

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

“CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS PARA TUBERÍAS METÁLICAS”

PROYECTO PREVIO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE “TECNÓLOGO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL”

ATAHUALPA CORTEZ HENRY RAMIRO
thierryn77@hotmail.com

DELGADO MACÍAS JOSÉ IGNACIO
nachogtsr@hotmail.com

DIRECTOR: ING. HOMERO BARRAGÁN
hbarragan@hotmail.es

QUITO, ABRIL DEL 2010

DECLARACIÓN

Nosotros, Atahualpa Cortez Henry Ramiro y Delgado Macías José Ignacio bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de este documento cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa intelectual vigente.

.....

Atahualpa Cortez Henry Ramiro

.....

Delgado Macías José Ignacio

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por: Atahualpa Cortez Henry Ramiro y Delgado Macías José Ignacio, bajo mi supervisión.

.....
Ing. Homero Barragán
DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación y toda mi carrera universitaria en la carrera de Mantenimiento Industrial está dedicado a:

DIOS por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome todas las fuerzas necesarias sobrellevar las pruebas muy duras que muchas veces nos presenta la vida.

MI MADRE y MI PADRE, Alba y Ramiro ya que gracias a ellos soy quien soy hoy día por todo el amor cariño y orientación, ya que por sus cuidados incondicionales he podido concluir mi carrera profesional, por su abnegada lucha por enseñarme valores muy importantes que me llevaron a ser un hombre de bien para ustedes y toda la sociedad son a ellos a quién les debo todo.

A mi hermano, Erick, por siempre contagiarme su alegría a través de sus ocurrencias y por enseñarme diferentes maneras de ver y disfrutar la vida.

A mi tía Elisa, que creyó en mí, porque siempre estuvo ahí para brindarme una palabra de aliento, cuando más lo necesité.

A mis mejores amigos de vida universitaria, a esos amigos que siempre me han acompañado y han estado ahí desde que los conocí y que de una u otro forma contribuyeron con su granito de arena, gracias por todo, por su ayuda incondicional y por una amistad sincera que espero llevarla por siempre.

*“Detrás de cada línea de llegada, hay una de partida, y
detrás de cada logro, hay otro desafío”.*

Henry Atahualpa C.

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación, mi vida estudiantil y en especial mi paso por la carrera de Mantenimiento Industrial está dedicado a:

Mis padres, José y Herminia, quienes con sus acertados consejos, confianza total, paciencia y apoyo incondicional en todo sentido, han sabido llevarme por el buen camino con la ayuda de Dios. Me han brindado una vida de sacrificios a pesar de los problemas y siempre me han enseñado a valorar las cosas más importantes de la vida como la honradez, humildad, trabajo duro y sacrificio por los demás. Es a ellos a quienes les debo todo en la vida.

Mis hermanos, Aracely y Joselo, quienes me han ayudado con sus consejos y me han brindado su apoyo en los momentos difíciles. Gracias a su experiencia en la vida he tenido un modelo de lo que es correcto y de lo que no. Mis sobrinos quienes siempre me han arrancado una sonrisa y me han hecho mirar hacia el futuro con esperanza.

Mis queridos amigos de la poli, Pamela, Edwin, William, Karina, Oscar, Katty, Wilson y a todos. Han sido los mejores amigos de toda mi vida, hemos vivido tantas experiencias que nunca olvidaré y por eso esta amistad tiene muchos años por delante. En especial a Pamela, quien ha sido mi confidente y amiga incondicional todos estos años, te quiero amiga.

Y a ti mi amor, Pilar, antes mi amiga de tantos años y ahora la mujer que me brinda su amor, cariño y comprensión, me has ayudado a entender muchas cosas de la vida, me brindas los mejores momentos y me ayudas a ser cada día mejor. Te amo.

José Ignacio Delgado M.

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestra gratitud a la Escuela Politécnica Nacional, y en especial a al personal Docente de la Carrera de Mantenimiento Industrial, por haber contribuido en nuestra formación profesional durante el tiempo que hemos permanecido.

De igual manera nuestra gratitud al Ing. Homero Barragán por su acertada conducción en el desarrollo del presente trabajo, y por todo el tiempo dedicado a la lucha por el bienestar de la Carrera.

CONTENIDO

CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1 PRESIÓN, TIPOS DE PRESIÓN.....	1
1.1.1 CONCEPTO DE PRESIÓN.....	1
1.1.1.1 Unidades de presión.....	4
1.1.2 TIPOS DE PRESIÓN.....	5
1.1.2.1 Presión absoluta.....	5
1.1.2.2 Presión atmosférica.....	6
1.1.2.3 Presión manométrica.....	6
1.1.2.4 Vacío.....	7
1.2 PRINCIPIO BÁSICO DE LA ESTÁTICA DE FLUIDOS.....	7
1.2.1 ESTÁTICA DE FLUIDOS O HIDROSTÁTICA.....	8
1.2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS O HIDRODINÁMICA.....	9
1.3 MEDIDORES DE PRESIÓN.....	10
1.3.1 TIPOS DE INSTRUMENTOS.....	10
1.3.1.1 Piezómetro.....	11
1.3.1.2 Manómetro.....	12
1.3.1.3 Manómetro de bourdon.....	13
1.4 RESISTENCIA DE MATERIALES.....	14
1.4.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	15
1.4.1.1 Elasticidad y plasticidad.....	15
1.4.1.2 Ley de Hooke.....	15
1.4.1.3 Diagrama esfuerzo-deformación ($\sigma - \epsilon$) del acero de bajo carbono.....	16
1.4.1.3.1 Período elástico.....	18

1.4.1.3.2	Período elasto-plástico.....	19
1.4.1.3.3	Período plástico (fluencia).....	19
1.4.1.3.4	Período de endurecimiento y de estricción.....	20
1.4.1.4	Diagrama esfuerzo-deformación para otros materiales.....	21
1.4.1.5	Diagramas ideales.....	22
1.4.2	CONCEPTOS DE COEFICIENTES DE SEGURIDAD, DE ESFUERZO Y CARGA ADMISIBLE.....	24
CAPÍTULO II: PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....		27
2.1 TIPOS DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....		28
2.1.1	PRUEBAS HIDROSTÁTICAS A CALDEROS.....	28
2.1.1.1	El agua como principal fluido de pruebas.....	29
2.1.1.2	Requerimientos de la prueba.....	29
2.1.2	PRUEBAS HIDROSTÁTICAS EN SISTEMAS DE TUBERÍAS.....	32
2.1.2.1	Seguridad.....	32
2.1.2.2	Restricción contra el movimiento.....	33
2.1.2.3	Cálculos previos a la prueba.....	33
2.1.2.3.1	Definición del dV/dP	33
2.1.2.3.2	dV/dP teórico.....	34
2.1.2.4	Sección de prueba.....	35
2.1.2.5	Presión de prueba.....	35
2.1.2.6	Duración de la prueba.....	36
2.1.2.7	Fluido de prueba.....	37
2.1.2.7.1	Prueba hidrostática.....	37
2.1.2.7.2	Prueba neumática (gas comprimido).....	37

2.1.2.8	Temperatura del fluido de prueba.....	38
2.1.2.9	Coeficiente de expansión térmica.....	39
2.1.2.10	Aire atrapado o arrastrado.....	40
2.1.2.11	Procedimientos para pruebas de fugas.....	42
2.1.2.11.1	Prueba de fuga hidrostática.....	42
2.1.2.11.2	Prueba neumática (gas comprimido a alta presión).....	44
2.1.2.12	Procedimiento de baja presión.....	45
2.1.2.13	Sistemas que no son aptos para la realización de pruebas de presión.....	45
2.1.3	PRUEBAS HIDROSTÁTICAS A BOTELLAS DE EXTINTORES Y OTROS CONTENEDORES DE GASES.....	45
2.2	EQUIPOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	47
2.2.1	PRODUCTOS QUÍMICOS Y ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	49
2.3	ERRORES COMUNES EN LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.....	54
2.4	NORMAS Y ESTÁNDARES.....	56
2.4.1	ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR DE REQUISITOS GENERALES PARA TUBOS DE GRAFITO Y ACEROS ALEADOS AUSTENÍTICOS Y FERRÍTICOS, SEGÚN NORMAS ASTM.....	57
2.4.1.1	Alcance.....	57
2.4.1.2	Documentos de Referencia.....	60
1.4.1.2.1	Normas ASTM.....	60
2.4.1.3	Proceso de manufactura de una tubería.....	60
2.4.1.4	Ensayo hidrostático post manufactura.....	61
3.2.1	ANSI B16.5 RANGOS MÁXIMOS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA PARA TUBERÍAS DE ACERO Y ACCESORIOS.....	64
4.2.1	ASTM A53 B MÁXIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO AL CARBÓN A UNA TEMPERATURA DE 400 °F.....	65

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO.....	67
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO.....	67
3.1.1 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	68
3.1.1.1 Corte de las vigas de la estructura principal.....	68
3.1.1.2 Corrección y ajuste de dimensiones de las columnas y vigas con amoladora y limado manual.....	70
3.1.1.3 Perforación de vigas y columnas.....	70
3.1.1.3.1 Para las columnas.....	70
3.1.1.3.2 Para la viga horizontal superior.....	71
3.1.1.4 Elaboración de un soporte para gato hidráulico.....	72
3.1.1.5 Elaboración de pasadores para guías verticales	73
3.1.1.6 Construcción de la mesa de soporte para caucho sellador inferior.....	74
3.1.1.7 Soldadura de bancada móvil	75
3.1.1.8 Soldadura del módulo o estructura principal	77
3.1.1.9 Pintura del módulo y sus elementos.....	80
22 DIMENSIONAMIENTO DE CAUCHOS SELLADORES.....	82
3.3 SELECCIÓN DE LA PRENSA HIDRÁULICA.....	85
3.4 DIMENSIONAMIENTO DE VIGAS Y COLUMNAS.....	86
3.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA PARA PRESURIZAR EL SISTEMA.....	90
3.6 SELECCIÓN DE MANÓMETROS Y OTROS ELEMENTOS.....	91
3.6.1 SELECCIÓN DEL MANÓMETRO.....	91
3.6.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA.....	92

CAPÍTULO IV: PRUEBAS DEL EQUIPO.....	94
4.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.....	94
4.1.1 MONTAJE DE LA TUBERÍA A PROBAR.....	94
4.1.2 LLENADO DE LA TUBERÍA.....	95
4.1.3 PRESURIZACIÓN.....	96
4.1.4 DESPRESURIZACIÓN.....	97
4.1.5 DRENAJE.....	97
4.1.6 DESMONTAJE Y MEDICIONES FINALES.....	97
4.2 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE TUBERÍAS Y MÓDULO.....	98
4.2.1 TUBERÍAS.....	98
4.2.1.1 Corte.....	98
4.2.1.2 Limpieza de óxidos.....	98
4.2.1.3 Redondeo de filos en los extremos	98
4.2.2 MÓDULO.....	99
4.3 DISEÑO DEL FORMATO PARA PROTOCOLOS O REGISTRO DE PROCEDIMIENTOS PARA LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS O (HRPH).....	99
CAPÍTULO V: SEGURIDAD INDUSTRIAL Y ANÁLISIS DE COSTOS.....	101
5.1 RIESGOS EN LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	101
5.2 COSTOS DE MATERIA PRIMA, MANO DE OBRA, SOLDADURA Y ELEMENTOS ADICIONALES.....	105
5.3 OPTIMIZACIÓN DE COSTOS Y TIEMPO.....	108
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
6.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	110

6.2 RECOMENDACIONES GENERALES.....	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
ANEXOS.....	116
ANEXO 1: REFERENCIA DE LAS PRESIONES DE TRABAJO PARA LAS TUBERÍAS A SER PROBADAS EN EL MÓDULO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	117
ANEXO 2: PRUEBA 1.....	118
ANEXO 3: PRUEBA 2.....	119
ANEXO 4: PLANO DEL MÓDULO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

1.1 Fuerzas de presión.....	3
1.2 Fuerza distribuida uniforme.....	3
1.3 Relación entre presiones.....	5
1.4 Instrumento de medida de presiones.....	11
1.5 Manómetro diferencial.....	13
1.6 Manómetro de bourdon.....	14
1.7 Ley de Hooke.....	16
1.8 Probeta de acero.....	17
1.9 Diagrama esfuerzo – Deformación para el acero de bajo carbono.....	18
1.10 Módulos tangentes y secantes.....	22
1.11 Diagrama ideal para un material dúctil.....	23
1.12 Diagrama ideal para un material frágil.....	23
1.13 Diagrama ideal para un material plástico.....	24

CAPÍTULO II

2.1 Presurización vs. Volumen de agua con diferentes porcentajes de aire atrapado.....	41
2.2 Banco de pruebas hidrostáticas a botellas.....	46
2.3 Esquema interno de la prueba hidrostática y medición del líquido desplazado.....	46
2.4 Manómetros tipo bourdon de diferentes escalas.....	47
2.5 Bombas tipo pistón de accionamiento manual de simple y doble efecto.....	48
2.6 Bombas triplex.....	48
2.7 Polvo detector de agua.....	49
2.8 Tinte marcador.....	50

2.9 Reductor de tensión superficial.....	51
2.10 Marcador soluble en agua.....	51
2.11 Tinte indicador.....	52
2.12 Penetrante fluorescente.....	53
2.13 Detector ultrasónico.....	53

CAPÍTULO III

3.1 Cortadora de plasma de DC marca Miller.....	69
3.2 Datos de placa de cortadora de plasma.....	69
3.3 Proceso de corte con plasma.....	69
3.4 Perforación de columnas verticales.....	71
3.5 Perforación de viga superior.....	72
3.6 Soporte para gato hidráulico.....	73
3.7 Construcción de pasadores.....	74
3.8 Mesa de soporte para caucho inferior.....	75
3.9 Bancada móvil sujeta con prensas previo a la soldadura.....	76
3.10 Bancada móvil soldada con electrodo E 6010.....	77
3.11 Bancada móvil soldada con electrodo E 7018.....	77
3.12 Estructura principal previo a la soldadura.....	79
3.13 Soldadura de refuerzo con electrodo E 7018.....	79
3.14 Módulo con perfiles de soporte soldados.....	80
3.15 Módulo en fase de pintura.....	81
3.16 Mesa de soporte en fase de pintura.....	81
3.17 Bancada móvil en fase de pintura.....	82
3.18 Estructura interna de uno de los cauchos selladores.....	83

3.19 Estructura interna de los cauchos selladores en despiece.....	83
3.20 Cauchos selladores terminados.....	84
3.21 Dimensiones de gato hidráulico tipo botella de 30T.....	85
3.22 Gato hidráulico tipo botella de 30 T. marca Mega.....	86
3.23 Esquema para dimensionamiento de columnas.....	87
3.24 Sección transversal viga UPN.....	89
3.25 Bomba manual de pistón.....	91
3.26 Módulo de pruebas hidrostáticas.....	93

CAPÍTULO IV

4.1 Formato para pruebas hidrostáticas.....	100
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II

2.1 Multiplicador de presión para temperaturas elevadas.....	36
2.2 Temperaturas del agua.....	39
2.3 Fase de Prueba, Alternativa 2, Aporte de Agua de Reposición.....	43-44
2.4 Tubos que son cubiertos por norma ASTM.....	57-58-59
2.5 Variaciones Permisibles en Espesor de Pared.....	61
2.6 Presiones de la Prueba Hidrostática.....	62
2.7 Presiones y temperaturas según ANSI B 16.5.....	64-65
2.8 Presiones máximas de trabajo según ASTM A53 B a 400°F.....	65-66

CAPÍTULO III

3.1 Propiedades de los electrodos utilizados.....	76
3.2 Características vigas UPN.....	90

CAPÍTULO V

5.1 Elementos eléctricos con horas usadas.....	105-106
5.2 Costo de fabricación del modulo de pruebas hidrostáticas.....	107-108
5.3 Cronograma para la optimización de tiempo.....	109

RESUMEN

Para el dimensionamiento de esta unidad se partió de la elaboración de planos en los cuales se dimensiona el tamaño y las partes que conforman el módulo de pruebas hidrostáticas.

Para la selección correcta de los elementos que conforman el módulo de pruebas hidrostáticas se tendrá en cuenta todas las situaciones que se puedan presentar en la realización de una prueba por lo cual fue muy importante dimensionar y calcular todas las fuerzas a las que estará sometida ya que implica un trabajo que puede ser muy peligroso

Se deberá tener en cuenta que el elemento con el cual se realizan las pruebas hidrostáticas es el agua y debido a que esta estará sometida a una presión alta se deberán tomar todas las precauciones necesarias para evitar accidentes y salvaguardar la integridad del personal que esté realizando dichas pruebas.

Dentro del trabajo que comprende este proyecto, se dispuso de una descripción del funcionamiento del equipo con lo cual se pueda hacer más fácil la manipulación de la máquina para la realización de las pruebas hidrostáticas en tuberías metálicas.

Cabe señalar que existe un formato de registro que deberá ser usado al momento de la realización de una prueba hidrostática y que será de gran utilidad en la comprobación de resultados.

Como en todo trabajo hay riesgos tanto para el operario como para la máquina, se da a conocer ciertos puntos fundamentales en la parte de seguridad industrial, que deben ser estudiados para evitar graves accidentes.

PRESENTACIÓN

La información que se encuentra en este documento, está basada en la construcción de un módulo para pruebas hidrostáticas, en la que se encuentra conceptos de presión que es con lo cual va a trabajar esta máquina, además del dimensionamiento y construcción del módulo de pruebas hidrostáticas y elementos que componen todo este sistema.

El presente proyecto está estructurado de la siguiente manera en el primer capítulo se revisan conceptos básicos con los cuales se maneja el módulo de pruebas hidrostáticas, en el segundo capítulo se revisan las definiciones generales de pruebas hidrostáticas, en el tercer capítulo se describe cómo fue construido el módulo y los elementos que conforman a éste, en el cuarto capítulo se revisa como es el funcionamiento y los protocolos de pruebas y finalmente en el quinto capítulo se da a conocer la seguridad industrial que se debe tener y el análisis de los costos que implicó la construcción de este proyecto.

En la parte de los anexos se encuentra el dimensionamiento y plano de construcción que se realizó para la elaboración del módulo de pruebas hidrostáticas y donde se detallan las medidas que tiene cada uno de los elementos que lo componen.

Además se cuenta con una hoja de protocolos o registro de procedimientos en los cuales se detallan como se efectuará cada una de las pruebas que se realicen a los diferentes tipos de tuberías metálicas que es para lo cual fue diseñado el módulo y que ayudarán a realizar una evaluación general y sacar las respectivas recomendaciones.

Cuando se esté desarrollando alguna prueba hidrostática y se desconozca el procedimiento a seguir para el buen funcionamiento del equipo, se deberá revisar este documento donde se encuentra detallado los pasos a seguir para el correcto desempeño del mismo.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 PRESIÓN; TIPOS DE PRESIÓN

Se iniciará el presente capítulo describiendo la presión que ejerce un fluido en la realización de pruebas hidrostáticas que consisten en someter a tuberías metálicas a una prueba de presión interior para evidenciar que puedan ser operados en forma confiable y segura de acuerdo a las normas, códigos o estándares aplicables, con la finalidad de garantizar la confiabilidad de los procesos durante una operación normal, considerando que para estas pruebas se realizará mediante la utilización de un módulo, el cual es el objetivo del presente proyecto de titulación.

1.1.1 CONCEPTO DE PRESIÓN¹

El control de la presión en los procesos industriales da condiciones de operación seguras. Cualquier recipiente o tubería posee cierta presión máxima de operación y de seguridad variando esta, de acuerdo con el material y el tipo de construcción. Las presiones excesivas no solo pueden provocar la destrucción del equipo, si no también puede provocar la destrucción del equipo adyacente y ponen al personal en situaciones peligrosas, particularmente cuando están implícitas, fluidos inflamables o corrosivos. Para tales aplicaciones, las lecturas absolutas de gran precisión con frecuencia son tan importantes como lo es la seguridad extrema.

Por otro lado, la presión puede llegar a tener efectos directos o indirectos en el valor de las variables del proceso (como la composición de una mezcla en el proceso de destilación). En tales casos, su valor absoluto medio o controlado con

¹ <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>

precisión es de gran importancia ya que afectaría la pureza de los productos poniéndolos fuera de especificación.

