \delta m_{iC}) \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mC}} \right) \right) * g_i - v_C * g_i * \rho_f + \gamma * C_C}{p_P * (1 + \alpha_{Cp-c} * (t_C - t_r))}$$

Área efectiva de la balanza de presión a Calibrar $A_{oC} * (1 + b_C * p_n + b'_C * p_n^2)$

	Valor Nominal Pa	Temperatura Pistón-Cilindro (°C)	Masa Real del Pistón (kg)	Masa Real de las pesas (kg)	Deformación termica $(1 + \alpha_{Cp-c} * (t_C - t_r))$	Fuerza Efectiva (N)	Area Efectiva A_{oC} (m²)
Creciente	1 034 213,6	23,0	0,1416	4,1078	1,0000882	41,547	4,0307E-05
	2 068 427,1	23,0	0,1416	8,3533	1,0000882	83,073	4,0306E-05
	3 102 640,7	23,0	0,1416	12,6023	1,0000882	124,632	4,0313E-05
	4 136 854,2	23,0	0,1416	16,8502	1,0000882	166,182	4,0323E-05
	5 171 067,8	23,1	0,1416	21,0992	1,00009114	207,742	4,0329E-05
	6 205 281,3	23,1	0,1416	25,3470	1,00009114	249,291	4,0336E-05
	7 239 494,9	23,1	0,1416	29,5985	1,00009114	290,875	4,0341E-05
	8 273 708,4	23,1	0,1416	33,8442	1,00009114	332,403	4,0348E-05
	9 307 922,0	23,1	0,1416	38,0932	1,00009114	373,964	4,0354E-05
	10 342 135,5	23,2	0,1416	42,3411	1,00009408	415,513	4,0360E-05
Decreciente	1 034 213,6	23,2	0,1416	4,1078	1,00009408	41,547	4,0307E-05
	2 068 427,1	23,2	0,1416	8,3533	1,00009408	83,073	4,0307E-05
	3 102 640,7	23,2	0,1416	12,6023	1,00009408	124,632	4,0321E-05
	4 136 854,2	23,2	0,1416	16,8502	1,00009408	166,182	4,0323E-05
	5 171 067,8	23,2	0,1416	21,0992	1,00009408	207,742	4,0334E-05
	6 205 281,3	23,3	0,1416	25,3470	1,00009702	249,291	4,0339E-05
	7 239 494,9	23,3	0,1416	29,5985	1,00009702	290,875	4,0347E-05
	8 273 708,4	23,3	0,1416	33,8442	1,00009702	332,403	4,0348E-05
	9 307 922,0	23,3	0,1416	38,0932	1,00009702	373,964	4,0354E-05
	10 342 135,5	23,3	0,1416	42,3411	1,00009702	415,513	4,0360E-05
Creciente	1 034 213,6	23,2	0,1416	4,1078	1,00009408	41,547	4,0307E-05
	2 068 427,1	23,2	0,1416	8,3533	1,00009408	83,073	4,0307E-05
	3 102 640,7	23,2	0,1416	12,6023	1,00009408	124,632	4,0321E-05
	4 136 854,2	23,2	0,1416	16,8502	1,00009408	166,182	4,0325E-05
	5 171 067,8	23,2	0,1416	21,0992	1,00009408	207,742	4,0334E-05
	6 205 281,3	23,2	0,1416	25,3470	1,00009408	249,291	4,0339E-05
	7 239 494,9	23,2	0,1416	29,5985	1,00009408	290,875	4,0348E-05
	8 273 708,4	23,2	0,1416	33,8442	1,00009408	332,403	4,0348E-05
	9 307 922,0	23,2	0,1416	38,0932	1,00009408	373,964	4,0354E-05
	10 342 135,5	23,2	0,1416	42,3411	1,00009408	415,513	4,0360E-05

Regresión lineal de los datos obtenidos (Presión vs Área Efectiva)