La presión puede definirse como una fuerza por unidad de área o superficie, en donde para la mayoría de los casos se mide directamente por su equilibrio directamente con otra fuerza, que puede ser la de una columna líquida, a un resorte, un émbolo cargado con un peso o un diafragma cargado con un resorte o cualquier otro elemento que puede sufrir una deformación cualitativa cuando se le aplica la presión.

Tenemos que:

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>

Si una superficie se coloca en contacto con un fluido en equilibrio (en reposo) el fluido, gas o líquido, ejerce fuerzas normales sobre la superficie.

Las fuerzas tangenciales que un fluido puede ejercer sobre una superficie se originan cuando hay movimiento del fluido respecto a la superficie. Si sobre una superficie actúan fuerzas normales distribuidas en forma continua, como se indica en la *figura 1.1*, se define la presión actuando sobre algún punto de ella como la fuerza por unidad de área que actúa sobre la superficie. Esta puede ser variable o constante de punto en punto de la superficie. Por esa razón su definición involucra un elemento infinitésimo de área dA .²

² <http://www.fisica.usach.cl/~lhrodrig/fisica1/hidrosto.pdf>

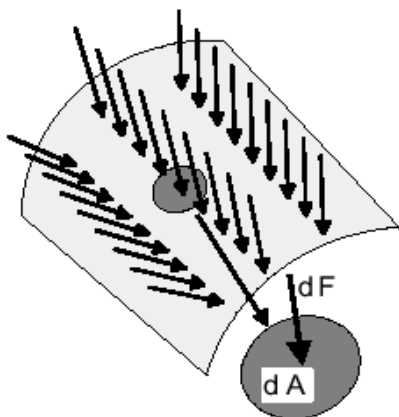


Figura 1.1 Fuerzas de presión.

Fuente: <http://www.fisica.usach.cl/~lhrodrig/fisica1/hidrostb.pdf>

O sea la presión en el punto donde se ubica el elemento de área (infinitésimo) dA se define por:

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (1.2)$$

Fuente: <http://www.fisica.usach.cl/~lhrodrig/fisica1/hidrostb.pdf>

La presión en un fluido en equilibrio aumenta con la profundidad, de modo que las presiones serán uniformes sólo en superficies planas horizontales en el fluido. Si la fuerza total F está distribuida en forma uniforme sobre el total de un área horizontal A como se indica en la *figura 1.2*, la presión en cualquier punto de esa área será la indicada en la ecuación 1.1.

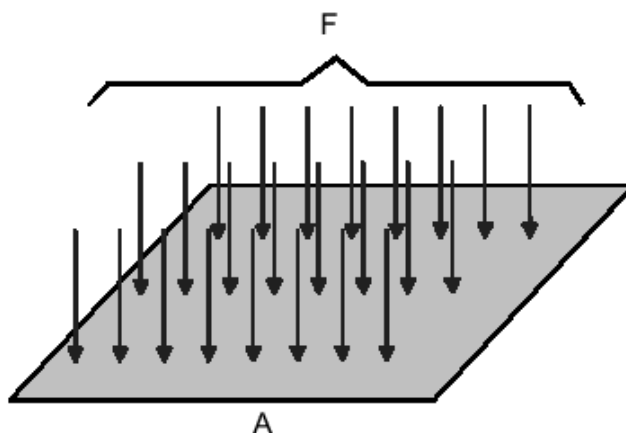


Figura 1.2 Fuerza distribuida uniforme.

Fuente: <http://www.fisica.usach.cl/~lhrodrig/fisica1/hidrostb.pdf>

1.1.1.1 Unidades de presión³

En el SI la unidad de presión es el pascal, se representa por Pa y se define como la presión correspondiente a una fuerza de un newton de intensidad actuando perpendicularmente sobre una superficie plana de un metro cuadrado.

$$1Pa = \frac{1N}{m^2}$$

Existen, no obstante, otras unidades de presión que sin corresponder a ningún sistema de unidades en particular han sido consagradas por el uso y se siguen usando en la actualidad junto con el pascal. Entre ellas se encuentran la atmósfera y el bar.

La atmósfera (atm) se define como la presión que a 0 °C ejercería el peso de una columna de mercurio de 76 cm de altura y 1 cm² de sección sobre su base.

Es posible calcular su equivalencia en N/m² sabiendo que la densidad del mercurio es igual a 13,6 * 10³ kg/m³ y recurriendo a las siguientes relaciones entre magnitudes:

$$\text{Peso (N)} = \text{masa (kg)} * 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Masa} = \text{volumen} \cdot \text{densidad}.$$

Como el volumen del cilindro que forma la columna es igual a la superficie de la base por la altura, se tendrá:

$$1 \text{ atm} = 1,013 * 10^5 \text{ Pa}.$$

El bar es realmente un múltiple del pascal y equivale a 10⁵ N/m². En meteorología se emplea con frecuencia el milibar (mb) o milésima parte del bar

³ <http://www.Presion-Monografias.com>

1 mb = 10^2 Pa.

1 atm = 1 013 mb.

Otra unidad de presión muy utilizada es el Psi (pound per square inch), que pertenece al sistema inglés. Existe una equivalencia entre el psi y el kg/cm^2

1 kg/cm^2 = 14,223 psi.

1.1.2 TIPOS DE PRESIÓN

La relación de los diferentes tipos de presión se expresa en la *figura 1.3* siguiente:

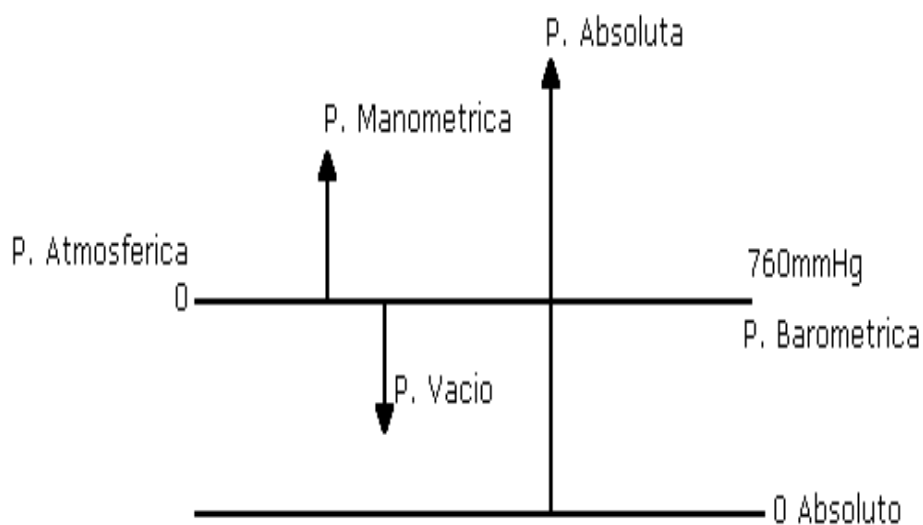


Figura 1.3 Relación entre presiones

Fuente: <http://www.ilustrados.com/publicaciones/multimedia/hu-pre45.jpg&imgrefurl>

1.1.2.1 Presión Absoluta

Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la

velocidad molecular es muy pequeña. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.

1.1.2.2 Presión Atmosférica

El hecho de estar rodeados por una masa gaseosa (aire), y al tener este aire un peso actuando sobre la tierra, quiere decir que estamos sometidos a una presión (atmosférica), la presión ejercida por la atmósfera de la tierra, tal como se mide normalmente por medio del barómetro (presión barométrica). Al nivel del mar o a las alturas próximas a este, el valor de la presión es cercano a 14.7 lb/plg^2 (760 mmHg), disminuyendo estos valores con la altitud.

1.1.2.3 Presión Manométrica

Son normalmente las presiones superiores a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que define la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica que existe, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante, es evidente que el valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

La presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

$$\text{Presión Absoluta} = \text{Presión Manométrica} + \text{Presión Atmosférica.} \quad \mathbf{(1.3)}$$

Fuente: <http://www.ilustrados.com/publicaciones/EpyAVFEIIIIXPofBGjL.php&usg>

1.1.2.4 Vacío

Se refiere a presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto y por lo general se expresa a modo de centímetros de mercurio (cmHg), metros de agua, etc.

De la misma manera que para las presiones manométricas, las variaciones de la presión atmosférica tienen solo un efecto pequeño en las lecturas del indicador de vacío.

1.2 PRINCIPIO BÁSICO DE LA ESTÁTICA DE FLUIDOS⁴

La mecánica de fluidos, es la parte de la física que se ocupa de la acción de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de las aplicaciones y mecanismos de ingeniería que utilizan fluidos. La mecánica de fluidos es fundamental en campos tan diversos como la aeronáutica, la ingeniería química, civil e industrial, la meteorología, las construcciones navales y la oceanografía.

La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: la estática de fluidos, o hidrostática, que se ocupa de los fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de los fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o al flujo de los gases a baja velocidad, en el que puede considerarse que el gas es esencialmente incompresible. La aerodinámica, o dinámica de gases, se ocupa del comportamiento de los gases cuando los cambios de velocidad y presión son lo suficientemente grandes para que sea necesario incluir los efectos de la compresibilidad.

⁴ PASCAL, Blaise, (1647), Estática de Fluidos, Microsoft ® Encarta ® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation.

1.2.1 ESTÁTICA DE FLUIDOS O HIDROSTÁTICA

Una característica fundamental de cualquier fluido en reposo es que la fuerza ejercida sobre cualquier partícula del fluido es la misma en todas direcciones. Si las fuerzas fueran desiguales, la partícula se desplazaría en la dirección de la fuerza resultante. De ello se deduce que la fuerza por unidad de superficie, la presión que el fluido ejerce contra las paredes del recipiente que lo contiene, sea cual sea su forma, es perpendicular a la pared en cada punto. Si la presión no fuera perpendicular, la fuerza tendría una componente tangencial no equilibrada y el fluido se movería a lo largo de la pared.

Este concepto fue formulado por primera vez en una forma un poco más amplia por el matemático y filósofo francés Blaise Pascal en 1647, y se conoce como principio de Pascal. Dicho principio, que tiene aplicaciones muy importantes en hidráulica, afirma que la presión aplicada sobre un fluido contenido en un recipiente se transmite por igual en todas direcciones y a todas las partes del recipiente, siempre que se puedan despreciar las diferencias de presión debidas al peso del fluido y a la profundidad.

Cuando la gravedad es la única fuerza que actúa sobre un líquido contenido en un recipiente abierto, la presión en cualquier punto del líquido es directamente proporcional al peso de la columna vertical de dicho líquido situada sobre ese punto. La presión es a su vez proporcional a la profundidad del punto con respecto a la superficie, y es independiente del tamaño o forma del recipiente.

El segundo principio importante de la estática de fluidos fue descubierto por el matemático y filósofo griego Arquímedes. El principio de Arquímedes afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desplazado por dicho cuerpo. Esto explica por qué flota un barco muy cargado; el peso del agua desplazada por el barco equivale a la fuerza hacia arriba que mantiene el barco a flote.

El punto sobre el que puede considerarse que actúan todas las fuerzas que producen el efecto de flotación se llama centro de flotación, y corresponde al centro de gravedad del fluido desplazado. El centro de flotación de un cuerpo que flota está situado exactamente encima de su centro de gravedad. Cuanto mayor sea la distancia entre ambos, mayor es la estabilidad del cuerpo.

El principio de Arquímedes permite determinar la densidad de un objeto cuya forma es tan irregular que su volumen no puede medirse directamente. Si el objeto se pesa primero en el aire y luego en el agua, la diferencia de peso será igual al peso del volumen de agua desplazado, y este volumen es igual al volumen del objeto, si éste está totalmente sumergido. Así puede determinarse fácilmente la densidad del objeto (masa dividida por volumen). Si se requiere una precisión muy elevada, también hay que tener en cuenta el peso del aire desplazado para obtener el volumen y la densidad correctos.

1.2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS O HIDRODINÁMICA

Esta rama de la mecánica de fluidos se ocupa de las leyes de los fluidos en movimiento; estas leyes son enormemente complejas, y aunque la hidrodinámica tiene una importancia práctica mayor que la hidrostática, sólo podemos tratar aquí algunos conceptos básicos.

El interés por la dinámica de fluidos se remonta a las aplicaciones más antiguas de los fluidos en ingeniería. Arquímedes realizó una de las primeras contribuciones con la invención, que se le atribuye tradicionalmente, del tornillo sin fin. La acción impulsora del tornillo de Arquímedes es similar a la de la pieza semejante a un sacacorchos que tienen las picadoras de carne manuales. Los romanos desarrollaron otras máquinas y mecanismos hidráulicos; no sólo empleaban el tornillo de Arquímedes para bombear agua en agricultura y minería, sino que también construyeron extensos sistemas de acueductos, algunos de los cuales todavía funcionan. En el siglo I a.C., el arquitecto e ingeniero romano Vitrubio inventó la rueda hidráulica horizontal, con lo que revolucionó la técnica de moler grano.

A pesar de estas tempranas aplicaciones de la dinámica de fluidos, apenas se comprendía la teoría básica, por lo que su desarrollo se vio frenado. Después de Arquímedes pasaron más de 1.800 años antes de que se produjera el siguiente avance científico significativo, debido al matemático y físico italiano Evangelista Torricelli, que inventó el barómetro en 1643 y formuló el teorema de Torricelli, que relaciona la velocidad de salida de un líquido a través de un orificio de un recipiente, con la altura del líquido situado por encima de dicho agujero. El siguiente gran avance en el desarrollo de la mecánica de fluidos tuvo que esperar a la formulación de las leyes del movimiento por el matemático y físico inglés Isaac Newton. Estas leyes fueron aplicadas por primera vez a los fluidos por el matemático suizo Leonhard Euler.

1.3 MEDIDORES DE PRESIÓN

En los procesos que transcurren a diferentes presiones es necesario conocer esta magnitud, y para medir se utilizan aparatos llamados generalmente manómetros que pueden ser de diferentes tipos y grados de precisión.⁵

1.3.1 TIPOS DE INSTRUMENTOS⁶

En el caso de líquidos con superficie libre, la presión en cualquier punto está determinada por su profundidad bajo la superficie. Cuando el líquido está totalmente encerrado, como ocurre en tuberías y conductos a presión, ésta no puede averiguarse fácilmente y se requiere un instrumento de medida adecuado. Existen tres tipos principales:

a) piezómetro,

b) manómetro,

⁵ SANDOVAL, Ramiro, (1993), Principios de Hidráulica.

⁶ WEBBER B., (1965), Mecánica de fluidos para ingenieros, Ediciones URMO.

c) manómetro de Bourdon.

En la *figura 1.4* se muestran los tres tipos aplicados a una tubería. A continuación se da una breve descripción de ellos.

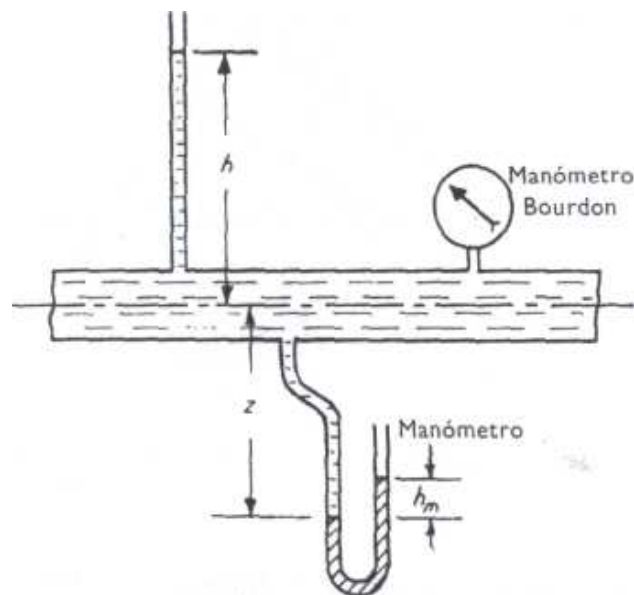


Figura 1.4 Instrumentos de medida de presiones.

Fuente: WEBBER B., (1965), Mecánica de fluidos para ingenieros, Ediciones URMO.

1.3.1.1 Piezómetro

Si se hace una toma en la superficie de contorno y se conecta un tubo suficientemente largo, el líquido ascenderá por el tubo hasta equilibrarse con la presión atmosférica. La presión en la masa principal del líquido se representa por la altura vertical de la columna líquida. Por supuesto, este dispositivo es adecuado solamente para presiones moderadas, ya que en otro caso el líquido subiría demasiado en el tubo piezométrico para que fuera conveniente el procedimiento.

Cuando el líquido fluye, la conexión piezométrica no debe exceder 1/8 in de diámetro y debe ser enrasada con la superficie de contorno. Para mayor seguridad puede utilizarse un anillo piezométrico. Este consiste en una cámara

anular que rodea la tubería y que se comunica con ella cierto número de tomas igualmente espaciadas.

1.3.1.2 Manómetro

El principio es el mismo que el anteriormente descrito, pero se supera la dificultad que implica un tubo excesivamente largo al conectar un tubo en U que contiene un líquido inmiscible. El mercurio (peso específico 13,6) es el líquido manométrico empleado usualmente para medir la presión del agua.

La presión manométrica p en la tubería es:

$$p = w_m h_m - wz \quad (1.4)$$

Fuente: WEBBER B., (1965), Mecánica de fluidos para ingenieros, Ediciones URMO.

Donde h_m es la diferencia de nivel del líquido manométrico en las dos ramas, z es la altura del eje de la tubería sobre el menisco de la rama conectada a la tubería y w , w_m son los pesos específicos del líquido de la tubería y el líquido manométrico, respectivamente.

Debido a la posición fluctuante de los meniscos no es posible la calibración directa. Sin embargo, esto puede evitarse si la rama conectada a la tubería es de un diámetro lo bastante grande para que el nivel del menisco permanezca virtualmente constante. De este modo, pueden leerse las presiones en una escala graduada unida a la otra rama.

A menudo se evalúa el flujo en tuberías basándose en la medida de la diferencia de presiones entre dos tomas próximas. Se utiliza un manómetro diferencial (*figura 1.5*), empleándose también el mercurio como líquido manométrico. Cuando la diferencia de presiones es pequeña, da mejores resultados el uso de un líquido más ligero.

La diferencia de presiones $p_1 - p_2$ está dada por:

$$p_1 - p_2 = w_m h_m + w(z_2 - z_1) \quad (1.5)$$

Donde, si la tubería es horizontal, $z_1 = z_2 + h_m$, y

$$p_1 - p_2 = h_m + (w_m - w) \quad (1.6)$$

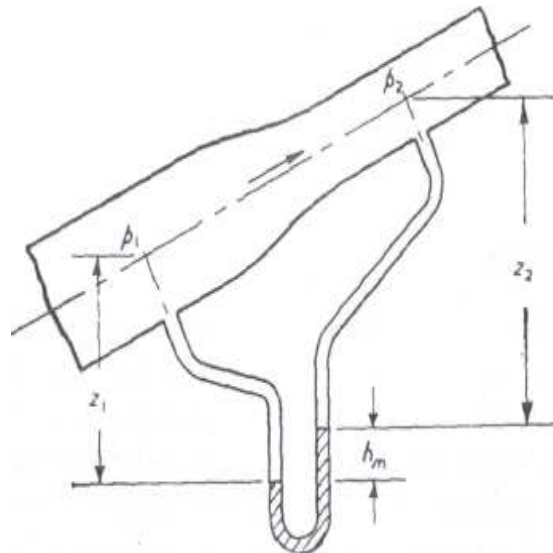


Figura 1.5 Manómetro diferencial.

Fuente: WEBBER B., (1965), Mecánica de fluidos para ingenieros, Ediciones URMO.

1.3.1.3 Manómetro de Bourdon

Este es un instrumento comercial que se conecta, bien sea directamente a la tubería o bien al extremo de una línea piezométrica.

Consiste en un tubo curvado, libremente suspendido en la parte curva, pero sujeto rígidamente en su arranque. Un aumento en la presión interna tiende a enderezar el tubo y, como la deflexión es directamente proporcional a la presión aplicada, un simple mecanismo permite su lectura directa. Como la presión en el exterior del tubo es la atmosférica, lo que registra el instrumento es la presión manométrica, aplicable normalmente al centro del aparato.