Numero de Puntos	y	x	S _t y _i - media(y)	Incertidumbre Estándar de la Curva de Ajuste en el Intervalo (x _{min} ..x _{max})								
	Área Efectiva (m ²)	Presión Real (p _p) Pa		Valor Estimado p(x _i)	Error Residual e _r	Desviación Estándar e _r						
1	4,031E-05	1 030 660,9	-2,635E-08	4,031E-05	-1,872E-09	± 2,83474E-09						
2	4,031E-05	2 060 844,4	-2,701E-08	4,031E-05	5,066E-09	Coefficiente de determinación						
3	4,031E-05	3 091 310,1	-1,995E-08	4,032E-05	4,277E-09							
4	4,032E-05	4 120 944,0	-1,083E-08	4,032E-05	1,431E-09							
5	4,033E-05	5 150 661,0	-4,007E-09	4,033E-05	8,808E-10	r ²						
6	4,034E-05	6 179 812,6	2,465E-09	4,034E-05	6,770E-10	0,9774						
7	4,034E-05	7 209 687,2	7,963E-09	4,034E-05	1,452E-09	La línea de regresión explica el 97,74 % de la variabilidad						
8	4,035E-05	8 237 579,4	1,491E-08	4,035E-05	7,606E-10							
9	4,035E-05	9 266 168,6	2,086E-08	4,036E-05	1,078E-09	<table border="1"> <tr> <th>Analisis estadístico</th> <th>Grados de Libertad = 28 ;</th> </tr> <tr> <td>a_m/ua_m >=</td> <td>k = t (28) para un 95,45%</td> </tr> <tr> <td>34,79</td> <td>2,11</td> </tr> </table>	Analisis estadístico	Grados de Libertad = 28 ;	a _m /ua _m >=	k = t (28) para un 95,45%	34,79	2,11
Analisis estadístico	Grados de Libertad = 28 ;											
a _m /ua _m >=	k = t (28) para un 95,45%											
34,79	2,11											
10	4,036E-05	10 294 120,4	2,686E-08	4,036E-05	1,336E-09	Cumple						
11	4,031E-05	1 030 651,8	-2,623E-08	4,031E-05	-1,991E-09							
12	4,031E-05	2 060 826,2	-2,689E-08	4,031E-05	4,947E-09							
13	4,032E-05	3 090 743,8	-1,280E-08	4,032E-05	-2,876E-09							
14	4,032E-05	4 120 919,8	-1,083E-08	4,032E-05	1,431E-09							
15	4,033E-05	5 150 082,6	4,029E-10	4,033E-05	-3,533E-09							
16	4,034E-05	6 179 246,5	5,923E-09	4,034E-05	-2,785E-09							
17	4,035E-05	7 208 570,2	1,398E-08	4,034E-05	-4,569E-09							
18	4,035E-05	8 237 531,0	1,491E-08	4,035E-05	7,603E-10							
19	4,035E-05	9 266 141,4	2,074E-08	4,036E-05	1,197E-09							
20	4,036E-05	10 294 090,2	2,686E-08	4,036E-05	1,336E-09							
21	4,031E-05	1 030 651,8	-2,623E-08	4,031E-05	-1,991E-09							
22	4,031E-05	2 060 826,2	-2,689E-08	4,031E-05	4,947E-09							
23	4,032E-05	3 090 743,8	-1,280E-08	4,032E-05	-2,876E-09							
24	4,033E-05	4 120 645,7	-8,147E-09	4,032E-05	-1,252E-09							
25	4,033E-05	5 150 082,6	4,029E-10	4,033E-05	-3,533E-09							
26	4,034E-05	6 179 246,5	6,042E-09	4,034E-05	-2,903E-09							
27	4,035E-05	7 208 570,2	1,410E-08	4,034E-05	-4,688E-09							
28	4,035E-05	8 237 555,2	1,491E-08	4,035E-05	7,604E-10							
29	4,035E-05	9 266 168,6	2,074E-08	4,036E-05	1,197E-09							
30	4,036E-05	10 294 120,4	2,686E-08	4,036E-05	1,336E-09							
SUMA	0,001210003	169919203										
Numero de puntos		30										

$$A_p = A_o (1 + b \cdot p + b' \cdot p^2)$$

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m$$

Coefficientes	{a}={Y} . {C}	Incertidumbre Estándar de los Coeficientes (ua _i)
a0	4,02989E-05	1,11847E-09
a1	6,09059E-15	1,75058E-16

Por analogía:

Área efectiva a temperatura de referencia y presión atmosférica

$$A_{oC} = a_o$$

Coefficiente de deformación elástica lineal

$$b_c = a_1 / a_o$$

Coefficiente de deformación elástica cuadrática

$$b'_c = a_2 / a_o$$

Presión $p = x$

1,51135E-10	Coefficiente de deformación elástica lineal (b)	(1/Pa)
	Coefficiente de deformación elástica cuadrática (b')	(1/Pa ²)
1,75058E-16	Incertidumbre estandar del coeficiente a ₁	(m ²)/Pa
	Incertidumbre estandar del coeficiente a ₂	(m ²)/Pa ²
4,02989E-05	Área efectiva a temperatura de referencia y presión atmosférica	A _{oC} (m ²)
2,83474E-09	Incertidumbre de la curva de ajuste	S _{er} (m ²)

TABLA DE PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE						
Magnitud de entrada X_i	Incertidumbre Típica $u(x_i)$	Distribución de Probabilidad	Coefficiente de Sensibilidad $ C_i $	Contribución a la incertidumbre $u(x_i) * C_i $	Contribución porcentual %	
m_c Pistón	$u(m_c \text{ Pistón})$	0,0000004	Normal	9,5008E-07	3,8003E-13	0,0
m_{ic}	$u(m_{ic})$	0,00010085	Normal	9,5008E-07	9,5816E-11	0,0
m_p Pistón	$u(m_p \text{ Pistón})$	0,0000005	Normal	2,1475E-06	1,0738E-11	0,0
m_{ip}	$u(m_{ip})$	0,0002375	Normal	2,1476E-06	5,1005E-10	0,0
δm_c Pistón	$u(\delta m_c \text{ Pistón})$	4,6188E-07	Rectangular	9,5008E-07	4,3882E-13	0,0
δm_{ic}	$u(\delta m_{ic})$	1,1645E-04	Rectangular	9,5008E-07	1,1064E-10	0,0
δm_p Pistón	$u(\delta m_p \text{ Pistón})$	5,7735E-06	Rectangular	2,1475E-06	1,2399E-11	0,0
δm_{ip}	$u(\delta m_{ip})$	2,7424E-04	Rectangular	2,1476E-06	5,8895E-10	0,1
ρ_a	$u(\rho_a)$	1,8686E-03	Normal	2,6556E-10	4,9624E-13	0,0
ρ_{mC}	$u(\rho_{mC})$	70	Normal	7,3771E-13	5,1640E-11	0,0
ρ_{mC} Pistón	$u(\rho_{mC} \text{ Pistón})$	70	Normal	2,5634E-15	1,7944E-13	0,0
ρ_{mP}	$u(\rho_{mP})$	85	Normal	6,6234E-13	5,6299E-11	0,0
ρ_{mP} Pistón	$u(\rho_{mP} \text{ Pistón})$	70	Normal	2,5636E-15	1,7945E-13	0,0
g_l	$u(g_l)$	2,8868E-04	Rectangular	8,8974E-11	2,5685E-14	0,0
v_C	$u(v_C)$	1,9601E-11	Normal	8,4569E-04	1,6577E-14	0,0
v_P	$u(v_P)$	1,5327E-12	Normal	1,9116E-03	2,9298E-15	0,0
ρ_f	$u(\rho_f)$	5,7735	Rectangular	2,9671E-12	1,7130E-11	0,0
y	$u(y)$	5,7735E-04	Rectangular	8,1498E-10	4,7053E-13	0,0
C_C	$u(C_C)$	1,0210E-07	Normal	2,9671E-12	3,0294E-19	0,0
C_P	$u(C_P)$	1,0210E-07	Normal	6,6966E-09	6,8373E-16	0,0
A_{oP}	$u(A_{oP})$	1,7500E-09	Normal	2,2628	3,9598E-09	2,5
δA_{oP}	$u(\delta A_{oP})$	2,0207E-09	Rectangular	2,2628	4,5724E-09	3,4
$\alpha_{C P-C}$	$u(\alpha_{C P-C})$	1,6974E-06	Rectangular	1,2914E-04	2,1920E-10	0,0
$\alpha_{P P-C}$	$u(\alpha_{P P-C})$	1,6974E-06	Rectangular	1,2914E-04	2,1920E-10	0,0
t_C	$u(t_C)$	2,8868E-01	Rectangular	1,1865E-09	3,4251E-10	0,0
t_P	$u(t_P)$	2,8868E-01	Rectangular	1,1865E-09	3,4251E-10	0,0
b_P	$u(b_P)$	5,7735E-11	Rectangular	4,1699E+02	2,4075E-08	93,9
b'_P	$u(b'_P)$	0	Rectangular	4,3125E+09	0	0,0
P_n	$u(P_n)$	5,9710E+03	Rectangular	4,0319E-15	2,40747E-11	0,0
$u(h)$	$u(h)$	5,7735E-04	Rectangular	3,4136E-08	1,97083E-11	0,0
Incertidumbre combinada (m^2) =				2,4842E-08		

VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD EN DISTINTAS CIUDADES DEL PAIS

N°	Ciudades	Latitud	Altura (m)	Gravedad Local (m/s ²)
1	Tumbes	3° 7'	7	9,7804
2	Iquitos	3° 44'	106	9,7802
3	Piura	5° 12'	29	9,7807
4	Tarapoto	6° 31'	333	9,7800
5	Chiclayo	6° 46'	27	9,7810
6	Cajamarca	7° 10'	2750	9,7726
7	Trujillo	8° 7'	34	9,7812
8	Chimbote	9° 4'	35	9,7815
9	Huaraz	9° 30'	3052	9,7723
10	Huanuco	9° 55'	1894	9,7760
11	Cerro de Pasco	10° 40'	4338	9,7687
12	La Oroya	11° 31'	3745	9,7708
13	INDECOPI (Lima)	12° 5'	158	9,78259
14	Abancay	12° 38'	2378	9,7754
15	Huancavelica	12° 47'	3660	9,7716
16	Ayacucho	13° 9'	2746	9,7723
17	Cuzco	14° 2'	3399	9,7729
18	Ica	14° 4'	406	9,7821
19	Juliaca	15° 30'	3824	9,7722
20	Puno	15° 48'	3827	9,7723
21	Arequipa	16° 25'	2335	9,7763
22	Mollendo	17° 1'	26	9,7847
23	Ilo	17° 38'	3	9,7850
24	Tacna	18° 1'	562	9,7835
25	METROIL	11 33,07	154	9,78184

Angulo en rad = 0,20160473

Gravedad normalizada	=	9,80665	m/s ²
Lugar de Calibración	=	METROIL	
Gravedad Local (kg/m ³)	=	9,781841773	m/s ²
Incertidumbre Local (kg/m ³)	=	0,000978184	m/s ²

Gravedad según Instituto Geofísico del Perú (METROIL S.A.C.) = 9,78260008 m/s²
 Incertidumbre de la Gravedad según Instituto Geofísico = 0,0005 m/s²

VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DEL AIRE EN DISTINTAS CIUDADES DEL PAIS

N°	Ciudades	Altitud (m)	Presión atmosférica (mbar)	densidad del aire (kg/m ³) Altura < 990 m	densidad del aire (kg/m ³) Altura >= 990 m
1	Tumbes	7	1012,4	1,181440284	
2	Iquitos	106	1000,6	1,167564583	
3	Piura	29	1009,8	1,178382926	
4	Tarapoto	333	973,9	1,136167869	
5	Chiclayo	27	1010,0	1,178618107	
6	Cajamarca	2750	723,7		0,871817547
7	Trujillo	34	1009,2	1,177677382	
8	Chimbote	35	1009,1	1,177559791	
9	Huaraz	3052	696,5		0,841758893
10	Huanuco	1894	805,5		0,962978193
11	Cerro de Pasco	4338	589,7		0,724937441
12	La Oroya	3745	637,2		0,776642749
13	INDECOPI (Lima)	158	994,4	1,160273960	
14	Abancay	2378	758,3		0,910322882
15	Huancavelica	3660	644,2		0,784350365
16	Ayacucho	2746	724,0		0,872222794
17	Cuzco	3399	666,2		0,808498604
18	Ica	406	965,4	1,126172661	
19	Juliaca	3824	630,7		0,769547127
20	Puno	3827	630,4		0,769278954
21	Arequipa	2335	762,4		0,914882021
22	Mollendo	26	1010,1	1,178735698	
23	Ilo	3	1012,9	1,182028237	
24	Tacna	562	947,5	1,105123928	
25	METROIL	154	993,2	1,158862872	

Humedad Relativa (Prom.) (%)	72,2
Temp. ambiental (Prom.) (°C)	23,2
Lugar de Calibración	METROIL
Altura del lugar de ensayo	154 m
Densidad del aire (kg/m ³)	1,158862872 kg/m ³

Presión atmosférica (Prom.) (mbar): 993,2

**RESULTADO DE LA DETERMINACION DEL AREA
EFECTIVA DEL PISTON**

Area efectiva encontrada A_0 :	4,0299E-05 m ²
Incertidumbre (k = 2) :	± 5,0E-08 m ²
Coefficiente de deformación elastica b :	1,5E-10 1 / Pa
Incertidumbre (k = 2) :	± 9E-12 1 / Pa