El manómetro de Bourdon es de uso corriente como indicador general de presión, pero no resulta adecuado cuando se requiere una considerable

exactitud, como ocurre generalmente cuando hay que medir presiones diferenciales.

En la *figura 1.6* se indica un manómetro tipo bourdon, cuando existe presión en la entrada del manómetro hace que el tubo se expanda moviendo una serie de mecanismos que hacen que la aguja se desplace proporcionalmente a la presión existente.



Figura 1.6 Manómetro de bourdon.

Fuente:http://www.koboldmessring.com/fileadmin/koboldfiles/media/manometro_tipo_bourdon_con_diafragma_man-r_l1-man-r.gif&imgrefurl

1.4 RESISTENCIA DE MATERIALES

La resistencia de materiales o mecánica de los cuerpos deformables, trata del estudio y relación entre los esfuerzos internos y las deformaciones originadas en los cuerpos reales, así como los cambios de forma y tamaño del cuerpo en relación con las cargas que actúan sobre él, de sus vinculaciones y de las propiedades físicas del material de que están constituidos.

1.4.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

En ingeniería, las propiedades mecánicas de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otros, desde el punto de vista del comportamiento mecánico de los materiales, también hay que tener en cuenta el comportamiento que puede tener un material en los diferentes procesos de mecanizados que pueda tener.⁷

1.4.1.1 Elasticidad y Plasticidad

Esta propiedad que posee un material de volver parcial o completamente a su forma inicial una vez que desaparece la carga es lo que se llama “elasticidad”. Si una barra recupera completamente su longitud inicial, se dice que el material es “perfectamente elástico”; de lo contrario se dice que es “parcialmente elástico”.

La “plasticidad” es una propiedad opuesta, un material es “perfectamente plástico” cuando al dejar de actuar la carga que lo deforma mantiene su configuración deformada.

En la realidad ningún material resulta perfectamente elástico o perfectamente plástico.

Algunos materiales como el acero, aluminio, goma e incluso la madera y el hormigón pueden ser considerados como perfectamente elásticos dentro de ciertos límites, es decir, si no están excesivamente cargados. Otros materiales como la arcilla y la masilla pueden considerarse como perfectamente plásticos.

1.4.1.2 Ley de Hooke

La denominada Ley de Hooke constituye la base de la Resistencia de Materiales y es válida dentro de lo que se denomina régimen lineal elástico.

⁷ http://es.wikipedia.org/wiki/Propiedades_mecanicas_de_los_materiales

Esta ley establece que si la tensión normal σ se mantiene por debajo de un cierto valor σ_p , llamado tensión de proporcionalidad, las deformaciones específicas y las tensiones son directamente proporcionales.

$$\Sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.7)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

E: Recibe el nombre de Módulo de Elasticidad Longitudinal, o módulo de Young.

El valor de E es una característica de cada material.

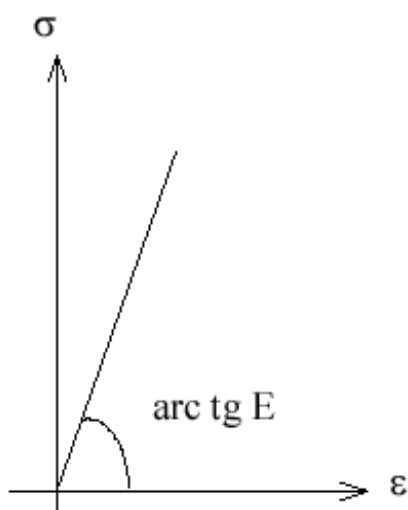


Figura 1.7 Ley de Hooke.

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

1.4.1.3 Diagrama esfuerzo - deformación ($\sigma - \varepsilon$) del acero de bajo carbono

Al resolver los problemas de la Resistencia de Materiales nos encontramos con la necesidad de tener ciertos datos experimentales previos sobre los cuales se pueda basar la teoría. Por ejemplo, para poder establecer la ley de Hooke se hace necesario conocer el módulo E, el cual debe determinarse experimentalmente.

Para obtener los datos antes mencionados se pueden realizar distintos tipos de ensayo, de los cuales uno muy difundido es el de tracción. Para este ensayo usualmente se emplean probetas especiales, que consisten en barras de sección circular, las cuales son estiradas en una máquina especialmente diseñada para el ensayo. Cuando una barra está sometido a un esfuerzo axial P , aparecen internamente tensiones normales σ calculables a través de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.8)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

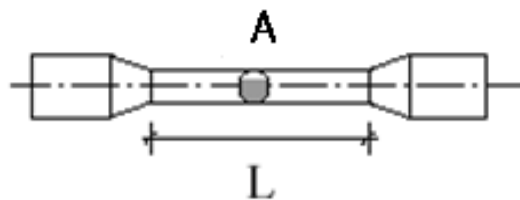


Figura 1.8 Probeta de acero.

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

Dónde A es el área de la sección transversal de la barra. Sabemos también que se originan desplazamientos δ . Si entonces se miden los valores $(P; \delta)$ para cada escalón de carga, se pueden graficar los valores $(\sigma; \epsilon)$, que se evalúan mediante las expresiones ya conocidas.

Para el caso del acero común, también llamado acero dulce, que es de bajo contenido de carbono, el diagrama tenso-deformación resulta como el de la figura siguiente:

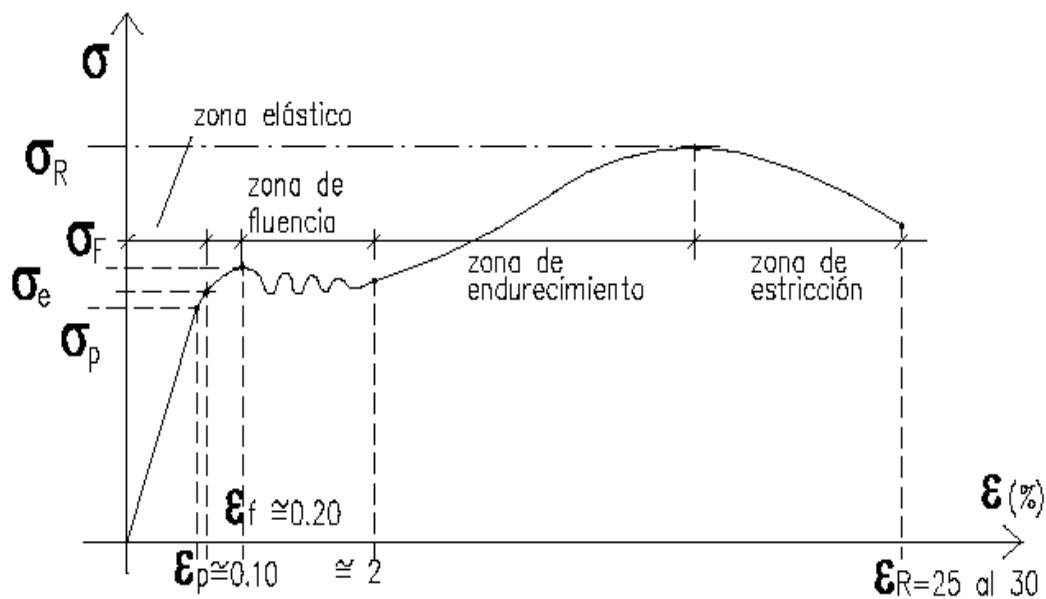


Figura 1.9 Diagrama esfuerzo – deformación para el acero de bajo carbono.

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

En este diagrama pueden distinguirse ciertas zonas con determinadas características:

1.4.1.3.1 Período elástico

Este período queda delimitado por la tensión σ_e (límite de elasticidad). El límite de elasticidad se caracteriza porque, hasta llegar al mismo, el material se comporta elásticamente, es decir que producida la descarga, la probeta recupera su longitud inicial. En la práctica, este límite se considera como tal cuando en la descarga queda una deformación específica remanente igual al 0.001 %.

Este período comprende dos zonas: la primera, hasta el σ_p (límite de proporcionalidad), donde el material verifica la ley de Hooke. La segunda entre σ_p y σ_e , si bien es elástica, no manifiesta proporcionalidad entre tensiones y deformaciones.

En la primera zona:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (1.9)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

En la segunda zona:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = f(\varepsilon) = \text{Módulo de elasticidad reducido} \quad (1.10)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

En general, los límites de proporcionalidad y de elasticidad difieren muy poco entre sí.

1.4.1.3.2 Período elasto-plástico

Para valores de tensión superiores al límite elástico, la pieza si fuera descargada no recobraría su dimensión original, apreciándose una deformación remanente acorde con la carga aplicada. A medida que aumenta la sollicitación, la gráfica representativa es la de una función para la cual disminuye el valor de su tangente, tendiendo a anularse en el tramo final del período, al cual se llega con un valor de tensión que se indica como σ_f (tensión de fluencia).

1.4.1.3.3 Período plástico (fluencia)

Una vez arribado al valor de tensión σ_f (límite de fluencia), el material fluye, es decir, aumentan las deformaciones sin que exista aumento de tensión. En realidad este fenómeno no es tan simple, ya que puede verse que la tensión oscila entre dos valores límites y cercanos entre sí, denominados límites de fluencia superior e inferior, respectivamente.

La tensión de proporcionalidad resulta ser aproximadamente el 80% de la tensión de fluencia.

$$\sigma_p \approx 0.8 \sigma_f \quad (1.11)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

Las investigaciones demuestran que durante la fluencia se producen importantes deslizamientos relativos entre los cristales. Como consecuencia de estos deslizamientos, en la superficie de la probeta aparecen las llamadas líneas de Chernov - Lüders, que forman con el eje de la misma un ángulo de 45°.

1.4.1.3.4 Período de endurecimiento y de estricción

Como consecuencia de un reajuste cristalográfico, luego de la fluencia el material sufre un re-endurecimiento, que le confiere la capacidad de incrementar la resistencia, es decir, puede admitir un incremento de carga. Sin embargo en este período las deformaciones son muy pronunciadas.

La tensión aumenta hasta alcanzar un valor máximo σ_R , denominado “tensión de rotura”, a partir del cual la tensión disminuye hasta que alcanza una determinada deformación de rotura, produciéndose la rotura física.

La tensión σ_R no es en realidad la máxima tensión que se origina en la probeta sometida a carga. En efecto, alcanzado el valor de la deformación específica correspondiente a σ_R , comienza a manifestarse en la probeta un fenómeno denominado “estricción”.

Este consiste en la reducción de una sección central de la pieza. Esta reducción, progresiva con el aumento de la carga, hace que las tensiones aumenten y que, en realidad, el diagrama efectivo en lugar de presentar su concavidad hacia abajo muestra un punto de inflexión en las vecindades de σ_R y cambia su curvatura presentando una rama creciente hasta alcanzar la deformación de rotura ϵ_R .

Debido a lo que hemos mencionado recientemente el diagrama que acabamos de ver suele denominarse diagrama convencional $\sigma - \epsilon$ (figura 1.9), ya que los

cálculos de las tensiones se realizan siempre sobre la base de suponer la sección transversal constante, con área igual a la inicial.

Los materiales como el acero dulce, que presentan una gran capacidad de deformación antes de alcanzar la rotura, se denominan “dúctiles”. Podemos decir que estos materiales avisan la rotura física, ya que antes de alcanzarse la misma, las deformaciones son tan grandes, que la estructura llega a la falla por este motivo. Los materiales como el acero duro, para los cuales la rotura se produce bruscamente, sin grandes deformaciones previas, se denominan frágiles

1.4.1.4 Diagrama esfuerzo – deformación para otros materiales

Hay algunos materiales para los cuales se observa que el diagrama $\sigma - \epsilon$ es una curva continua sin tramos rectos, es decir, que prácticamente en ningún momento verifican la ley Hooke. Un ejemplo clásico es el hormigón, para el cual en general interesa su curva $\sigma - \epsilon$ en compresión.

En estos casos no puede hablarse de un módulo de elasticidad único. Cabe distinguir tres valores del módulo de elasticidad:

a) Módulo al origen:

$$E = \operatorname{tg} \alpha \quad (1.12)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

b) Módulo instantáneo o tangente. Su valor lo da la pendiente a la curva $\sigma - \epsilon$ en cada punto:

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (1.13)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

c) Módulo secante, el que viene dado por la tangente trigonométrica del ángulo α_1 .

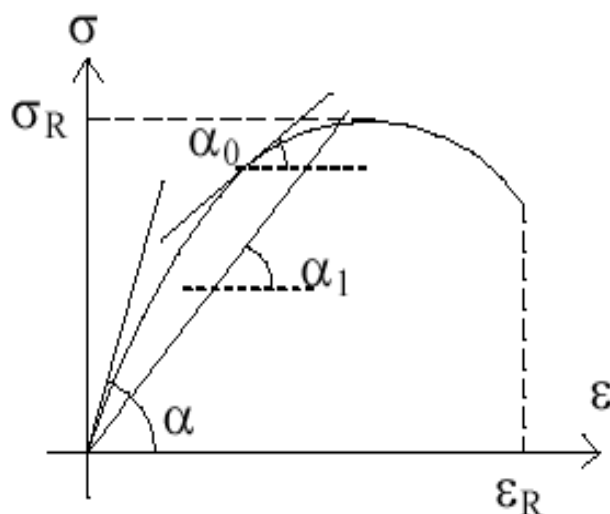


Figura 1.10 Módulos tangentes y secantes.

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

Para ciertos materiales, Bach, sobre la base de numerosos ensayos, propuso como relación entre σ y ϵ una ley de tipo exponencial que lleva su nombre:

$$\sigma^k = E * \epsilon \quad (1.14)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

Donde k depende del material.

Ciertos materiales presentan además la particularidad de tener un comportamiento diferente en compresión que a tracción, tal es el caso del hormigón.

1.4.1.5 Diagramas ideales

Los diagramas que hemos visto suelen no ser prácticos para trabajar con ellos, por lo que en determinadas circunstancias se los reemplaza por diagramas idealizados debidos a Prandtl, que resumen las características fundamentales de los tres tipos básicos de materiales.

El diagrama ideal correspondiente a un material dúctil se compone de dos tramos rectos: uno inclinado, correspondiente al período elástico; el otro horizontal, materializando el período de fluencia.

El período de endurecimiento no interesa porque la deformación al final de la fluencia es tan significativa que el material está en falla antes de llegar a la rotura.

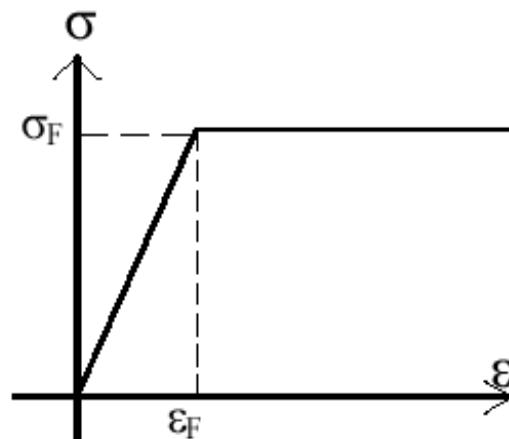


Figura 1.11 Diagrama ideal para un material dúctil.

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

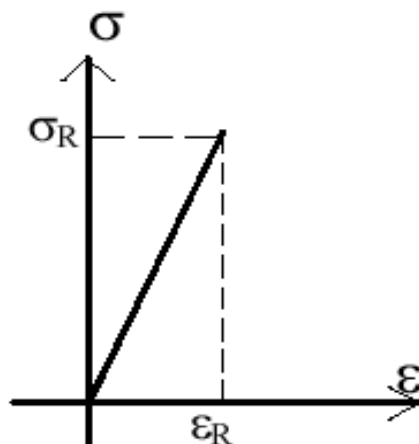


Figura 1.12 Diagrama ideal para un material frágil

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

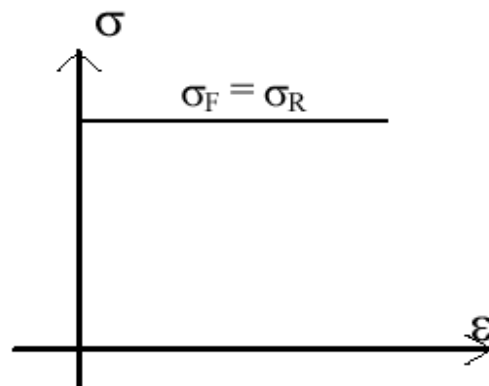


Figura 1.13 Diagrama ideal para un material plástico.

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

En los materiales frágiles el límite de proporcionalidad es muy próximo a la tensión de rotura, prescindiéndose entonces del tramo curvo.

Para los materiales plásticos el diagrama es una recta horizontal, lo que significa que sometidos a una carga, se deforman indefinidamente sin incremento de tensión.

1.4.2 CONCEPTOS DE COEFICIENTES DE SEGURIDAD, DE ESFUERZO Y CARGA ADMISIBLE

Al realizar el dimensionamiento debemos crear seguridad contra todas las clases de falla posible, la cual puede producirse por coincidir varias circunstancias desfavorables, por ejemplo, un crecimiento no previsto de las cargas que gravitan en las secciones, cuya resistencia se ha debilitado por la existencia de vicios ocultos.

La teoría de probabilidades nos enseña que no se puede lograr una seguridad absoluta, lo único que puede hacerse es mantener reducidas las probabilidades de falla.

“La seguridad de una construcción siempre estará amenazada por incertidumbres y será satisfactoria cuando las probabilidades de falla queden por debajo del valor considerado como admisible”.⁸

Existen numerosas causas de incertidumbres:

- Las hipótesis de cargas
- Las hipótesis de cálculo
- Los errores de cálculos
- Defectos del material
- Errores de las dimensiones
- Errores de ejecución

El método de cálculo fundamental y más difundido de los coeficientes de seguridad es el basado en las tensiones. Según este método, el cálculo de la resistencia se realiza controlando el valor de la tensión máxima que se produce en cierto punto de una estructura. La tensión máxima de trabajo no debe superar cierto valor

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_L}{\eta} \quad (1.15)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

Donde:

σ_L : Cierta valor límite de la tensión para el material dado

η : un número mayor que la unidad denominado “coeficiente de seguridad”

Para el caso de materiales dúctiles el valor límite σ_L es el límite de fluencia, en el caso de materiales frágiles σ_L es el límite de resistencia o tensión de rotura. La relación σ_L / η recibe el nombre de “tensión admisible”.

⁸ <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

$$\frac{\sigma L}{\eta} = \sigma adm \quad (1.16)$$

Fuente: <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

La elección del coeficiente de seguridad depende del mayor o menor grado de incertidumbre que exista en un problema, y se realiza basándose en toda una serie de criterios, en general probabilísticos. Existen reglamentos que establecen los criterios de dimensionamiento del coeficiente de seguridad, por ejemplo, la norma CIRSOC (SIREA).

Para los casos más frecuentes ya existen valores establecidos de los coeficientes de seguridad. Podemos hacer referencia a disposiciones reglamentarias que tratan sobre construcciones de acero; indican valores que varían entre 1.25 y 1.60 según los cuidados constructivos, el destino de los edificios y los estados de carga considerados. Para estructuras de hormigón armado, los coeficientes de seguridad varían entre 1,75 y 2,10. Para el caso de la madera, material que presenta muchas incertidumbres en cuanto a su comportamiento, los coeficientes de seguridad suelen ser más grandes.

Una expresión que es usada con frecuencia para dar un concepto del coeficiente de seguridad, es que éste representa el incremento que debería tener el estado de cargas para producir el colapso de la pieza. Debemos señalar que si bien esto puede ser cierto, solamente lo será si los demás parámetros que intervienen en el problema están totalmente controlados, y no existe ninguna incertidumbre respecto de ellos.

CAPÍTULO II

PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

Para empezar el presente capítulo se dará una breve definición de lo que es una prueba hidrostática en general, tomando en cuenta, que existen algunos tipos de la misma, todos basados en normas y estándares establecidos.

Una prueba hidrostática es un ensayo no destructivo mediante la cual se verifica la integridad de una tubería o sistema, el agua es bombeada a una presión más alta que la presión de operación y se mantiene a esa presión por un tiempo establecido previamente, el cual varía según la longitud del tramo a probar.