**CALCULO DE LA PRESION OBTENIDA PARA CADA PESA USANDO
EL AREA EFECTIVA A_0 ENCONTRADA**

PESA IDENTIFICACION	VALOR NOMINAL (psi)	PRESION CALCULADA (psi)	ERROR ENCONTRADO (psi)	INCERTIDUMBRE (k = 2) ± (psi)
Pistón + Porta masas 5 PSI	5	4,986	-0,014	0,006
5 / 25 psi	5	4,999	-0,001	0,006
A 10 / 50 psi	10	9,98	-0,02	0,012
B 10 / 50 psi	10	9,98	-0,02	0,012
C 10 / 50 psi	10	9,98	-0,02	0,012
A 20 / 100 psi	20	19,95	-0,05	0,02
B 20 / 100 psi	20	19,95	-0,05	0,02
A 40 / 200 psi	40	39,82	-0,18	0,05
B 40 / 200 psi	40	39,86	-0,14	0,05
C 40 / 200 psi	40	39,86	-0,14	0,05
A 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
B 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
C 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
E 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
F 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
G 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
H 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
I 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
J 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
K 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
L 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
M 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
N 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
O 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12
P 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
Q 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
R 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12
S 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12

Se ha considerado el valor de 7 800 kg/m³ como la densidad del pistón y para la
densidad de las pesas un valor de 7 950 kg/m³.
Gravedad local considerada 9,78260008 m/s².
Densidad del aire 1,158862872 kg/m³.

**RESULTADO DE LA DETERMINACION DEL AREA
EFECTIVA DEL PISTON (Laboratorio participante).**

Area efectiva encontrada A_0 :			4,02989E-05 m ²
Incertidumbre (k = 2) :		±	5,00E-08 m ²
Coeficiente de deformación elastica b :			1,5E-10 1 / Pa
Incertidumbre (k = 2) :		±	9E-12 1 / Pa

**RESULTADO DE LA DETERMINACION DEL AREA
EFECTIVA DEL PISTON (Servicio nacional de Metrologia (SNM) - INDECOPI).**

Area efectiva encontrada A_0 :			4,03029E-05 m ²
Incertidumbre (k = 2) :		±	3,70E-08 m ²

INDICE DE COMPATIBILIDAD (C):		0,064
--	--	--------------

**CALCULO DE LA PRESION OBTENIDA PARA CADA PESA USANDO
EL AREA EFECTIVA A₀ ENCONTRADA**

**CALCULO DE LA PRESION OBTENIDA PARA CADA PESA USANDO
EL AREA EFECTIVA A₀ ENCONTRADA**

PESA IDENTIFICACION	VALOR NOMINAL (psi)	Resultado del Laboratorio participante			Resultado del SNM - INDECOPI			INDICE DE COMPATIBILIDAD (C)
		PRESION CALCULADA (psi)	ERROR ENCONTRADO (psi)	INCERTIDUMBRE (k = 2) ± (psi)	PRESION CALCULADA ± (psi)	ERROR ENCONTRADO ± (psi)	INCERTIDUMBRE (k = 2) ± (psi)	
Pistón + Porta masas 5 PSI	5	4,986	-0,014	0,006	4,992	-0,008	0,005	0,78
5 / 25 psi	5	4,999	-0,001	0,006	4,999	-0,001	0,005	0,06
A 10 / 50 psi	10	9,98	-0,02	0,012	9,98	-0,02	0,010	0,25
B 10 / 50 psi	10	9,98	-0,02	0,012	9,97	-0,03	0,010	0,32
C 10 / 50 psi	10	9,98	-0,02	0,012	9,98	-0,02	0,010	0,24
A 20 / 100 psi	20	19,95	-0,05	0,02	19,95	-0,05	0,04	0,05
B 20 / 100 psi	20	19,95	-0,05	0,02	19,95	-0,05	0,04	0,06
A 40 / 200 psi	40	39,82	-0,18	0,05	39,86	-0,14	0,04	0,57
B 40 / 200 psi	40	39,86	-0,14	0,05	39,89	-0,11	0,04	0,53
C 40 / 200 psi	40	39,86	-0,14	0,05	39,89	-0,11	0,04	0,53
A 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,24
B 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,24
C 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,24
E 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,23
F 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,23
G 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,23
H 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,23
I 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,24
J 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,21
K 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,22
L 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,20
M 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,24
N 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,21
O 100 / 500 psi	100	99,70	-0,30	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,23
P 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,21
Q 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,21
R 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,20
S 100 / 500 psi	100	99,71	-0,29	0,12	99,74	-0,26	0,09	0,22