La prueba consiste en presurizar al equipo sin estar en funcionamiento y desenergizado, desconectado en sus partes mecánicas y neumáticas a una temperatura no mayor de 40 grados centígrados, con graficador de presión o manómetro calibrado conectado al equipo, hasta una presión de prueba que debe ser al menos 10% arriba de la presión de calibración del dispositivo de seguridad, ó al menos 10% superior a la presión de diseño del fabricante de la tubería o sistema.

El límite de presión varía según los requerimientos del solicitante de la prueba y las normas vigentes en cada situación, dicho porcentaje en varios casos puede llegar hasta el 150% de la presión normal de trabajo del sistema.

El medio de presurización debe ser un fluido incompresible cuyo comportamiento al incremento de la presión no genere riesgos, siendo el agua el fluido más recomendado y utilizado. A pesar de ello existen varios gases y líquidos que también son utilizados para este fin.

2.1 TIPOS DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

A continuación se detallan los tipos de pruebas hidrostáticas más utilizados en la industria.

2.1.1 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS A CALDEROS

Un caldero en una moderna central térmica produce vapor a muy altas presiones y temperaturas. Una de las pruebas más simples pero importante, que garantice la integridad de la caldera es la prueba hidrostática.

Una cadena de fallas catastróficas marcó la era inicial de la máquina de vapor. La explosión del caldero en la fábrica de calzado Grover en Brockton, Massachusetts en 10 de marzo de 1905, activa la aplicación de las normas de seguridad de los calderos. Hoy en día, normas estrictas controlan el diseño de calderos, materiales, fabricación y operación. Estos son obligatorios según la ley en todo el mundo.

En una gran central térmica hay alrededor de diez mil toneladas de tubos de acero, tuberías, tambores y otros tanques que contienen el vapor a alta presión. Más de 60 mil articulaciones soldadas hacen del caldero un sistema integrado que produce vapor. Cálculos de diseño, las inspecciones metalúrgicas y las inspecciones de fabricación aseguran la integridad de todas las partes y cada conjunto de soldadura.⁹

La prueba hidrostática es la última de las pruebas para garantizar la hermeticidad, el cumplimiento de normas y la seguridad antes que el caldero produzca vapor. La prueba consiste en llenar el caldero con agua y presurizar el agua hasta al menos una y media (1.5) veces la presión máxima de funcionamiento por un corto período de tiempo. Cada parte está sujeta a una tensión mucho más alta a la

⁹ <http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/26093.aspx>

máxima y más aún a la que normalmente se encontrará. Esta es una prueba de resistencia; se produce un error en cualquier punto débil durante la prueba.

2.1.1.1 El agua como principal fluido de pruebas

El agua es el líquido más fácilmente disponible. No hay riesgos medioambientales o tóxicos. Hay otra razón importante. Es la capacidad de compresión o más bien la incompresibilidad de la misma. El agua es casi incompresible. Para la realización de la prueba hidrostática a un caldero en grandes centrales, se requiere alrededor de 600 metros cúbicos de agua. Puesto que el agua es casi incompresible, para aumentar la presión desde la presión atmosférica hasta 250 bares (3626 psi), se requiere sólo una cantidad adicional de un metro cúbico de agua. Esto es más rápido y requiere mucho menos esfuerzo. En caso de falla de cualquier parte la presión también se reduce inmediatamente previniendo nuevos daños.

2.1.1.2 Requerimientos de la prueba

- Garantizar que todo el trabajo sea completado y documentado.
- Conectar una bomba de desplazamiento positivo de alta presión (bomba hidrostática).
- Instalar un medidor de presión calibrado y preciso (manómetro).
- Se cierran todas las válvulas en la instalación.
- Se llena la instalación con agua mediante una bomba de llenado de alta capacidad.
- Durante el llenado garantizar la eliminación de aire atrapado abriendo orificios de ventilación en el punto más alto. El aire atrapado aumentará drásticamente el tiempo necesario para llegar a la presión de prueba.

Ejecutando la bomba de prueba hidrostática aumenta la presión de la instalación gradualmente hasta la presión de prueba. Normalmente la presión de prueba es 1,5 veces la presión máxima permitida de funcionamiento.

Se deben realizar pruebas hidrostáticas obligatoriamente cada año, ya que las mismas son una comprobación de degradación del material y garantizan la seguridad continua de la instalación.

Esta prueba debería ser cubierta bajo la supervisión de y presenciada por un inspector autorizado de la compañía de seguros que cubra la instalación. En la opción de este inspector, la prueba hidrostática puede ser a veces $1\frac{1}{2}$ la presión de diseño del equipo, o a una presión ligeramente menor que el valor de las válvulas de seguridad. La prueba de esta última evitará la necesidad de cambio o amordazamiento de las válvulas de seguridad, además de la conexión de varias válvulas de desfogue de tubería, eliminación de controles y visores, etc.

Las líneas de la instalación y de sus exteriores deben ser completamente drenadas para rellenarlas con agua. El siguiente es un procedimiento estándar para la prueba hidrostática:

1. Abrir la válvula de ventilación de tambor de vapor y amordazar las válvulas de seguridad conforme a las recomendaciones del fabricante de la válvula de seguridad. En caso de fugas, las válvulas de seguridad pueden ser eliminadas y reemplazadas con tapones de prueba o bridas ciegas.
2. Abrir los orificios de ventilación en las tuberías de interconexión. Cerrar la válvula de salida de vapor.
3. Aislar conmutadores de presión, visores o componentes de control que no pretenden ser sometidos a una prueba hidrostática.
4. Llenar el sistema con agua tratada de acuerdo con las recomendaciones de la consultora de tratamiento de agua del cliente. El rango de temperatura del agua de prueba debe estar entre 70 °F (21.11 °C) y 120 °F (48.88 °C). Se debe tener cuidado para que todo el aire sea expulsado mientras se rellena el equipo. Se rellena el equipo hasta que el agua desborde la ventilación y, a continuación, se cierra la ventilación.

5. Aplicar presión lentamente. La tasa recomendada de aumento de la presión es inferior a 50 psi por minuto. Se debe mantener un control adecuado para que la presión no exceda el ajuste requerido en cada incremento de presión.

Ningún componente debe ser sometido a una presión mayor a 1½ veces la capacidad de diseño.

6. Cuando se alcanza la presión de prueba adecuada, puede comenzar la inspección de conformidad con el objetivo de la prueba. Examinar el sistema en caso de cualquier fuga. Si no hay fugas visibles, suspender del sistema en una condición estática presurizada durante un largo período, lo suficiente para satisfacer el requisito predefinido.

7. Al finalizar la prueba, liberar presión lentamente a través de una pequeña válvula de drenaje. A continuación, abrir completamente los orificios de ventilación y drenajes cuando la presión cae a 20 psi.

Debe prestarse particular atención para asegurarse de que partes que normalmente no contengan agua durante operaciones de trabajo queden libres de agua. El sistema debe ser drenado completamente después de la prueba hidrostática, para prevenir la congelación, si la unidad está instalada en una zona de clima frío y para minimizar la corrosión de las superficies metálicas.

8. Si se utilizaron juntas temporales para la prueba, deben reemplazarse con juntas de servicio regulares antes de preparar la unidad para la operación. Las juntas de prueba nunca deben ser reutilizadas. Reemplazar visores de vidrio, si es necesario y asegurarse de que las llaves de los manómetros estén abiertas. Quitar todas las mordazas de las válvulas de seguridad e instalar válvulas de alivio de presión del sistema, si es que éstas fueron removidas.

9. Una inspección adicional por el inspector autorizado en este punto, determinará si la instalación, incluidas modalidades de tuberías, válvulas de medidores, controles y otros equipos de la unidad cumplen con el código y/u otros requisitos técnicos.

10. Es recomendable consultar con un manual para posiciones de válvulas, para el posicionamiento correcto de las diversas válvulas durante el período de prueba hidrostática.

Se utilizan los mismos métodos para probar cualquier recipiente de presión o tuberías que almacenan o transportan fluidos presurizados. Esta es una prueba sencilla pero muy importante que todo mecánico e ingeniero de proceso deben conocer.

2.1.2 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS EN SISTEMAS DE TUBERÍAS

Las pruebas hidrostáticas pueden utilizarse para encontrar pérdidas en un sistema de tuberías de nueva construcción o modificadas, o en un sistema establecido donde ha sido experimentada una aparente pérdida de integridad. Si existen, fugas suelen producirse en las articulaciones o conexiones en el sistema.

Las pruebas de fuga no comprueban capacidad de presión o rendimiento potencial a largo plazo. El diseño del sistema y los rangos de presión de los componentes instalados son los determinantes únicos del rendimiento nominal y a largo plazo del sistema de presión. Los sistemas de tuberías de gas combustible deberían ser examinados de conformidad con estándares y regulaciones aplicables y procedimientos del operador de la tubería.

2.1.2.1 Seguridad

La seguridad es de vital importancia. Las pruebas de fuga pueden aplicar alto esfuerzo a las articulaciones no probadas y partes del sistema.

Un fallo puede ocurrir por fugas o por ruptura catastrófica que puede causar movimiento repentino y violento. En algunos casos, las fugas pueden preceder inmediatamente una ruptura catastrófica.

2.1.2.2 Restricción en contra del movimiento

Antes de aplicar presión, toda tubería y todos los componentes en la sección de prueba deben ser restringidos. Esto significa que si las tuberías o partes se mueven o separan durante la prueba, esto resultará en daños o lesiones. Nunca realizar pruebas de fuga en la tubería sin restricción.¹⁰

- Conexiones mecánicas deben instalarse completamente y reforzadas por instrucciones del fabricante.
- Las articulaciones y conexiones deben estar expuestas para su inspección.
- Asegurarse de que todas las conexiones para probar equipos son seguras.
- Desconectar o aislar todas las demás partes que no deben ser sometidas a la presión de prueba.

2.1.2.3 Cálculos previos a la prueba

A continuación se dará a conocer una serie de cálculos que son necesarios antes de proceder a realizar una prueba hidrostática, dichos cálculos nos pueden ayudar para saber a qué parámetros estamos expuestos durante la prueba.

2.1.2.3.1 Definición del dV/dP

El dV/dP se define como el cambio en el volumen para un cambio asociado en la presión de un volumen conocido bajo presión. Dos cálculos de dV/dP se utilizan en estas directrices, teórico y un valor de campo.¹¹

Un dV/dP teórico dará el cambio de volumen esperado para un cambio asociada en la presión para el volumen especificado bajo prueba suponiendo que el volumen bajo presión está libre de gas atrapado. El valor del campo de dV/dP es el cambio de volumen real para un cambio asociado en la presión para el volumen

¹⁰ <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

¹¹ http://www.slc.ca.gov/Division_Pages/MFD/SLPT/Revised_SLPT_Guidelines_12-03-03.pdf

especificado sometido a prueba. Si existe aire dentro de la línea bajo presión, este valor será diferente que el valor teórico. Este procedimiento proporciona directrices para el cálculo de ambos dV/dP 's, y diferencias aceptables entre los valores teóricos y de campo de dV/dP .

2.1.2.3.2 dV/dP teórico

Previamente a la puesta en marcha de las actividades de la prueba, el operador de la prueba debe realizar un cálculo pre-test para obtener un valor teórico de la dP/dV para el volumen verificado de tubería en virtud de la prueba y el medio de ensayo apropiado. Esta información puede utilizarse para determinar si existe gas atrapado en la línea sometida a prueba. El dV/dP teórico para tubería sobre tierra se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dP} = V \times \left[\left(\frac{D}{E \times t} \right) \left(\frac{5}{4} - \nu \right) + C \right] \quad (2.1)$$

El DV/DP teórico para tubos enterrados se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dP} = V \times \left[\left(\frac{D}{E \times t} \right) (1 - \nu^2) + C \right] \quad (2.2)$$

Donde,

V = volumen del segmento para el diámetro del tubo individual, en galones

D = diámetro externo del tubo (in),

E = módulo elástico del tubo de acero (psi),

t = espesor de pared de tubería (in),

ν = relación de Poisson del tubo de acero,

C = compresibilidad de medios de prueba (in³/in³/psi).

Nota: Para un segmento de prueba con varios diámetros, sumar el dV/dP individual de cada diámetro de tubo para obtener un dV/dP total para la sección de prueba total.

Nota: La constante dV/dP proporciona datos útiles con los que se puede predecir cuánto líquido será necesario para llevar a cabo una prueba de presión en el segmento de tubería. Por ejemplo, para una línea totalmente llena a 0 psi, con una presión deseada de 100 psi y dV/dP constante de 0,50 galones/psi, la cantidad de líquido que se requerirá para probar el segmento será: 100 psi x 0,50 galones / psi = 50 galones. Se trata de la cantidad mínima; si hay aire atrapado la cantidad necesaria de líquido para llegar a la presión de prueba podría ser mucho mayor.

2.1.2.4 Sección de prueba

Las pruebas podrán realizarse en el sistema completo o en secciones. La longitud de la sección de prueba está determinada por la capacidad de los equipos de pruebas. Un equipo con una capacidad inferior de presurización o llenado podría no ser capaz de completar la prueba dentro de los límites de tiempo admisibles. Si es así, se utilizarán equipos de prueba de mayor capacidad o se seleccionará una sección de prueba más corta. Antes de aplicar presión de prueba, se permitirá transcurrir un tiempo para que el líquido de prueba y la sección de prueba igualen sus temperaturas.¹²

2.1.2.5 Presión de prueba

Para sistemas de tuberías de presión que incluyen accesorios de tubería:

- a) La máxima presión de prueba permisible se mide en la elevación más baja en la sección de prueba.
- b) La máxima presión de prueba permisible es: (a) menor al 150 % de la presión de funcionamiento, siempre que todos los componentes en la sección de prueba se clasifican para la presión de prueba, o (b) la capacidad de presión del componente con menor resistencia en la sección de prueba.

¹² <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

Para propósitos de pruebas de fuga, la máxima presión de prueba permitida en tuberías de acero es el 150 % de la capacidad de presión de diseño de la tubería para la aplicación y la temperatura de servicio de aplicación. No se deben someter presiones más bajas a las calificadas y a las partes que no sean de acero a presiones por encima de su capacidad de presión. Las partes con una capacidad de presión más baja a la calificada deben ser eliminadas o aisladas de la sección de prueba para evitar el daño o fallo. La presión de prueba debe reducirse cuando la sección prueba está a temperatura elevada, ya sea en condiciones de servicio o en condiciones ambientales tales como ser calentada por el sol.

Debe multiplicarse la presión de prueba por el multiplicador de la tabla 2.1 para determinar la presión de prueba admisible a temperatura elevada.

Temperatura de la sección de prueba °F (°C)	≤80 (≤27)†	≤90 (≤32)	≤100 (≤38)	≤110 (≤43)	≤120 (≤49)	≤130 (≤54)	≤140 (≤60)‡
Multiplicador	1	0,9	0,8	0,75	0,65	0,6	0,5

† Usar el multiplicador 80 °F (27 °C) para 80 °F (27 °C) y temperaturas menores. ‡ La máxima temperatura de servicio para tuberías de presión no debería ser mayor a 140 °F (60 °C).

Tabla 2.1 Multiplicador de presión para temperaturas elevadas

Fuente: <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

2.1.2.6 Duración de la prueba

Cuando se realicen pruebas con presiones por encima de la presión de diseño del sistema y superior al 150 % de la presión de diseño del sistema, la duración máxima de prueba es de ocho (8) horas incluyendo tiempo de presurización, tiempo para la expansión inicial, el tiempo a presión de prueba y el tiempo para despresurización de la sección prueba. Si no se ha completado la prueba debido a la pérdida, la avería del equipo, o por cualquier otro motivo, se despresurizará la

sección de prueba completamente y se permitirá que el sistema se relaje durante al menos ocho (8) horas antes de presurizar la sección prueba una vez más.

2.1.2.7 Fluido de prueba¹³

A continuación se dará a conocer dos tipos de fluidos más comúnmente utilizados en las pruebas de presión

2.1.2.7.1 Prueba hidrostática

El líquido de prueba debe satisfacer apropiadamente las normas de seguridad y calidad para que el medio ambiente, el sistema, los equipos de prueba y eliminación (si fuese necesario) no se vean perjudicados. El líquido de prueba recomendado es agua.

2.1.2.7.2 Prueba neumática (Gas comprimido)

Si se produce un error al utilizar gas comprimido como fluido de prueba, la falla libera la energía aplicada para presurizar el sistema de tuberías y la energía que se aplica para comprimir el gas. Dicha falla puede ser explosiva y peligrosa.

En comparación con una prueba hidrostática, las pruebas neumáticas pueden ser más peligrosas porque una falla durante la prueba neumática libera más energía. Por razones de seguridad, las pruebas neumáticas son muy poco recomendables.

No se deben realizar pruebas neumáticas a menos que el propietario y el ingeniero del proyecto especifiquen una prueba neumática y aprueben su uso.

Una prueba neumática no debe ser considerada a menos que una de las siguientes condiciones exista:

¹³ <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

- Cuando el sistema de tuberías esté diseñado de tal manera que no pueda llenarse con un líquido.
- Cuando los rastros de un líquido pongan en peligro el sistema de tuberías o su uso previsto.
- Cuando el sistema sea probado con aire de baja presión usando el *Método de Prueba Estándar de ASTM F 1417 para Instalaciones*.

2.1.2.8 Temperatura del fluido de prueba

La temperatura del líquido se ve afectada por una variedad de factores, incluyendo la temperatura ambiente, las condiciones meteorológicas, ubicación de la tubería, fuente de medios de prueba, color de la tubería, etc. Para tubería enterrada, la fluctuación esperada debido a los efectos de la temperatura ambiente debe ser pequeña debido al aislamiento proporcionado por el suelo. Para tubo aéreo, las condiciones externas tendrán el mayor impacto. A medida que aumenta la temperatura del líquido, la presión de prueba hidrostática debe disminuir. Si la temperatura del líquido disminuye, la presión de prueba hidrostática debe aumentar.

La tabla 2.2 proporciona algunos datos calculados para el aumento de temperatura del líquido prevista durante un período de cuatro horas para diámetros estándar y espesor de pared. La tabla a continuación se proporciona para mostrar la sensibilidad relativa de la temperatura del líquido (agua) a la temperatura ambiente para casos muy idealizados. En este caso, la temperatura se mantiene constante asumiendo un período de prueba de cuatro horas y la temperatura del agua inicial es de 60 °F:

Temperaturas esperadas del agua en tuberías luego de un período de 4 horas con temperaturas ambientales constantes (°F), 60°F (15,5°C) al llenado inicial			
Diámetro nominal de la tubería (in.)	Temperatura Ambiental Constante		
	70°F (21°C)	80°F (26,6°C)	90°F (32,2°C)
2	66,8 (19,3)	74,7 (23,7)	82,9 (28,3)
2,5	66,1 (18,9)	73,3 (22,9)	80,9 (27,1)
3	65,2 (18,4)	71,4 (21,8)	78,1 (25,6)
3,5	64,6 (18,1)	70,2 (21,2)	76,2 (24,5)
4	64,1 (17,8)	69,2 (20,6)	74,6 (23,6)
6	62,7 (17)	66,2 (19)	70 (21,1)
8	62 (16,6)	64,6 (18,1)	67,5 (19,7)
10	61,6 (16,4)	63,6 (17,5)	65,9 (18,8)
12	61,3 (16,3)	62,9 (17,1)	64,8 (18,2)
14	61,1 (16,2)	62,6 (17)	64,3 (17,9)
16	60,9 (16,1)	62,2 (16,7)	63,6 (17,5)
18	60,8 (16)	61,9 (16,6)	63,1 (17,3)
20	60,7 (15,9)	61,7 (16,5)	62,7 (17)
22	60,6 (15,8)	61,5 (16,3)	62,4 (16,8)

Tabla 2.2 Temperaturas del agua

Fuente: http://www.slc.ca.gov/Division_Pages/MFD/SLPT/Revised_SLPT_Guidelines_12-03-03.pdf

2.1.2.9 Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica del medio de prueba (agua) afecta los cambios de presión y volumen calculados frente a un cambio en la temperatura (dV/dT & dP/dT). Medios con altos coeficientes térmicos son muy sensibles a los cambios de temperatura. Por lo tanto, para obtener un mismo registro de temperatura con medios muy sensibles, una prueba de tuberías mostraría un mayor cambio de volumen o presión en comparación con el agua como un medio

de prueba. Esta es la razón principal para el uso de agua como un medio de prueba y para tomar datos de temperatura exacta.

2.1.2.10 Aire arrastrado o atrapado

El aire arrastrado puede impedir que la estabilización del líquido de prueba durante una prueba o puede enmascarar la presencia de una fuga real. La primera indicación de gran cantidad de aire arrastrado generalmente se producirá durante la presurización. La presurización no será inmediata desde que el agua sea inyectada en la sección de prueba, ya que debe desplazar un significativo volumen de aire altamente compresible. También, la expansión del aire puede prevenir la detección de una fuga real en el segmento de prueba. Si hay una pérdida pequeña, puede no ser evidente la pérdida de presión esperada debido a la expansión del aire dentro de la tubería y tenderá a mantener la presión constante. Esta es la razón principal para utilizar dV/dP para determinar el porcentaje de aire que está presente y para eliminar el aire en la sección de prueba.

La figura 2.1 muestra el efecto de la presión de tubería con el volumen inyectado para diversas cantidades de aire atrapado por 1000 pies de tubería de 8,625 in. El gráfico muestra cómo el aire puede afectar el volumen necesario para llegar a la presión de prueba completa.

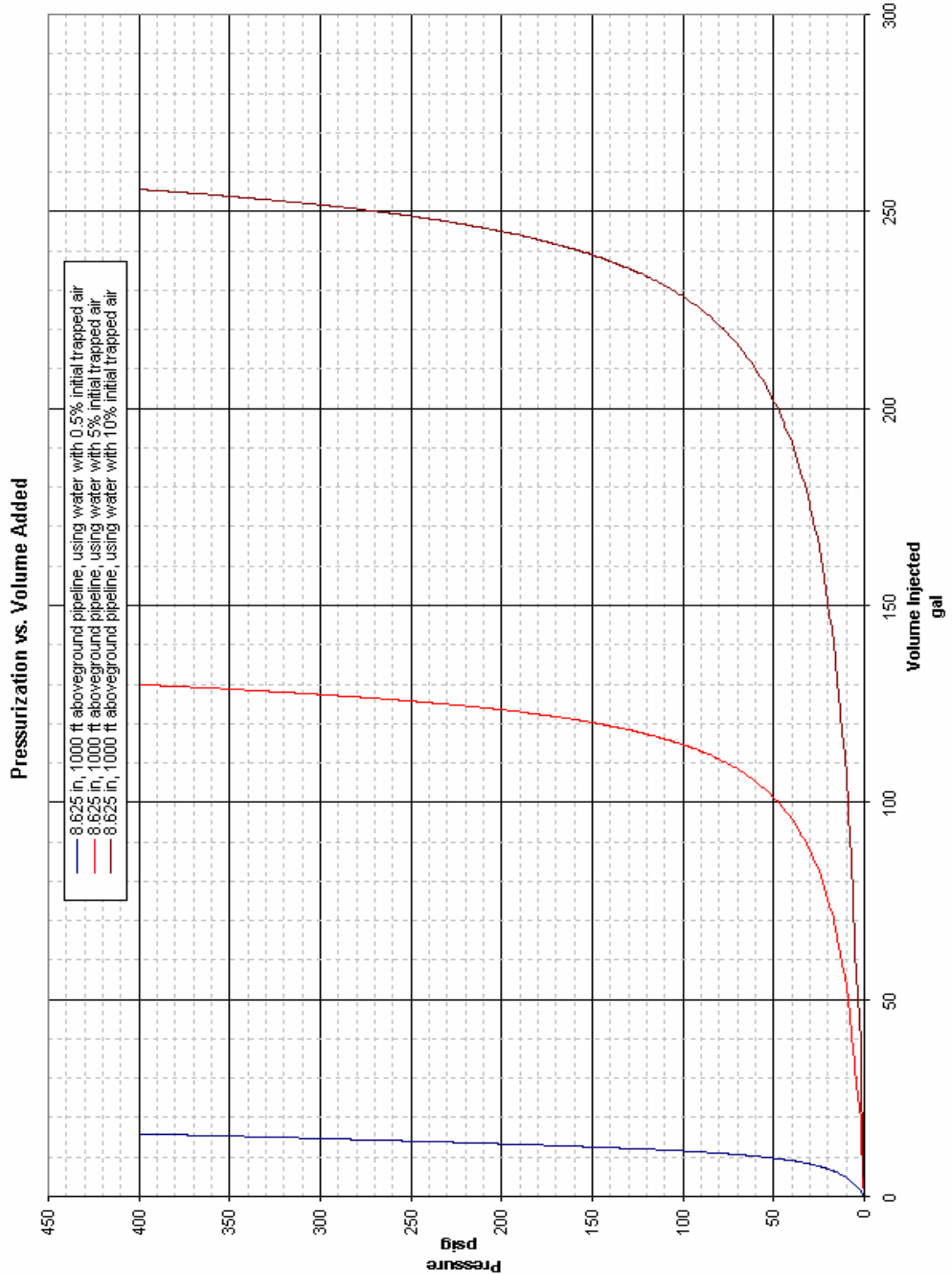


Figura 2.1 Presurización vs. Volumen de agua con diferentes porcentajes de aire atrapado

Fuente: <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

2.1.2.11 Procedimientos para pruebas de fugas

En esta sección se abarcarán varios procedimientos de pruebas de fugas hidrostáticas y neumáticas. Todos estos procedimientos incorporan toda la información de los subtítulos antes tratados.¹⁴

2.1.2.11.1 Prueba de fuga hidrostática

Este procedimiento de prueba hidrostática consiste en el llenado, una fase de expansión inicial, una fase de prueba y despresurización. Hay dos alternativas para la fase de prueba.

– **Llenado**

Llenar la sección de prueba contenida completamente con el líquido de prueba.

Asegurarse de que no existe aire atrapado en la sección de prueba. Una falla con aire atrapado puede causar un lanzamiento explosivo y dar lugar a la muerte o lesiones corporales graves. Usar respiraderos o válvulas de venteo en los puntos altos para quitar el aire.

– **Fase de expansión inicial**

Se presurizará gradualmente la sección de prueba hasta la presión de prueba y se mantendrá la presión de prueba durante tres (3) horas. Durante la fase de expansión inicial, las tuberías de polietileno se ampliarán ligeramente. Se requerirá líquido de prueba adicional para mantener la presión. No es necesario controlar la cantidad de agua que agrega durante la fase de expansión inicial.

¹⁴ <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

– **Fase de Prueba, Alternativa 1**

Inmediatamente después de la fase de expansión inicial, reducir la presión de prueba por 10 psi y dejar de agregar líquido de prueba. Si la presión de prueba se mantiene estable (a menos de 5% del valor objetivo) durante una (1) hora, no se indican fugas.

– **Fase de Prueba, Alternativa 2**

Esta alternativa es aplicable cuando la presión de prueba es del 150 % de la presión de diseño de sistema.

Inmediatamente después de la fase de expansión inicial, supervisar la cantidad de agua de reposición necesaria para mantener la presión de prueba de una (1), o dos (2) o tres (3) horas. Si la cantidad de agua de reposición necesaria para mantener la presión de prueba no supera el importe en la tabla 2.3 a continuación, no se indican fugas.

Medida nominal de tubería (in.)	Aporte de Agua de Reposición para Fase de Prueba, Alternativa 2, (U.S. Gal/100 ft de tubería)		
	Una (1) hora de prueba	Dos (2) horas de prueba	Tres (3) horas de prueba
1 1/4	0,06	0,10	0,16
1 1/2	0,07	0,10	0,17
2	0,07	0,11	0,19
3	0,10	0,15	0,25
4	0,13	0,25	0,40
5 3/8	0,19	0,38	0,58
5	0,21	0,41	0,62
6	0,30	0,60	0,90
7 1/8	0,40	0,70	1,00
8	0,50	1,00	1,50
10	0,80	1,30	2,10
12	1,10	2,30	3,40

13 3/8	1,20	2,50	3,70
14	1,40	2,80	4,20
16	1,70	3,30	5,00
18	2,00	4,30	6,50
20	2,80	5,50	8,00
22	3,50	7,00	1,05
24	4,50	8,90	13,30
26	5,00	10,00	15,00

Tabla 2.3 Fase de Prueba, Alternativa 2, Aporte de Agua de Reposición

Fuente: <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>

– Despresurización

En la conclusión de la prueba, se despresurizará cuidadosamente la sección de prueba con la liberación controlada de líquido de prueba. El líquido de prueba puede necesitar un drenaje reglamentario, de acuerdo a su composición química.

2.1.2.11.2 Prueba Neumática (Gas Comprimido a alta presión)

Para cualquier prueba de presión hasta el 150 % de la presión de diseño del sistema, la presión en la sección de prueba se debe incrementar gradualmente a no más de la mitad de la presión de prueba y, a continuación, aumentarla en incrementos pequeños hasta llegar a la presión de la prueba. Mantener la presión de prueba durante diez (10) a sesenta (60) minutos, reducir la presión de prueba a la presión de diseño de sistema y mantener la presión de diseño de sistema por el tiempo que sea necesario para determinar si existen fugas.

En la conclusión de la prueba, despresurizar la sección prueba, liberando de manera controlada el gas de la sección de prueba. Si un detector de fugas de gases se ha utilizado, debe enjuagarse con agua limpia.

2.1.2.12 Procedimiento de Baja Presión

Para aplicaciones con flujo por acción de la gravedad, de presión baja o intermitente como alcantarillado y control de los olores, se recomienda el procedimiento de pruebas en conformidad con la norma ASTM F 1417.

2.1.2.13 Sistemas que no son aptos para la realización de pruebas de presión

Algunos sistemas pueden no ser adecuados para las pruebas de pérdida de presión. Estos sistemas no son diseñados o destinados a la presión interna tales como los sistemas de vacío, o aquellos que contengan partes que no pueden ser aisladas.

Los sistemas que no son adecuados para las pruebas de pérdida de presión no deben ser probados, pero deben inspeccionarse cuidadosamente durante y después de la instalación. Se deben realizar inspecciones y otros chequeos relevantes, tales como examinar visualmente las juntas, chequeos mecánicos de los pernos y bridas de las juntas, etc.

2.1.3 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS A BOTELLAS DE EXTINTORES Y OTROS CONTENEDORES DE GASES

Primero el cilindro es sujeto a una inspección visual en donde se observa si al interior del cilindro existe alguna especie de hongo o contaminación como suciedad y en su exterior buscando deformidades, grietas por golpes, es decir se busca que el cilindro no haya estado expuesto a alguna fuerza externa que los afecte evidentemente.¹⁵

¹⁵ <http://www.asapchile.cl/index.php>



Fig. 2.2 Banco de pruebas hidrostáticas a botellas.

Fuente: <http://www.asapchile.cl/index.php>

Luego el cilindro sin su regulador es puesto en el banco de prueba, el cual se llena de agua hasta que la tapa del banco baje y quede cerrada con agua hasta su nivel cero, luego se llena el cilindro de agua y se eleva su presión alrededor del 150% de la capacidad indicada en el cilindro por el fabricante, aquí el agua desplazada por la expansión del cilindro, la cual es medida en centímetros cúbicos no puede sobrepasar lo establecido en la etiqueta del cilindro con la sigla REE (Rejection Elastic Expansion). Aquí es importante que el cilindro recobre su tamaño en un cierto tiempo (inferior al 5%).



Fig. 2.3 Esquema interno de la prueba hidrostática y medición del líquido desplazado.

Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrostatic_test

Las botellas de Aluminio no tienen una vida útil determinada (es decir establecida, como si lo tienen las de fibra de carbono) ya que su utilización terminará cuando una prueba hidrostática indique que el cilindro no da para más. Es decir, una botella de Aluminio puede durar 30 años si la prueba hidrostática da resultados positivos.

2.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

A continuación se detalla una serie de elementos necesarios en una prueba hidrostática.

- a) El módulo de pruebas con sus accesorios en buen estado.
- b) Registrador Grafico de presión electrónico o manual.
- c) Manómetros de diferentes escalas.



Fig. 2.4 Manómetros tipo bourdon de diferentes escalas.

Fuente: <http://www.sanfrancisco.olx.com.ar>

- d) Bomba de alta presión capaz de producir al menos 150 por ciento de la presión de prueba, e incluyen las válvulas de retención adecuado y accesorios de empalme. Debe de haber una conexión flexible para la conexión de la bomba de prueba y los accesorios necesarios.

Estas bombas pueden ser de varios tipos, ya sean de accionamiento manual o con algún tipo de motor, ya sea eléctrico o de combustión interna, según la necesidad. En las figuras 2.5 y 2.6, se muestran algunos tipos de bombas.

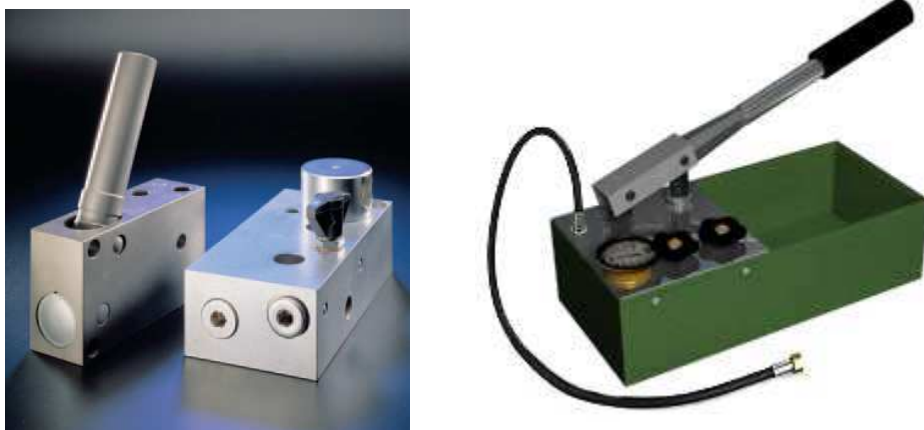


Fig. 2.5 Bombas tipo pistón de accionamiento manual de simple y doble efecto.

Fuente: http://www.osha.gov/SLTC/etools/evacuation/portable_hydro.html#1



Fig. 2.6 Bombas triplex (tipo pistón) de gran capacidad y alta presión, accionadas con motor eléctrico.

Fuente: www.catpumps.com

- e) Mangueras y tuberías necesarias para realizar las conexiones de llenado.
- f) Un filtro que garantice obtención de agua limpia para la prueba.
- g) Una bomba de inyección para inhibidores de corrosión y otros productos químicos, sí estos fueran necesarios.
- h) Un medidor para el volumen de llenado.
- i) Un termómetro de registro gráfico, para medir temperatura ambiente en las tuberías.
- j) Accesorios múltiples o temporales que se requieran. Y demás accesorios indispensables para la prueba.

2.2.1 PRODUCTOS QUÍMICOS Y ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

Existen aditivos, fluidos alternativos o desarrolladores de cambio de color que pueden mejorar la velocidad y la confiabilidad de las pruebas de pérdida de líquido. También pueden aumentar la sensibilidad de los resultados de las pruebas. El número entre paréntesis después de cada descripción del producto indica el párrafo del estándar ASTM E1003 con el que cumple ese producto.

a) Polvo Detector de Agua (PINPOINT WDP-217):

Esto es un desarrollador de cambio de color en aerosoles, que, cuando es rociado en los puntos de filtración sospechosos (articulaciones, soldaduras, conexiones), forma un polvo blanco. A través de capilaridad, ayuda a sacar el agua a través de filtraciones, extendiendo una indicación para hacerla más visible y, a continuación, ésta experimenta un cambio irreversible de color azul verdoso que indica el punto exacto de filtración. El revestimiento es no tóxico y fácilmente se puede eliminar con un paño húmedo. WDP-217 debe utilizarse sólo cuando la temperatura de la superficie es superior a la del punto de rocío o la humedad es lo suficientemente baja como para evitar la condensación que cause indicaciones falsas. (ASTM 9.3.2.1 visibility Enhancer). Dicho producto se muestra en la figura 2.7.



Fig. 2.7 Polvo detector de agua

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

b) Tintes Marcadores (RT-200 o FT175):

Estos marcadores son tintes líquidos concentrados, inmediatamente miscibles, que operan en el modo visible o fluorescente. Desarrollado para el estudio de sistemas de agua, estos marcadores son ideales para pruebas de grandes sistemas o tuberías. Ambas fórmulas son biodegradables. RT-200, mostrado en la figura 2.8, es diluido cuatro onzas a 500 galones y FT175 se puede diluir hasta una onza por 1000 litros. (ASTM 9.2.2.2 & 9.3.2.3 visibility Enhancers).



Fig. 2.8 Tinte marcador

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

c) Reductor de Tensión Superficial (IMMERSIT CIM150 & CIM200):

Éste concentrado, mostrado en la figura 2.9, cuando se agrega al agua, en la proporción del 5 % al 25 % disminuye enormemente la tensión superficial y la tensión interfacial, causando que un volumen mucho mayor de agua fluya a través de una pérdida. CIM-150 es biodegradable e inhibidor para prevenir herrumbre. CIM-150A tiene un inhibidor mucho más fuerte. CIM-200 tiene un rango más amplio de las temperaturas. (ASTM 10.3.3 baja resistencia de flujo).



Fig. 2.9 Reductor de tensión superficial

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

d) Marcador soluble en agua (FA-1A):

Este indicador líquido concentrado contiene inhibidores de corrosión, reductores de tensión superficial y polvos solubles en agua que secan en el exterior de una pérdida desarrollando el punto exacto de fuga, hasta mucho después de que el agua se evapore. FA-1A es amarillo fluorescente que es fácilmente visible sin una luz negra cuando éste seca. Éste concentrado debería ser diluido a relación de una parte a entre 25 a 50 partes de agua. (ASTM 9.3.4). Dicho producto se muestra en la figura 2.10.



Fig. 2.10 Marcador soluble en agua

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

e) F-trace (Concentrado):

Este indicador está disponible como un concentrado que debe ser diluido hasta un máximo de una parte a 1.000 de partes de agua o puede ser suministrado como un fluido listo para usar. Originalmente desarrollado para probar filtraciones en los tanques de combustible, es un biodegradable altamente fluorescente que baja la tensión superficial y que produce excelentes resultados. No es inhibidor para evitar la corrosión en acero al carbono. Tiene poco contenido de azufre y de halógeno para su uso en aceros inoxidable, aceros aleados de níquel y magnesio, así como en la mayoría de plásticos y aluminio. Para ver las indicaciones de la mayoría, se requerirá una luz negra, AGC parte # L102. (ASTM 9.3.4)



Fig. 2.11 Tinte indicador

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

f) Penetrante Fluorescente (FL50):

Este es un penetrante altamente fluorescente (MIL--25135 grupo VI +) lavable que se puede diluir hasta con un 30 % de agua para proporcionar un fluido de prueba muy sensible, fácilmente extraíble y de bajo costo. (ASTM 10.3.3 & 9.3.4)



Fig. 2.12 Penetrante fluorescente

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

g) Detector de fugas Ultrasónico (SONIC 3000):

Este detector puede rápida y fácilmente detectar fugas tan pequeñas como 1×10^{-2} cm^3/s . El SONIC 3000 puede utilizarse con aire a presión o con su generador de sonido como alternativa a la prueba hidrostática. Puede ser convenientemente usado como un “precheck” rápido antes que la prueba hidrostática sea realizada (ASTM 10 prueba previa).



Fig. 2.13 Detector ultrasónico

Fuente: <http://www.amgas.com/hydro.htm>

2.3 ERRORES COMUNES EN LA PRUEBA HIDROSTÁTICA

A continuación se detallan una serie de factores que pueden llevar a obtener una prueba hidrostática con errores de operación, datos inexactos e incluso con riesgo de accidentes.

El operario de una prueba hidrostática debe tener siempre en cuenta estos factores ya que una falla aparentemente mínima puede resultar en un riesgo potencial para sí mismo y para terceras personas.