**RESULTADOS DE MEDICIÓN DE LA MASA DE LAS PESAS DE LA
BALANZA DE PRESIÓN**

IDENTIF.	VALOR NOMINAL (psi)	MASA CONVENCIONAL	INCERTIDUMBRE (± mg)
Pis. 1 + Porta masas 5 PSI	5	0,141630 kg	0,8
5 / 25 psi	5	0,141992 kg	0,9
A 10 / 50 psi	10	0,283387 kg	0,8
B 10 / 50 psi	10	0,283361 kg	0,9
C 10 / 50 psi	10	0,283392 kg	0,9
A 20 / 100 psi	20	0,56678 kg	9
B 20 / 100 psi	20	0,56680 kg	9
A 40 / 200 psi	40	1,13127 kg	9
B 40 / 200 psi	40	1,13219 kg	9
C 40 / 200 psi	40	1,13219 kg	9
A 100 / 500 psi	100	2,83225 kg	14
B 100 / 500 psi	100	2,83223 kg	11
C 100 / 500 psi	100	2,83225 kg	11
E 100 / 500 psi	100	2,83229 kg	18
F 100 / 500 psi	100	2,83231 kg	16
G 100 / 500 psi	100	2,83229 kg	12
H 100 / 500 psi	100	2,83229 kg	18
I 100 / 500 psi	100	2,83226 kg	11
J 100 / 500 psi	100	2,83238 kg	14
K 100 / 500 psi	100	2,83235 kg	11
L 100 / 500 psi	100	2,83240 kg	12
M 100 / 500 psi	100	2,83226 kg	11
N 100 / 500 psi	100	2,83237 kg	11
O 100 / 500 psi	100	2,83228 kg	12
P 100 / 500 psi	100	2,83238 kg	11
Q 100 / 500 psi	100	2,83237 kg	12
R 100 / 500 psi	100	2,83241 kg	14
S 100 / 500 psi	100	2,83232 kg	11

Calculo de la Masa convencional y de la incertidumbre de las pesas de la balanza de Presión

CARACTERISTICA	A CALIBRAR	PATRON
CLASE	M2	E2
MARCA	CHANDLER	METTLER TOLEDO
PROCEDENCIA	No indica	No indica

CARACTERISTICA	A CALIBRAR	PATRON
MATERIAL	Acero inoxidable	Acero inoxidable
FORMA	CILINDRICA	Cilindrica con Boton
IDENTIFICACIÓN	Pis. 1 + Porta masas 5 PSI	IM-488

Pesa	Identificación	Valor Nominal (g)	Corrección (mg)	Incertidumbre (mg)	Densidad (kg/m³)	Incertidumbre (kg/m³)
Muestra	M Pis. 1 + Porta masas 5 PSI	150	-----	-----	7950	140
Patrón	P IM-488	150	0	0,08	7950	140

Corrección anterior de la pesa patron NO TIENE

Características de los instrumentos auxiliares

Climatico: Temperatura		Climatico: Humedad		Climatico: Presión	
División mínima	(°C)	División mínima	(%)	División mínima	(mbar)
0,1		1		1	
	Incertidumbre (°C) (k=2)		Incertidumbre (%) (k=2)		Incertidumbre (mbar) (k=2)
	0,12		4,8		0,3

METODO DE PESAJE			
SIN PESA DE SENSIBILIDAD		CON PESA DE SENSIBILIDAD	
SIMPLE SUSTITUCIÓN		SIMPLE SUSTITUCIÓN	
DOBLE SUSTITUCIÓN	X	DOBLE SUSTITUCIÓN	

Resolución de la balanza 0,001 g

CONDICIONES INICIALES			
Temperatura ambiente (°C)	°C	20	OK
% Humedad relativa (%)	%	59	OK
Presión Barométrica (mbar)	kg/m³	995	OK
Densidad del aire inicial (kg/m³)		1,1766	OK

CONDICIONES FINALES			
Temperatura ambiente (°C)	°C	20,1	OK
Humedad relativa (%)	%	58	OK
Presión Barométrica (mbar)	kg/m³	995	OK
Densidad del aire final (kg/m³)		1,1763	OK

Acondicionamiento de los equipos (Apéndice 2 Pag. 22)			Variación (±)	Relación de coincidencia de la pesa con la OIML
Temperatura:	18	27	3	CUMPLE
Humedad:	40	80	15	CUMPLE
Densidad del aire	1,08	1,32		