En el transcurso de una prueba se pueden dar los siguientes casos:

- No verificar la hermeticidad del sistema de tuberías que inyecta agua a la tubería a probar, este caso puede provocar una caída de presión inesperada y obtener datos erróneos de la prueba.
- Otro error común viene a ser el no constatar la presencia de fugas en la sección a probar antes de llegar a la presión de prueba, este paso es fundamental si queremos proseguir con la prueba, ya que si existiesen fugas al llegar a altas presiones estas podrían conllevar a un evento de peligro. De igual manera se obtendrían datos erróneos de la prueba.
- Al momento de drenar el agua después de la prueba se debe liberar la presión paulatinamente por medio de la válvula de descarga, ya que una liberación brusca del agua desencadenaría una expulsión de presión violenta.
- El agua de prueba es otro factor, se debe usar agua cruda o agua tratada a la temperatura ambiente, limpia y libre de materia en suspensión. En ningún caso, la temperatura del agua debe ser inferior a 16°C y no mayor de 50°C. Cuando la temperatura ambiente sea menor a 0°C, se deben extremar precauciones debido a que se alcanza el punto de congelación del agua.
- En el caso de recipientes cuyo espesor de pared sea mayor a 50.8 mm (2 pulgadas), la temperatura de la pared metálica debe mantenerse 15°C por arriba de la temperatura mínima de diseño pero sin excederse de 50°C, lo anterior con objeto de minimizar los riesgos de fractura del material de construcción.

- El no filtrar el agua puede tener consecuencias desfavorables, por ejemplo, cuando se utilice agua de río o laguna, se deben tomar las precauciones para evitar que los microorganismos que pudieran contener, provoquen contaminación o favorezcan mecanismos de corrosión microbiológica.
- Se debe hacer la verificación de que el agua usada para realizar la prueba hidrostática no vaya a dañar los materiales con los que está construido el equipo; como en el caso de acero inoxidable austenítico en ambiente amargo, el fluido de prueba debe ser agua con un contenido máximo de cloruros de 50 ppm o mantenerlo dentro de los límites para aleaciones particulares, según se establece en la norma internacional ISO 15156.
- El no realizar una limpieza previa de la tubería en su parte interna puede provocar que haya incrustaciones en los sellos y provocar fugas, y al mismo tiempo brindar datos incorrectos.
- Al momento de reemplazar pernos, tuercas u otros elementos del equipo de pruebas, se debe verificar que sean de las mismas propiedades que los de diseño, esto para evitar deformaciones y posibles accidentes.
- Todas las conexiones que no estén incluidas en el circuito de pruebas, se deben desconectar o aislar, incluyendo las válvulas de seguridad en caso de que estén presentes en el circuito a probar.
- La tubería, equipo o componentes del circuito a probar se debe llenar con agua, sin dañar los elementos internos de los equipos. Para recipientes a presión, la presión se debe ir incrementando paulatinamente al menos en tres etapas del valor de presión de prueba cuando esta se realiza para propósitos de autorización de funcionamiento del recipiente, correspondientes al 33%, 66% y 100% conforme a la NOM-020-STPS.
- Para el caso del equipo a probar, debe ser presionado gradual y constantemente, regulando el gasto de la bomba para minimizar variaciones de presión, las mismas que deben ser monitoreadas y registradas, cuando menos en un manómetro oficial y el registrador correspondiente que debe estar cerca del operador de la bomba para verificar y controlar la presión a la que se está realizando la prueba según lo establece el estándar ASTM E1003 o equivalente.

- Otro error consiste en no eliminar por completo el aire restante en el interior de la tubería, esto se logra desalojándolo por los puntos más altos del circuito e incrementando la presión lentamente para evitar aumentos súbitos.
- Asimismo, el manómetro oficial para indicar localmente la presión interna, debe estar recientemente calibrado y contar con el certificado de dicha calibración cuya antigüedad no debe ser mayor a 30 días antes del inicio de la prueba, además de estar siempre visible para el operador del sistema de bombeo. El rango del manómetro debe tener como mínimo 1.5 y máximo 4 veces la presión de prueba.
- El control de presión de prueba debe ejercerse en la descarga de la bomba, mediante una válvula de seguridad que impida sobre-presionar el sistema de tal forma que se eleve la presión por arriba del punto de ajuste del control, para el efecto pueden ser usadas bombas manuales de desplazamiento positivo o de cualquier otro tipo que facilite la realización de la prueba hidrostática.
- Otro motivo de riesgo implica el querer realizar ajustes o correcciones al momento en que el sistema se encuentra presurizado, cualquier movimiento inapropiado puede provocar una liberación de presión brusca. Para estos casos se debe despresurizar el sistema y hacer las correcciones pertinentes.
- El subestimar los valores de presión pre-calculados para la prueba podrían conllevar a una falla potencialmente peligrosa.

2.4 NORMAS Y ESTÁNDARES

A continuación se presentará una serie de lineamientos internacionales llamados normas o estándares, los cuales rigen cualquier procedimiento en el cual esté involucrado el tratamiento a las tuberías de acero, tanto en su manufactura como en su prueba hidrostática después de algún tiempo que haya estado en servicio. Existen las normas ASTM, ANSI y ASME, entre las más conocidas.

2.4.1 ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR DE REQUISITOS GENERALES PARA TUBOS DE GRAFITO Y ACEROS ALEADOS AUSTENÍTICOS Y FERRÍTICOS, SEGÚN NORMAS ASTM.

Esta norma está publicada bajo la denominación fija ASTM A450/ A 450M; el número que sigue inmediatamente a la designación indica el año de la edición original o, en caso de revisión, el año de la última actualización. Un número entre paréntesis indica el año de la última re-aprobación. Una letra épsilon (ϵ) sobrescrita indica un cambio editorial desde la última revisión o re-aprobación.

2.4.1.1 Alcance

Esta especificación cubre un grupo de requisitos, los cuales son requisitos obligatorios para las especificaciones ASTM de los siguientes productos tubulares:

Título de la Especificación	Designación ASTM
Tubos para Destilación sin Costura en Acero de Bajo Carbono y en Carbono-Molibdeno para Uso en Refinerías	A 161
Tubos para Caldera en Acero al Carbono y Acero al Carbono-Manganeso Soldados por Resistencia Eléctrica	A 178/A 178M
Tubos sin Costura Trefilados en Frío en Acero de Bajo Carbono para Intercambiadores de Calor y Condensadores	A 179/A 179M
Tubos para Calderas en Acero al Carbono sin Costura para Servicio de Alta Presión	A 192/A 192M
Tubos sin Costura Trefilados en Frío para Intercambiadores de Calor y Condensadores en Acero de Aleación Intermedia	A 199/A 199M
Tubos para Destilación sin Costura en Acero de Aleación Intermedia para Uso en Refinerías	A 200
Tubos sin Costura para Calderas y Sobrecalentadores en Acero al Carbono-Molibdeno	A 209/A 209M
Tubos sin Costura para Calderas y Sobrecalentadores en Acero de Mediano Carbono	A 210/A 210M

Tubos sin Costura para Calderas, Sobrecalentadores e Intercambiadores de Calor en Aceros Aleados Ferríticos y Austeníticos	A 213/A 213M
Tubos en Acero al Carbono Soldados por Resistencia Eléctrica para Intercambiadores de Calor y Condensadores	A 214/A 214M
Tubos en Acero al Carbono Soldados por Resistencia Eléctrica para Servicio de Alta Presión	A 226/A 226M
Tubos Soldados en Acero Austenítico para Calderas, Sobrecalentadores, Intercambiadores de Calor y Condensadores	A 249/A 249M
Tubos Soldados por Resistencia Eléctrica para Calderas y Sobrecalentadores en Aceros Aleados Ferríticos	A 250/A 250M
Tubos Soldados y sin Costura en Acero Inoxidable Ferrítico y Martensítico para Servicio General	A 268/A 268M
Tubos Soldados y sin Costura en Acero Inoxidable Austenítico para Servicio General	A 269
Tubos Sanitarios Soldados y sin Costura en Acero Inoxidable Austenítico	A 270
Tubos para Destilación sin Costura en Acero Austenítico al Cromo-Níquel para Uso en Refinerías	A 271
Tubos Soldados y sin Costura en Grafito y Aceros Aleados para Servicio a Baja Temperatura	A 334/A 334M
Tubos sin Costura y Soldados Eléctricamente en Aceros de Baja Aleación	A 423/A 423M
Tubería Enrollada Soldada Eléctricamente para Líneas de Gas y Fuel Oil	A 539
Tubos sin Costura Trefilados en Frío en Acero al Carbono para Calentadores de Agua de Alimentación	A 556/A 556M
Tubos soldados eléctricamente en Acero al Carbono para Calentadores de Agua de Alimentación	A 557/A 557M
Tubos soldados en Acero Inoxidable Austenítico para Calentadores de Agua de Alimentación	A 688/A 688M
Tubos sin Costura en Acero de Aleación de Carbono-Molibdeno de Mediana Resistencia Para Calderas y Sobrecalentadores	A 692

Tubería en Acero Inoxidable Austenítico para Componentes del Núcleo de Reactores Regenerativos	A 771
Tubería Soldada y Sin Costura en Acero Inoxidable Ferrítico/Austenítico para Servicio General	A 789/A 789M
Tubería Soldada no Recocida en Acero Inoxidable Ferrítico	A 791/A 791M
Tubería de Acero al Carbono sin Costura, Trefilada en Frío para Servicio en Sistemas Hidráulicos	A 822
Tubos de Conducción en Acero Inoxidable Austenítico y Ferrítico para Componentes del Núcleo de Reactores Regenerativos	A 826
Tubos de Acero Austenítico no Recocido Soldados por Inducción de Alta Frecuencia	A 851

Tabla 2.4 Tubos que son cubiertos por norma ASTM

Fuente: ASTM A 450. Especificación Estándar de Requisitos Generales para Tubos de Grafito y Aceros Aleados Austeníticos y Ferríticos.

En caso de conflicto entre un requisito de la especificación del producto y un requisito de esta especificación general, sólo el requisito de la especificación del producto necesita ser satisfecha.

Los valores declarados en el sistema de unidades pulgada-libra, o en el Sistema Internacional, deben ser considerados como una norma separada. Dentro del texto, las unidades del SI se muestran entre paréntesis. Los valores declarados en cada sistema no son exactamente equivalentes; por lo tanto deben ser usados independientemente uno del otro. Combinar valores de los dos sistemas puede resultar en una no-conformidad con la especificación. Las unidades pulgada-libra se aplicarán a menos que la designación "M" (SI) de la especificación del producto sea especificada en la orden.

2.4.1.2 Documentos de Referencia

2.4.1.2.1 Normas ASTM

- A 370 Métodos de Prueba y Definiciones para el Ensayo Mecánico de Productos de Acero.
- A 530/A 530M Especificación de Requisitos Generales para Caños Especiales de Grafito y Aleaciones de Acero.
- A 700 Procedimientos para Métodos de Embalaje, Marcado y Carga de Productos de Acero para Cargamento Nacional.
- A 751 Métodos de Prueba, Procedimientos y Terminología para Análisis Químico de Productos de Acero
- D3951 Procedimiento para el Embalaje Comercial
- E 92 Método de Prueba para Dureza Vickers de Materiales Metálicos
- E 213 Procedimiento para Examen Ultrasónico de Tuberías y Caños Metálicos
- E 273 Procedimiento para Examen Ultrasónico de Tuberías y Caños Soldados Longitudinalmente
- E 309 Procedimiento para Examen de Productos Tubulares de Acero Mediante Corriente Eddy Utilizando Saturación Magnética
- E 426 Procedimiento para Examen de Productos Tubulares Soldados y sin Costura, de Acero Inoxidable y Aleaciones Similares Mediante Prueba Electromagnética (Corriente Eddy)
- E 570 Procedimiento de Examen por Pérdida de Flujo de Productos Tubulares de Acero Ferromagnético

2.4.1.3 Proceso de manufactura de una tubería

El proceso de manufactura de una tubería de acero tiene varios requerimientos, dependiendo de la norma que califique su aprobación. Según esta norma (ASTM A 450), existen varias exigencias según su método de fabricación:

- Sin costura, terminados en frío

- Sin costura, terminados en caliente.

Una de dichas exigencias se puede apreciar en la tabla 2.5, la cual nos muestra la variación de espesor de pared en porcentajes para varios tubos, según su tipo de construcción.

Diámetro Externo, pulgadas [mm]	Espesor de Pared, %							
	0.095 [2.4] y menos	más de 0.095 hasta 0.150 [2.4 a 3.8], incl.	Más de 0.150 hasta 0.180 [3.8 a 4.6], incl.	más de 0.180 [4.6]				
	más os	Men más os	men más os	más os	men más os	más os	men os	
Tubos sin costura, terminados en caliente								
4 [101.6] y menos más de 4 [101.6]	40 ...	0 ...	35 35	0 0	33 33	0 0	28 28	0 0
Tubos sin costura, terminados en frío								
	más				menos			
1½ [38.1] y menos más de 1½ [38.1]	20 22				0 0			
Tubos soldados								
todos los tamaños	18				0			

Tabla 2.5 Variaciones Permisibles en Espesor de Pared^A

Fuente: ASTM A 450. Especificación Estándar de Requisitos Generales para Tubos de Grafito y Aceros Aleados Austeníticos y Ferríticos.

^A Estas variaciones permisibles en espesor de pared se aplican sólo a tubos, excepto tubos acortados internamente, tales como rolados o terminados en frío, y antes del estampado, expandido, doblado, pulido u otras operaciones de fabricación.

2.4.1.4 Ensayo hidrostático post manufactura

Según esta norma (ASTM A 450), al momento de culminar su manufactura, cada tubo será ensayado por el fabricante a una presión de prueba hidrostática mínima determinada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Unidades Pulgada-Libra: } P &= 32000 \text{ t / D} \\ \text{Unidades SI: } P &= 220.6 \text{ t / D} \quad \mathbf{(2.3)} \end{aligned}$$

Donde:

P = Presión hidrostática de prueba, psi o Mpa,

t = espesor de pared especificada, pulgadas o mm, y

D = Diámetro externo especificado, pulgadas o mm.

La presión del ensayo hidrostático determinada por la ecuación 2.3 se redondeará a los 50 psi [0.5 MPa] más cercanos, para presiones menores a 1000 psi [7 MPa], y a los 100 psi [1 MPa] más cercanos para presiones mayores o iguales a 1000 psi [7 MPa]. El ensayo hidrostático se debe realizar antes del corte a la longitud final, o antes del recorte, estampado, expandido, doblado u otra operación de moldeado, o ambas.

Las presiones de prueba mostradas en la tabla 2.6, son establecidas según los espesores de pared indicados en la tabla 2.5 de esta norma.

Diámetro Externo del Tubo, pulg. [mm]	Presión de Prueba Hidrostática, psi [MPa]
menos de 1 [25.4]	1.000 [7]
1 a 1½ [25.4 a 38.1], excl.	1.500 [10]
1½ a 2 [38.1 a 50.8], excl.	2.000 [14]
2 a 3 [50.8 a 76.2], excl.	2.500 [17]
3 a 5 [76.2 a 127], excl.	3.500 [24]
5 [127] y más	4.500 [31]

Tabla 2.6 Presiones de la Prueba Hidrostática

Fuente: ASTM A 450. Especificación Estándar de Requisitos Generales para Tubos de Grafito y Aceros Aleados Austeníticos y Ferríticos.

A pesar de la determinación hecha por la ecuación 2.3, la mínima presión hidrostática de prueba requerida para satisfacer estos requisitos no necesita exceder los valores dados en la Tabla 2.6. Esto no prohíbe el ensayo a más altas presiones, de acuerdo con la opción del fabricante.

De acuerdo con el fabricante, se puede establecer un mínimo valor de presión de prueba en exceso de lo requerido en los párrafos anteriores. La presión de prueba se determinará en base a varias normas, entre ellas la API 5L, la cual establece que:

$$P = \frac{2St}{D} \quad (2.4)$$

Fuente: ASTM A 450. Especificación Estándar de Requisitos Generales para Tubos de Grafito y Aceros Aleados Austeníticos y Ferríticos.

Donde:

P = presión de prueba en psi ó KPa.

S = esfuerzo de la fibra del tubo, psi o MPa, que es igual a un porcentaje del esfuerzo de fluencia.

t = espesor de pared especificada, pulgadas o mm, y

D = Diámetro externo especificado, pulgadas o mm.

Además menciona que:

- La presión de prueba se mantendrá un mínimo de 5 segundos.
- Si cualquier tubo mostrara pérdidas durante el ensayo hidrostático, será rechazado.
- El ensayo hidrostático puede no ser capaz de probar la porción final de la cañería. Los tramos de tubería que no serán probados se determinarán por el fabricante y, cuando se lo especifique en la orden de compra, informados al comprador.

2.4.2 ANSI B16.5 RANGOS MÁXIMOS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA PARA TUBERÍAS DE ACERO Y ACCESORIOS.¹⁶

Según esta norma y la tabla 2.7, tenemos que la presión de prueba hidrostática de una tubería estará regida de acuerdo a la presión de trabajo y de la temperatura a la que opera. Por ejemplo, una tubería cuya presión de trabajo es de 300 psi y opera a una temperatura de 400 °F, tendrá que someterse a una presión de prueba hidrostática de 635 psi.

Máxima Presión Permisible (<i>psi</i>)							
Temperatura (<i>°F</i>)	Presión de trabajo (<i>lb</i>)						
	150	300	400	600	900	1500	2500
	Presión de Prueba Hidrostática (<i>psi</i>)						
	450	1125	1500	2225	3350	5575	9275
-20 a 100	285	740	990	1480	2220	3705	6170
200	260	675	900	1350	2025	3375	5625
300	230	655	875	1315	1970	3280	5470
400	200	635	845	1270	1900	3170	5280
500	170	600	800	1200	1795	2995	4990
600	140	550	730	1095	1640	2735	4560
650	125	535	715	1075	1610	2685	4475
700	110	535	710	1065	1600	2665	4440
750	95	505	670	1010	1510	2520	4200
800	80	410	550	825	1235	2060	3430
850	65	270	355	535	805	1340	2230
900	50	170	230	345	515	860	1430
950	35	105	140	205	310	515	860

¹⁶ http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-flanges-pressure-temperature-d_342.html

1000	20	50	70	105	155	260	430
------	----	----	----	-----	-----	-----	-----

Tabla 2.7 Presiones y temperaturas según ANSI B 16.5

Fuente: http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-flanges-pressure-temperature-d_342.html

Además se puede concluir que a medida que la temperatura de operación aumenta, la prueba hidrostática tendrá que realizarse a presiones cada vez más bajas, en concordancia con la tabla 2.1, la cual muestra un multiplicador de la presión cuando la temperatura aumenta.