M2

SERIE 1		SERIE 2		SERIE 3	
Secuencia de Medición	LECTURA	Secuencia de Medición	LECTURA	Secuencia de Medición	LECTURA
P	150	P	150	P	150
M	141,631	M	141,631	M	141,631
M	141,631	M	141,631	M	141,631
P	150	P	150	P	150

SERIE 4		SERIE 5		SERIE 6	
Secuencia de Medición	LECTURA g	Secuencia de Medición	LECTURA g	Secuencia de Medición	LECTURA g
P		P		P	
M	tribar	M	%	M	°C
M		M		M	
P		P		P	
$\Delta lect4$		$\Delta lect5$		$\Delta lect6$	

Densidad del aire promedio (kg/m³) 1,1765
 Corrección por empuje del aire (C) 0
 Media de las diferencias (g) -8,37
 Desviación estandar experimental S lect (g) 0,00

$u(p) = 0,59652$ $u(hr) = 2,48529$ $u(t) = 0,08813$
 $\frac{\partial \rho_a}{\partial p} = 0,00118854$ $\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = -0,000104568$ $\frac{\partial \rho_a}{\partial T} = -0,004385703$

Incertidumbre de la densidad del aire (kg/m³) = 0,000880312

Masa convencional = $150 \text{ g} + -8,370230772 \text{ g}$
 Masa convencional = $150 \text{ g} + -8,37 \text{ g}$ = **0,14163** kg

Unidad para la expresión de la desviación encontrada en la pesa de la balanza de presión
 Redondear el valor de la expresión de la desviación encontrada en la pesa de la balanza de presión a

g
 Milésima

Identificación : Pis. 1 + Porta masas 5 PSI							
Magnitud de entrada	Xi	Valor estimado	Incertidumbre típica	Distribución típica	Coficiente de sensibilidad	Contribución a la incertidumbre (mg)	Contribución en porcentaje (%)
m_{cP}		150000	0,04	NORMAL	1	0,04	0,9
δ_{mcP}		0	0,046188022	RECTANGULAR	1	0,046188022	1,3
ρ_a		1,176480473	0,000880312	NORMAL	-1,053015047	-0,000926982	0,0
ρ_x		7950	140	NORMAL	5,27204E-05	0,007380856	0,0
ρ_p		7950	140,00	NORMAL	-5,58361E-05	-0,00781706	0,0
$\Delta lect$		-8369,00	0	RECTANGULAR	1,000147063	0	0,0
d		0	0,40824829	RECTANGULAR	1,000147063	0,408308329	97,7
δ_e		0	0	RECTANGULAR	1,000147063	0	0,0
INCERTIDUMBRE COMBINADA						0,412995723	100
INCERTIDUMBRE EXPANDIDA (k = 2)						0,8	

CONCLUSIONES

- Aplicando los criterios de la “Validación” del capítulo 10 ítem 10.30 a los resultados obtenidos por INDECOPI y a los resultados aplicando el método de calibración descrito en el presente trabajo obtenemos que el “Índice de compatibilidad (C)” es igual $0,080 < 1$, cumple con el criterio de aceptación, en consecuencia ambos métodos pueden ser empleados para la calibración de balanzas de presión (pistón y pesas) con exactitud adecuada, ejemplo:

$$\text{Área obtenida por SNM- INDECOPI} = 4,03039 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Área obtenida por procedimiento desarrollado} = 4,02979 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

- De la tabla de presupuesto de la incertidumbre 11.11 se concluye que el factor más influyente (Contribución porcentual) es el debido al Coeficiente de deformación elástica (b), por lo cual es necesario que en los Certificados de Calibración de las balanzas de presión se muestre dicho coeficiente con su respectivo cálculo de incertidumbre, para el correcto cálculo de la presión convencionalmente verdadera, dado que no se ha estado reportando en los certificados de calibración de balanza de presión del SNM-INDECOPI.

OBSERVACIONES

- Los requisitos técnicos establecidos no son obligatorios para los laboratorios de calibración, pues el objetivo de este trabajo es para servicios de calibración (reportar la desviación obtenida) y no de verificación o aprobación de modelo.
- Debido a que el desarrollo manual de las formulas expuestas anteriormente demandarían de un gran esfuerzo humano, se recomienda el uso de programas de cálculo para simplificar el trabajo y también para mejorar la interpretación de los resultados, así como brindar un servicio de rapidez y confiabilidad al usuario que lo requiera, se recomienda el uso de Excel por su fácil manejo y amplio uso en la industria.
- Para el cálculo de la presión efectiva fue necesario saber el valor de las masas de las pesas empleadas en la balanza de presión, por lo tanto el personal encargado de la calibración en presión también deberá tener conocimiento de metrología en masa para poder emplear los valores de su respectivo certificado de calibración.

- Los valores de presión que reporta el SNM-INDECOPI en su certificado de calibración para la balanza de presión, no corresponden a los valores de referencia (temperatura de 20 °C y para la aceleración de la gravedad normal, 9,80665 m/s²), establecidos en las normativas internacionales (OIML R110), por lo tanto los factores de corrección que se deberían emplear para su empleo en la industria (calibración de transductores o manómetros) cambiarían tomando como consideración los valores de referencia que el SNM-INDECOPI empleo en la calibración del instrumento.

BIBLIOGRAFIA

- Aseguramiento Metrológico en ISO 9000 – José Dajes Castro, Servicio Nacional de Metrología – INDECOPI; 2^{da} Edición – Mayo 2007.
- Centro Nacional de Metrología - Área de Metrología Mecánica - División de Metrología de Fuerza y Presión; Publicación técnica CNM-MMF-PT-003; Balanzas de Presión; 2^{da} Edición Septiembre 2005 - México
Autor. Jorge C. Torres Guzmán, Luis A. Santander Romero, Pablo Olvera Arana.
- Centro Nacional de Metrología; Publicación técnica CNM-MMF-PT-005; Manómetros Secundarios; 1^{ra} Edición Diciembre 2005 – México.
Autor. Jorge C. Torres Guzmán, Luis A. Santander Romero, Pablo Olvera Arana.
- Centro Nacional de Metrología - Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en los Servicios de Calibración de Balanzas de Presión. Revisión 1, Abril del 2008 – México.
- Publication Reference EAL-G26 Calibration of Pressure balances, European cooperation for Accreditation of Laboratories (EAL). Ed. 1. July, 1997.
- GUIA METAS; Linealidad, Curva de ajuste, Interpolación y Extrapolación. Enero 2008.
- GUIA METAS; Aceleración de la gravedad. Mayo 2002.
- GUIA METAS; Correcciones para Balanzas de Pesos Muertos. Agosto 2002.
- GUIA METAS; Presión atmosférica, presión barométrica y altitud. Conceptos y aplicaciones. Febrero 2005.

- GUIA METAS; Consideraciones de calibración en masa para las masas de las balanzas de presión. Diciembre 2007.
- Métodos Numéricos para Ingenieros; Steven C. Chapra / Raymond P. Canale – Noviembre de 1992 – México.
- Probabilidad y Estadística para Ingenieros; Irwin R. Miller / John E. Freund / Richard Jonson – Cuarta Edición – México
- Norma Metrológica Peruana NMP-004-2007; Pesas de las Clases E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ y M₃; 2^{da} Edición. Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales – INDECOPI.
- Organismo Internacional de Metrología Legal - Recomendación Internacional OIML R 110 Edición 1994 (E) - Balanzas de Presión. - Versión en Ingles.
- Metrología de Masas. Mediciones de masa y peso; Ing. Olman Fernando Ramos Alfaro – Laboratorio Costarricense de Metrología. 2^{da} Versión – Marzo 2008.
- Procedimiento para la calibración de masas de 1 mg a 50 kg (Valor convencional) – Centro Español de Metrología – CEM.
- Procedimiento para la calibración de Balanzas de Presión – Centro Español de Metrología – CEM.
- Procedimiento para la calibración de Pesas de Precisión – Servicio Nacional de Metrología – INDECOPI.
- “Errores en la balanza debido a la aceleración de la gravedad” – Publicación Metrológica del Ing. José Dajes Castro (Jefe del Servicio Nacional de Metrología del INDECOPI).

- Manual de formulas técnicas - 30ª Edición - Gieck
- Sistema Internacional de Unidades de Medida – José Dajes Castro – Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) – Fondo Editorial del Congreso del Perú.
- Tabla de Conversión de Unidades de Medida al Sistema Internacional – Servicio Nacional de Metrología (SNM) – Primera Edición – Mayo 2002.
- Todo sobre Medidores de Agua – José Dajes Castro – INDECOPI; Primera Edición – Noviembre 2004.
- Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología (VIM). 3ª. Edición. – Noviembre 2006.