2.4.3 ASTM A53 B MÁXIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO AL CARBÓN A UNA TEMPERATURA DE 400 °F

La tabla 2.8 indica las máximas presiones de trabajo de las tuberías de acero al carbón construidas de acuerdo a ASME/ANSI B36.1 y ASTM A53 B.¹⁷

Tuberías de acero al carbón – Presión de trabajo							
Medida Nominal (in)	Diámetro externo de la tubería OD (in)	Cédula o peso	Espesor de pared - t - (in)	Diámetro interno - d - (in)	Presión de trabajo ASTM A53 B a 400°F		
					Proceso de manufactura	Tipo de junta	Psi
¼	0.540	40ST	0.088	0.364	CW ¹⁾	T	188
		80XS	0.119	0.302	CW	T	871
3/8	0.675	40ST	0.091	0.493	CW	T	203
		80XS	0.126	0.423	CW	T	820
½	0.840	40ST	0.109	0.622	CW	T	214
		80XS	0.147	0.546	CW	T	753
¾	1.050	40ST	0.113	0.824	CW	T	217
		80XS	0.154	0.742	CW	T	681
1	1.315	40ST	0.133	1.049	CW	T	226
		80XS	0.179	0.957	CW	T	642
1 1/4	1.660	40ST	0.140	1.380	CW	T	229
		80XS	0.191	1.278	CW	T	594
1 1/2	1.900	40ST	0.145	1.610	CW	T	231
		80XS	0.200	1.500	CW	T	576
2	2.375	40ST	0.154	2.067	CW	T	230
		80XS	0.218	1.939	CW	T	551

¹⁷ http://www.engineeringtoolbox.com/astm-steel-pipes-working-pressure-d_775.html

2 1/2	2.875	40ST	0.203	2.469	CW	W	533
		80XS	0.276	2.323	CW	W	835
3	3.500	40ST	0.216	3.068	CW	W	482
		80XS	0.300	2.900	CW	W	767
4	4.500	40ST	0.237	4.026	CW	W	430
		80XS	0.337	3.826	CW	W	695
6	6.625	40ST	0.280	6.065	ERW ²⁾	W	696
		80XS	0.432	5.761	ERW	W	1209
8	8.625	30	0.277	8.071	ERW	W	526
		40ST	0.322	7.981	ERW	W	643
		80XS	0.500	7.625	ERW	W	1106
10	10.75	30	0.307	10.136	ERW	W	485
		40ST	0.365	10.020	ERW	W	606
		XS	0.500	9.750	ERW	W	887
		80	0.593	9.564	ERW	W	1081
12	12.75	30	0.330	12.090	ERW	W	449
		ST	0.375	12.000	ERW	W	528
		40	0.406	11.938	ERW	W	583
		XS	0.500	11.750	ERW	W	748
		80	0.687	11.376	ERW	W	1076
14	14.00	30ST	0.375	13.250	ERW	W	481
		40	0.437	13.126	ERW	W	580
		XS	0.500	13.000	ERW	W	681
		80	0.750	12.500	ERW	W	1081
16	16.00	30ST	0.375	15.250	ERW	W	421
		40XS	0.500	15.000	ERW	W	596
18	18.00	ST	0.375	17.250	ERW	W	374
		30	0.437	17.126	ERW	W	451
		XS	0.500	17.000	ERW	W	530
		40	0.562	16.876	ERW	W	607
20	20.00	20ST	0.375	19.250	ERW	W	337
		30XS	0.500	19.000	ERW	W	477
		40	0.593	18.814	ERW	W	581

Tabla 2.8 Presiones máximas de trabajo según ASTM A53 B a 400F

Fuente: http://www.engineeringtoolbox.com/astm-steel-pipes-working-pressure-d_775.html

¹⁾ CW – (Continuous Weld) – un método de producción de tuberías de diámetro pequeño (1/2-4")

²⁾ ERW – (Electric Resistance Weld) – la forma más común de construir tuberías en diámetros de 2 3/8 a 22" OD

– 1 in = 25.4 mm

– 1 psi (lb/in²) = 6,894.8 Pa (N/m²) = 6.895x10⁻² bar

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DEL EQUIPO

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO

El presente proyecto tiene como objetivo principal la construcción de un módulo o banco de pruebas hidrostáticas para tuberías metálicas con una presión de diseño de 800 psi, dichas tuberías se restringen a un rango de diámetro nominal entre 4 y 10 pulgadas, además de una longitud de hasta 1,20 metros. Cabe aclarar que la finalidad principal del módulo es verificar la resistencia mecánica del material de composición de las tuberías y no realizar pruebas de fuga en sistemas armados como comúnmente se realizan este tipo de pruebas en tuberías.

Éste banco de pruebas consta de varios elementos, todos ellos previamente dimensionados y montados para resistir la presión indicada (800 psi), con un margen de sobrepresión del 20%.

Los principales componentes se nombran a continuación:

- Vigas de soporte principal (cuerpo del módulo)
- Cauchos selladores
- Gato hidráulico
- Bomba de alta presión
- Sistema de alimentación de agua

Este banco de pruebas hidrostáticas tiene una gran similitud a una prensa hidráulica, ya que utiliza un gato hidráulico para sellar el sistema, y su estructura principal está diseñada de forma vertical.

3.1.1 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

A continuación se describirá paso a paso la construcción y montaje del módulo:

3.1.1.1 Corte de las vigas de la estructura principal.

Después de los cálculos de dimensionamiento, seleccionada su forma y realizada su compra, se procede a realizar los primeros cortes de la viga con un rango de tolerancia adecuado para posteriores correcciones.

El método de corte utilizado fue por el proceso de corte por plasma, que consiste en cortar el material con una máquina que combina un arco eléctrico de corriente continua y aire a gran presión con la capacidad de realizar cortes en casi cualquier tipo de metal con gran facilidad. Tiene una capacidad de corte de hasta ½ pulgada (13mm) de espesor.

La máquina utilizada, mostrada en la figura 3.1, pertenece al laboratorio de soldadura de la E.P.N.

Además en la figura 3.2 se puede apreciar algunos datos de placa como voltaje, corriente, factor de servicio y presión de aire.

Este tipo de operación no requiere de mayor protección personal aparte de gafas, guantes y un mandil apropiado.

Para proceder al corte primeramente se deben realizar las mediciones adecuadas con rango de tolerancia de ± 3 mm, ya que este es aproximadamente el espesor de material fundido que se pierde en este procedimiento. Para marcar las líneas de corte basta una tiza común y una escuadra de cerrajería.



Fig. 3.1 Cortadora de plasma de DC marca "Miller"

A black specification plate with white text. At the top left is a symbol consisting of a circle with a right-pointing arrow. To its right is the text "RATED OUTPUT". Below this are five rows of specifications, each with a label on the left and a value on the right.

AMPERES	120
AMPERES	70
DUTY CYCLE	60%
MAX. OCV	270
AIR PRESSURE	64 PSI

Fig. 3.2 Datos de placa de cortadora de plasma



Fig. 3.3 Proceso de corte con plasma

3.1.1.2 Corrección y ajuste de dimensiones de las columnas y vigas con amoladora y limado manual

Después del corte con plasma, se trasladó el material hacia el taller de soldadura de tecnólogos para proseguir con la construcción del módulo.

Este proceso consistió en trazar en las vigas las medidas reales de diseño y así reducir el material excedente dejado por el corte con plasma. Para aquello se recurrió al uso de una amoladora de 670 W, con disco abrasivo de acero.

Al llegar a un espesor prudente con la ayuda de la amoladora, se procedió a llegar a las dimensiones nominales por medio del proceso de limado manual, con ayuda de escuadras y calibradores.

Las dimensiones de las dos columnas principales son de 1.75 m de altura, 60 cm para la viga horizontal superior, y 50 cm para la viga horizontal inferior.

3.1.1.3 Perforación de vigas y columnas

3.1.1.3.1 Para las columnas

Según lo diseñado, las perforaciones en las columnas tipo “C”, tienen el objetivo de permitir una regulación vertical, tanto para la bancada móvil que sostiene el gato hidráulico, como para la mesa de soporte del caucho sellador inferior, todo esto según la longitud de la tubería a probarse hidrostáticamente.

Estas perforaciones tienen un diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulgada, ubicándose a una separación de 10 cm entre ellas, con el fin de tener una mayor flexibilidad en la regulación vertical.

En total se realizaron 36 perforaciones en las dos columnas, distribuyéndose 18 en cada columna, es decir 9 en cada perfil de la misma, debido a su forma tipo “C”.

Previo al proceso de perforación se realizaron operaciones como el trazado y el graneteado que son fundamentales para permitir un buen direccionamiento de la broca a usarse.

Para la realización de estas perforaciones se utilizó un taladro de pedestal con motor trifásico de 2 HP, disponible en el taller de soldadura de tecnólogos, como se indica en la figura 3.4.



Fig. 3.4 Perforación de columnas verticales

3.1.1.3.2 Para la viga horizontal superior

El objetivo de perforar la viga superior es de permitir el paso de una tubería de $\frac{1}{2}$ pulgada por donde ingresará el agua para pruebas, dicha tubería es parte del conjunto vulcanizado de la tapa superior.

Además se realizarán dos perforaciones más para permitir la sujeción del caucho o tapa superior. Dicha sujeción será por medio de pernos que atraviesan la viga. En total se realizarán 3 perforaciones en esta viga, como se muestra en la figura 3.5.



Fig. 3.5 Perforación de la viga superior

3.1.1.4 Elaboración de un soporte para gato hidráulico

El objetivo de construir este soporte es de brindar al gato hidráulico una mayor estabilidad en la bancada móvil.

Durante la realización de una prueba hidrostática se pueden producir pandeos y por lo tanto un posible desplazamiento del gato hidráulico que conllevaría a tener un accidente. He aquí la importancia de este soporte.

El medio de anclaje del soporte a la bancada es por medio de 3 pernos de 5/16 de pulgada, que a su vez facilitan el desmontaje del gato hidráulico.

Dicha base se puede apreciar en la figura 3.6.

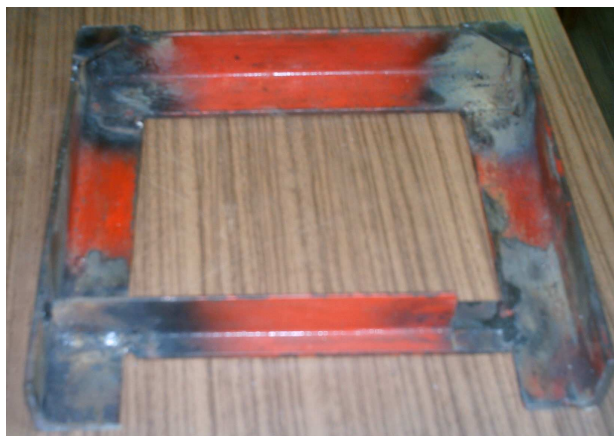


Fig. 3.6 Soporte para gato hidráulico

3.1.1.5 Elaboración de pasadores para guías verticales

Para sostener el conjunto de la bancada móvil y la mesa de soporte del caucho inferior a través de las guías verticales perforadas, es necesaria la construcción de un total de cuatro pasadores de acero con un diámetro de 18 mm.

La longitud varía en cada par; para el sustento de la bancada móvil se necesita un par de pasadores de un mínimo de 20 cm, mientras tanto que para la mesa de soporte del caucho, se necesita un par de por lo menos 30 cm de longitud.

Para la realización de estos pasadores fue necesario el empleo de un torno paralelo, disponible en el taller de soldadura de tecnólogos como se indica en la figura 3.7.



Fig. 3.7 Construcción de pasadores

3.1.1.6 Construcción de la mesa de soporte para caucho sellador inferior

Debido a que el gato hidráulico ejerce una fuerza aproximada de 30 t sobre el caucho sellador y a su vez sobre la tubería a ser probada, ha sido necesaria la elaboración de una plataforma que sirva de apoyo al caucho y evitar que éste se deteriore prematuramente.

Esta mesa ha sido diseñada de tal manera que pueda moverse de manera uniforme a través de la guía vertical por medio del empuje del gato hidráulico, además que ofrece buena sujeción al caucho por medio de uniones empernadas, como se da en el caucho superior.

Las dimensiones de la mesa son de 30 x 60 x 0.3 cm, con cortes a los costados para la guía vertical de 11 x 5.5 cm y 2 perforaciones de $\frac{1}{4}$ de pulgada para los pernos del caucho como se indica en la figura 3.8.

Para la construcción de esta mesa fue necesaria la utilización de la amoladora con un disco de corte para acero. Previamente se realizaron los pasos de trazado y graneteado para los agujeros.



Fig. 3.8 Mesa de soporte para caucho inferior

3.1.1.7 Soldadura de bancada móvil.

La construcción de esta bancada consiste en la unión de dos vigas de 60 cm de longitud, a través de dos platinas de acero de 11 cm de largo, que dejan una separación entre las vigas suficiente para desplazarse por las guías verticales.

Esta bancada es el apoyo del gato hidráulico, por lo tanto su buena construcción es muy importante, sobre todo en las uniones soldadas que son los puntos en donde existe gran tensión.

Tanto para la soldadura de la bancada y del módulo en general, utilizamos dos electrodos diferentes, cuyas características se indican en la tabla 3.1, siendo el primero en utilizarse el E 6010 ($\frac{1}{8}$ "), debido a sus propiedades de penetración y a continuación se realizan dos cordones de respaldo con el electrodo E 7018 ($\frac{1}{8}$ ").

El amperaje utilizado según el espesor de la viga será siempre alrededor de los 100 A, con la utilización de Corriente Continua positiva o DC+. Este tipo de polaridad nos ayuda a la limpieza iónica del metal base, es decir a la destrucción de óxidos depositados en el metal base, además de ser ésta la recomendación del fabricante.

Electrodo	Propiedades		
		Resistencia a la tracción (psi)	Punto de fluencia (psi)
E 6010	penetración	72.500	64.000
E 7018	acabado y refuerzo	73.000	63.390

Tabla 3.1 Propiedades de los electrodos utilizados

Fuente: http://cad-cae.com/PDF_CAD_CAE/Soldadura.pdf

Al iniciar el proceso de soldar una estructura es común que con la primera unión el resto de la estructura tienda a deformarse, es por esto necesario tener a la estructura sujeta con prensas y aplicar la técnica de soldeo en diagonal, logrando así contrarrestar éste fenómeno, como se indica en la figura 3.9.

Es necesario también que la superficie donde se soldará la estructura se encuentre nivelada, si no es así, se recurrirá a la colocación de alzas o apoyos para lograr este fin. Siempre se debe contar con un nivel de burbuja para verificar la correcta posición de la estructura a soldar, en este caso la bancada móvil.



Fig. 3.9 Bancada móvil sujeta con prensas previo a la soldadura



Fig. 3.10 Bancada móvil soldada con electrodo E 6010



Fig. 3.11 Bancada móvil soldada con electrodo E 7018

En las figuras 3.10 y 3.11 se puede apreciar la diferencia entre los cordones realizados con los dos tipos de electrodos mostrados en la tabla 3.1.

3.1.1.8 Soldadura del módulo o estructura principal

El montaje o soldadura de éste módulo consiste en la unión de las cuatro vigas cortadas anteriormente por plasma, teniendo las dos columnas de 175 cm, una viga de 60 cm y una de 50 cm, según el plano de diseño. Éstas formarán un rectángulo como se muestra en la figura 3.12.

Esta estructura es la parte principal del conjunto, por lo tanto es la que va a resistir altos esfuerzos en varios puntos, pero principalmente en las dos columnas verticales, ya que estas serán las que resistan la fuerza de tracción calculada en el subtítulo 3.4.

La soldadura de estas cuatro vigas es vital, ya que unos cordones defectuosos provocarían la rotura inmediata en medio de una prueba hidrostática.

Al igual que en la bancada móvil, para la soldadura de ésta estructura utilizaremos los dos tipos de electrodos especificados en la tabla 3.1. Además se utilizará el mismo orden de uso, los mismos amperajes y el mismo tipo de corriente especificados anteriormente por las mismas razones y necesidades.

En vista de que necesitamos una unión perfecta en cada esquina del módulo procederemos a soldar en todos los rincones que nos sea posible, siempre con la misma técnica y electrodos mencionados. Uno de los cordones de refuerzo, es decir el realizado con E 7018, se puede apreciar en la figura 3.13.

Con el fin de evitar el fenómeno de contracción de la estructura cuando se realiza la primera unión, se aplicará la técnica de soldeo en diagonal con un punto de soldadura leve en cada esquina y aplicando un peso considerable sobre la estructura. Antes de continuar con el proceso, se verificará nuevamente con una escuadra que la estructura no se ha deformado y se procederá a hacer los cordones con E 6010 y E 7018 como se explicó anteriormente.

Para sostener esta estructura de pie se han soldado un par de perfiles metálicos en los costados de las vigas principales, estos perfiles en realidad no soportarán un esfuerzo considerable durante una prueba hidrostática, por lo tanto no fue necesario un cálculo exhaustivo para su selección.



Fig. 3.12 Estructura principal previo a la soldadura



Fig. 3.13 Soldadura de refuerzo con electrodo E 7018



Fig. 3.14 Módulo con perfiles de soporte soldados

3.1.1.9 Pintura del módulo y sus elementos

Para conseguir que el equipo construido tenga una mayor vida útil y un mejor aspecto, es necesario aplicarle una serie de productos que ayudarán a conservarlo.

Para esto tenemos que para evitar su corrosión prematura tanto en el cuerpo de la viga como en las uniones soldadas. Aplicaremos una o dos capas de fondo antioxidante con un soplete. Posteriormente se aplicarán varias capas de pintura anticorrosiva del color que se crea conveniente como se muestra en la figura 3.15. Esto también con la ayuda de un soplete y un compresor (figuras 3.16 y 3.17).

En este caso se ha decidido pintar el cuerpo del módulo y sus partes móviles de distinto color para así poder distinguirlas fácilmente. Se optó por un color anaranjado para la estructura y por un color negro para la bancada móvil y la mesa de soporte del caucho. En el caso del gato hidráulico éste viene de color rojo.



Fig. 3.15 Módulo en fase de pintura



Fig. 3.16 Mesa de soporte en fase de pintura



Fig. 3.17 Bancada móvil en fase de pintura

3.2 DIMENSIONAMIENTO DE CAUCHOS SELLADORES

El criterio de selección de los cauchos se basa en su forma, estructura, dureza, costo, entre otros parámetros.

En cuanto a la forma se consideraron varias opciones de construcción. Una de ellas fue el elaborar unos cauchos en forma de cono truncado, lo cual resultaba ser ideal debido a que se logra una mejor hermeticidad a medida que aumenta la fuerza que ejerce el gato hidráulico en el sistema.

Las limitaciones de este tipo de caucho fueron sus características de construcción y su costo. Para elaborar este conjunto de cauchos se necesitaba realizar un molde que sirva para dar la forma indicada, este molde tenía que salir de una pieza sólida de acero, por lo tanto al dejarla hueca se desperdiciaba demasiado material, además que sus dimensiones eran considerables. Otro factor fue que si se optaba por este tipo de cauchos se tenían que elaborar dos pares de los mismos con el fin de abarcar todos los rangos de diámetro de tubería a probar.

En una segunda opción se optaba por la vulcanización de un conjunto de discos de acero con resortes y pernos soldados en ellos. Su costo era más razonable y

cubría las necesidades de presión de prueba. En este caso sólo se necesitaría un par de este conjunto ya que serviría para todos los diámetros de tubería a probar.

Como se puede observar en las figuras 3.18 y 3.19, el conjunto de acero cumple la función de soportar la presión y las fuerzas ejercidas durante la prueba con ayuda de los resortes, los cuales no permitirán que el caucho se comprima demasiado.



Fig. 3.18 Estructura interna de uno de los cauchos selladores

Los pernos vulcanizados ayudarán a que se obtenga una mayor estabilidad al momento de presurizar el sistema.



Fig. 3.19 Estructura interna de los cauchos selladores en despiece

En el centro de la estructura de acero del caucho superior se ha perforado un orificio con el fin de montar tubería de hierro galvanizado de $\frac{1}{2}$ pulgada, sujeta con soldadura para impedir fugas de agua entre estos elementos. El disco de acero a su vez cumplirá con la función de brindar más resistencia interna y así evitar que el caucho vulcanizado se rompa debido al esfuerzo sometido.

Para la vulcanización se optó por usar un caucho de dureza de 60° shore en una escala hasta 100. Este grado de dureza es adimensional, por lo tanto sólo nos fue posible elegir este caucho con el criterio de que si éste fuera demasiado blando, con la presión que se ejercería, éste simplemente se partiría prematuramente. Por otro lado si eligiésemos uno de gran dureza o máxima dureza, éste no permitiría un sellado de la tubería óptimo. Entonces por experiencia y recomendación del fabricante se optó por aplicar el grado de dureza mencionado, debido a que no se partiría con facilidad y brindaría el grado de flexibilidad necesaria para un buen sellado de la tubería a probar.

Al final las dimensiones definitivas de los dos cauchos serían de 12 pulgadas de diámetro por 2 pulgadas de espesor con una dureza de 60° shore, y dos pernos vulcanizados por caucho de $\frac{5}{8} \times 4$ " como se puede apreciar en la figura 3.20.



Fig. 3.20 Cauchos selladores terminados

3.3 SELECCIÓN DE LA PRENSA HIDRÁULICA

Para el dimensionamiento y selección del gato hidráulico se realizó el siguiente cálculo de esfuerzos:

Utilizando la ecuación 1.1, tenemos:

$P = F/A$; de donde despejamos la fuerza, ya que conocemos la presión de trabajo y la máxima área involucrada, entonces:

$$F = P \times A;$$

$$F = 800 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \times \frac{\pi (10 \text{ in})^2}{4}$$

$$F = 62.831,85 \text{ lbf};$$

$$F = 28559,9 \text{ Kgf};$$

$$F \approx 28,6 \text{ t}.$$

Entonces, por disponibilidad en el mercado y por brindar un margen de seguridad se seleccionará un gato hidráulico tipo botella de 30 t. La marca es en este caso de la casa española MEGA, la cual posee una gran reputación en cuanto a construcción de equipos hidráulicos. Este gato tiene las dimensiones mostradas en la figura 3.21.

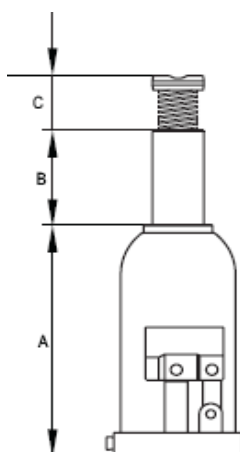


Fig. 3.21 Dimensiones de gato hidráulico tipo botella de 30 t

Fuente: <http://siems-klein.com/files/images/ostatni-zarizeni/mega-interior.pdf>

- A = 242 mm.
- B = 150 mm.
- C = 75 mm.
- Total extendida = 467 mm.
- Peso = 15,5 kg.



Fig. 3.22 Gato hidráulico tipo botella de 30 t, marca MEGA

Fuente: <http://siems-klein.com/files/images/ostatni-zarizeni/mega-interior.pdf>

3.4 DIMENSIONAMIENTO DE VIGAS Y COLUMNAS

Para empezar este punto, se debe aclarar que el tipo de viga de acero seleccionada es del tipo UPN, por motivos de facilidad de construcción y optimización de costos.

Para el dimensionamiento de la viga a utilizarse se procedieron a realizar la serie de cálculos detallados a continuación:

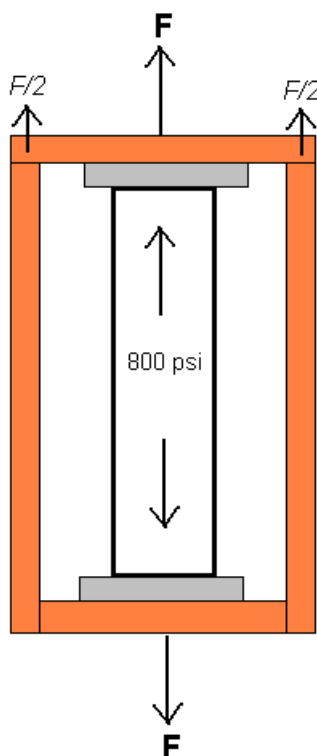


Fig. 3.23 Esquema para dimensionamiento de columnas

$$F = P \times A;$$

$$F = 800 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \times \frac{\pi (10 \text{ in})^2}{4}$$

$$F = 62.831,85 \text{ lbf};$$

$$F = 28559,9 \text{ Kgf};$$

$$\Rightarrow F/2 = 14.279,96 \text{ Kgf. (En una sola viga)}$$

Las columnas en la figura 3.23 se encuentran sometidas únicamente a esfuerzos de tracción, entonces hablaremos de un esfuerzo límite elástico que posee el acero en estas condiciones.

Cuando una barra de acero al carbono está sometida a esfuerzos de tracción, ésta debe resistir un esfuerzo promedio máximo de $2460 \text{ kg} / \text{cm}^2$ en su etapa elástica, antes de llegar al punto plástico que es donde el material empieza a deformarse de manera acelerada y no recobrará su estado original.¹⁸

¹⁸ <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>

Ahora se tomará un factor de seguridad (f_s) de 1.5 respecto a este esfuerzo permisible.

Entonces tenemos que:

$$\frac{2460 \text{ kg/cm}^2}{1,5} = 1640 \text{ kg/cm}^2$$

A continuación se procederá a calcular el *esfuerzo límite elástico* (σ) de diferentes tipos de vigas según su área de corte transversal, y así determinar cuál de ellas se encuentra de mejor manera por debajo del límite elástico calculado anteriormente.

- Viga UPN 140 (área transversal $A = 20,4 \text{ cm}^2$)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{14.280 \text{ kgf}}{20,4 \text{ cm}^2} = 700 \text{ kgf/cm}^2$$

Conclusión: Éste valor de esfuerzo indica que esta viga se encuentra muy por debajo del límite de elasticidad indicada, es decir resiste con creces el esfuerzo nominal de la prueba hidrostática.

- Viga UPN 80 (área transversal $A = 11 \text{ cm}^2$)

$$\sigma = \frac{14.280 \text{ kgf}}{11 \text{ cm}^2} = 1.298,2 \text{ kgf/cm}^2$$

Conclusión: Éste valor de esfuerzo indica que esta viga se encuentra muy cerca del límite de elasticidad indicada, es decir que al mínimo incremento de esfuerzo podría sufrir una deformación en su parte más débil, molecularmente hablando.

- Viga UPN 100 (área transversal $A = 13.5 \text{ cm}^2$)

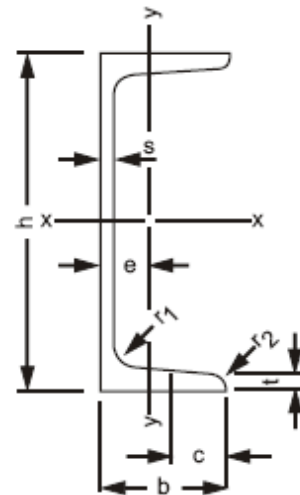
$$\sigma = \frac{14.280 \text{ kgf}}{13,5 \text{ cm}^2} = 1.057,77 \text{ kgf/ cm}^2$$

Conclusión: Éste valor de esfuerzo indica que esta viga se encuentra razonablemente por debajo del límite de elasticidad indicada, es decir resiste en buena medida el esfuerzo nominal de la prueba hidrostática.

Entonces:

Por cumplir con las características de fuerza requeridas, motivos de disponibilidad en el mercado, costos y facilidad de construcción, se ha optado por utilizar la viga tipo UPN 100, con las características detalladas en la figura 3.24 y la tabla 3.2.

I= Momento de Inercia
S= Momento de Resistencia
R= Radio de Inercia, Siempre Referidos
Al eje de flexión correspondiente
Calidades: ASTM-A-36
ST-37-2



Para $h \leq 300$ inclinación: 8% $C=b/2$
Para $h \geq 300$ inclinación: 5% $C=(b-s)/2$

Fig. 3.24 Sección transversal viga UPN

Fuente: http://www.pstvm.com/welle2/manualesvigas_upn.pdf

UPN	Dimensiones (mm)						Área cm ²	Peso Kg/m	Momento respecto a los ejes					
									EJE X-X			EJE Y-Y		
	h	b	s	t	r1	r2			Ix cm ⁴	Sx cm ³	Rx cm	Iy cm ⁴	Sy cm ³	Ry cm
80	80	45	6.0	8.0	8.0	4.0	11.0	8.65	106	26.5	3.10	19.4	6.35	1.33
100	100	50	6.0	8.5	8.5	4.5	13.5	10.6	205	41.1	3.91	29.1	8.45	1.47
120	120	55	7.0	9.0	9.0	4.5	17.0	13.3	364	60.7	4.63	43.1	11.10	1.59
140	140	60	7.0	10.0	10.0	5.0	20.4	16.0	605	86.4	5.45	62.5	14.70	1.75
160	160	65	7.5	10.5	10.5	5.5	24.0	18.9	925	116.0	6.21	85.0	18.20	1.89
180	180	70	8.0	11.0	11.0	5.5	28.0	22.0	1350	150.0	6.96	113.0	22.40	2.02
200	200	75	8.5	11.5	11.5	6.0	32.2	25.3	1910	191.0	7.71	148.0	26.90	2.14
220	220	80	9.0	12.5	12.5	6.5	37.4	29.4	2690	245.0	8.48	196.0	33.50	2.30
240	240	85	9.5	13.0	13.0	6.5	42.3	33.2	3600	300.0	9.22	247.0	39.50	2.42
260	260	90	10.0	14.0	14.0	7.0	48.3	37.9	4820	371.0	10.00	317.0	47.80	2.56
280	280	95	10.0	15.0	15.0	7.5	53.4	41.9	6280	448.0	10.80	398.0	57.10	2.74
300	300	100	10.0	16.0	16.0	8.0	58.8	46.1	8030	535.0	11.70	493.0	67.60	2.90
320	320	100	14.0	17.5	17.5	8.5	75.8	59.5	10870	679.0	12.10	597.0	80.60	2.81
350	350	100	14.0	16.0	16.0	8.0	77.3	60.6	12840	734.0	12.90	570.0	75.00	2.72
380	380	102	13.5	16.0	16.0	8.0	80.4	63.1	15760	829.0	14.00	615.0	78.70	2.77
400	400	110	14.0	18.0	18.0	9.0	91.5	71.8	20350	1020.0	14.90	846.0	102.00	3.04

Tabla 3.2 Características vigas UPN

Fuente: http://www.pstvm.com/welle2/manualesvigas_upn.pdf

3.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA PARA PRESURIZAR EL SISTEMA

Para la selección de la bomba se tomaron en cuenta varios factores como presión, caudal, tipo de accionamiento, según su principio de funcionamiento, costos, seguridad, etc.

En primera instancia se pensaba dimensionar una bomba eléctrica que tenga las características requeridas como presión y caudal. Pero debido a que en el mercado local se encuentra en su mayoría bombas centrífugas o roto dinámicas para bajas presiones, se optó por buscar otro tipo de bomba que satisfaga la presión requerida.

Entonces se llegó a la conclusión de que el mejor tipo de bomba que resiste altas presiones es la bomba de tipo pistón, pero debido a nuestras necesidades y presupuesto, sería muy costoso adquirir una bomba de accionamiento eléctrico.

Para el llenado de este sistema no se necesita de una bomba centrífuga, ya que la tubería a probar no es de gran volumen y simplemente sería suficiente la presión de la línea de agua común.

Gracias a catálogos y averiguaciones adicionales se llegó a la conclusión de utilizar una bomba de pistón manual, con capacidad para soportar presiones de hasta 2000 psi, lo cual es ideal para este caso, además el volumen ingresado por carrera es de aproximadamente 10 cm^3 . El volumen requerido para elevar la presión en la tubería de pruebas es muy bajo, por lo que una bomba manual es ideal para este fin.

En la figura 3.25 se muestra el esquema de la bomba manual de pistón seleccionada marca Helbert.



Fig. 3.25 Bomba manual de pistón

Fuente: http://www.helbertycia.com/xt_Imagepopup.asp?XMLPath=20578iFile=41.jpg

3.6 SELECCIÓN DE MANÓMETROS Y OTROS ELEMENTOS

3.6.1 SELECCIÓN DEL MANÓMETRO

Para la selección del manómetro simplemente se tuvo que observar cual es la máxima presión posible durante una prueba, y según eso se optó por adquirir un manómetro de 1000 psi de 4" seco, con adaptación para $\frac{1}{4}$ de pulgada.

El manómetro seleccionado debe indicar claramente la escala de presión, ya que el operario debe estar siempre atento al comportamiento del manómetro.

Es por esta razón que se ha instalado un manómetro de gran diámetro con el fin de facilitar la visibilidad.

Sin embargo, éste manómetro puede ser intercambiable de acuerdo a la necesidad de la prueba y considerando el rango de un mínimo de 1.5 y máximo de 4 veces la presión de prueba, mencionado en el subcapítulo 2.3.

3.6.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA

La tubería de alimentación de agua desde la bomba a la tubería de prueba, debe ser de un material que resista la misma presión que resistirá el resto del sistema, ya que la presión es uniforme en todos los tramos.

La tubería galvanizada ofrece la ventaja de poder realizar su roscado por medio de una herramienta llamada “tarraja”, que es de fácil manipulación.

Existen otros tipos de tubería que por el contrario no satisfacen los requerimientos de presión para este proyecto. Tales tuberías son las llamadas tipo PVC o HIDRO3, las cuales no resisten presiones superiores a los 200 psi aproximadamente.

Además de la tubería, los accesorios a utilizarse también deben satisfacer las mismas necesidades. Estos elementos son:

- Válvulas de bola
- Válvula anti retorno o “check”
- Codos
- Accesorios en T
- Uniones, neplos y universales, entre otros.

Estos tres últimos elementos vienen a ser del mismo material de la tubería, es decir de hierro galvanizado, mientras que las válvulas pueden ser de acero inoxidable y otras aleaciones o fundición.

Para el montaje de esta red de alimentación se necesita asegurarse de que todo quedará herméticamente acoplado, para esto es necesario el uso del producto llamado teflón en cinta, además del teflón en pasta. Dichos productos nos aseguran un acople fuerte a prueba de fugas.

En el mismo sistema de alimentación se encuentra acoplado el sistema de venteo y descarga o alivio de presión después de realizada la prueba hidrostática.

El llamado punto de venteo o liberación de aire atrapado debe estar siempre en un lugar alto del sistema de alimentación, ya que no debe quedar ninguna burbuja de aire atrapada en todo rincón del sistema.

El módulo de pruebas hidrostáticas ya armado, podrá ser apreciado de manera completa en la figura 3.26



Fig. 3.26 Módulo de pruebas hidrostáticas

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DEL EQUIPO

4.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El módulo de pruebas hidrostáticas funciona según el proceso detallado a continuación:

4.1.1 MONTAJE DE LA TUBERÍA A PROBAR

Para este primer paso, es necesario que la tubería sea tratada según el procedimiento indicado en el subtítulo 4.2.2.

Una vez realizada esta preparación se procederá a realizar las respectivas mediciones, las cuales son:

- Medición del diámetro interno de la tubería
- Medición del espesor de pared
- Medición del diámetro externo
- Perímetro circular en el centro de la tubería
- Longitud

Dichas mediciones serán registradas en la hoja de control de pruebas hidrostáticas (HRPH), descrita más adelante. Después de estas mediciones se llevará la tubería hacia el módulo, cuidando de no golpearla para así evitar que se remuerda en los filos.

Según la longitud de tubería a probar (máximo 1,2 m), se regulará en primer lugar la bancada móvil teniendo en cuenta el espacio ocupado por el gato hidráulico y por los cauchos, aproximadamente unos 40 cm en total. Para regular la bancada

móvil es necesario en primer lugar remover el gato hidráulico para mayor comodidad, ya que éste pesa alrededor de 36 lb.

Una vez puesta la bancada se montará nuevamente el gato. Después se montará la mesa de soporte del caucho inferior lo más cerca posible al pistón del gato.

Luego, con la ayuda del husillo de aproximación rápida a la carga del gato nos acercaremos a la mesa de soporte del caucho, dejando listo el sistema para proceder al sellado de la tubería.

Se monta la tubería sobre el caucho inferior y se accionará el gato hidráulico hasta obtener una presión suficiente para estabilizar el tubo sin dañar el caucho. Para este procedimiento es importante que la válvula de desfogue esté abierta para evitar una compresión del aire que se encuentra en el interior.

Una vez montada la tubería se realizará una inspección visual para comprobar que toda la tubería se encuentra sellada. Se tomarán todas las precauciones para asegurarse de que la tubería se encuentra estable, así como los elementos móviles como el gato, la bancada y la mesa.

4.1.2 LLENADO DE LA TUBERÍA

A continuación se procederá a llenar de agua el interior de la tubería abriendo la válvula de alimentación. En este paso sólo se toma el agua de la línea de suministro con una presión nominal aproximada de 60 psi. Al momento de realizar este llenado hay que asegurarse de que la válvula de desfogue se encuentre ligeramente abierta, con el fin de expulsar el aire contenido dentro del tubo. Mientras se da el proceso de llenado se realizarán inspecciones visuales para verificar si existen fugas entre la tubería y los cauchos selladores. La tubería se encontrará completamente llena cuando empiece a salir agua por la línea de desfogue o venteo.

En este momento se cerrarán ambas válvulas, tanto la de desfogue como la de alimentación, quedando listo el sistema para presurizarlo con la bomba.

4.1.3 PRESURIZACIÓN

Una vez completado el llenado, se desconecta la alimentación de agua de la línea comercial para conectar la bomba manual. La bomba debe ser conectada antes de la válvula check y la válvula de alimentación.

Esta bomba contiene un recipiente en el cual se deposita el agua que será inyectada para la presurización. Esta agua será medida en litros o en galones para saber que cantidad de agua es la que se está bombeando.

Una vez realizadas las conexiones necesarias, se empezará a aplicar presión lentamente. La tasa recomendada de aumento de la presión es inferior a 50 psi por minuto. Se debe mantener un control adecuado para que la presión no exceda el ajuste requerido en cada incremento de presión. El objetivo de aumentar la presión por intervalos controlados es permitir que el sistema se estabilice tanto en presiones como en temperaturas y evitar cambios bruscos.

En este caso no es necesario llevar un registro de temperatura, ya que la misma nunca excederá los 24 °C, como indica la tabla 2.2 del capítulo 2. Dicha temperatura es relativamente baja y no existirán riesgos por expansión térmica.

Cuando se alcanza la presión de prueba adecuada, puede comenzar la inspección de conformidad con el objetivo de la prueba. Se examinará el sistema en caso de cualquier fuga. Si no hay fugas visibles, se mantendrá el sistema en una condición estática presurizada durante un corto período (no más de 5 minutos), lo suficiente para satisfacer el requisito predefinido.

4.1.4 DESPRESURIZACIÓN

Al finalizar la prueba, se liberará presión lentamente a través de la válvula de drenaje, hasta reducir por completo toda la presión que se pueda considerar peligrosa (bajo los 30 psi).

4.1.5 DRENAJE

Para el drenaje, se liberará la tensión del gato hidráulico muy paulatinamente y el agua caerá desde la tubería de pruebas, por lo que el o los operarios realizarán todas las instalaciones de desagüe necesarias para una correcta disposición del agua utilizada en la prueba.

Para este caso sería muy útil colocar un recipiente debajo del sistema, si es que no existe cerca un sumidero.

4.1.6 DESMONTAJE Y MEDICIONES FINALES

Para finalizar el proceso de prueba hidrostática, se tiene que desmontar la tubería eliminando por completo cualquier tensión realizada por el gato hidráulico.

A continuación se realizarán la mismas mediciones como las realizadas en la tubería antes de la prueba, según esto se registrarán los datos en la hoja de control de la prueba, la cual se describirá más adelante.

La tubería se considerará operable siempre y cuando cumpla con los requisitos de expansión máximos según las *tablas 2.6, 2.7 y 2.8* de la norma ASTM descrita en el capítulo 2 según corresponda el caso.

En caso de falla prematura de la tubería, como rotura o agrietamiento, será inmediatamente rechazada, indicando las observaciones en la "HRPH".

4.2 PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE TUBERÍAS Y MÓDULO

4.2.1 TUBERÍAS

En el caso de las tuberías que serán probadas hidrostáticamente, se tiene que seguir el siguiente proceso de preparación previo a la prueba:

4.2.1.1 Corte

El corte de la tubería debe ser realizado cuidadosamente, ya que cualquier inclinación en los extremos puede causar que los cauchos selladores no cumplan bien su trabajo y por ende producir una desestabilización durante la prueba. Además si se produjera una fuga en esos puntos débiles conllevaría a ocasionar un accidente grave.

El corte debe estar a 90° con respecto a la parte larga del tubo o eje principal en todos los puntos de las circunferencias que estarán en contacto con los cauchos.

4.2.1.2 Limpieza de óxidos

Tanto en la parte interna como en la externa se deben eliminar todos los vestigios de óxidos que influirían negativamente en las mediciones de la tubería. Además esta limpieza nos ayuda a localizar fallas en la tubería más fácilmente, ya que el óxido oculta las imperfecciones del metal.

4.2.1.3 Redondeo de filos en los extremos

Con el fin de extender en lo más posible la vida útil de los cauchos selladores se procederá a suavizar los bordes de las tuberías, ya que si existe un filo cortante en la tubería sumada la gran fuerza ejercida por el gato hidráulico, esto provocaría que el caucho se corte y se deteriore rápidamente.

Además al existir un filo cortante en el tubo, significa que el área de contacto con el caucho es menor. Es decir, se crearía un punto débil ante la presión de prueba, el cual inevitablemente conduciría a una fuga.

4.2.2 MÓDULO

Para la preparación del módulo previa a la prueba hidrostática, simplemente se seguirán los siguientes pasos:

- Inspección visual de las uniones soldadas en la estructura principal y en la bancada.
- Colocación del módulo en una superficie nivelada y limpia.
- Revisar el correcto funcionamiento y estabilidad del gato hidráulico.
- Inspección visual de los cauchos selladores.
- Inspección de fugas en las tuberías de alimentación y drenaje.
- Revisar el correcto funcionamiento del manómetro.
- Inspeccionar las conexiones de la bomba y sus elementos.

4.3 DISEÑO DEL FORMATO PARA PROTOCOLOS O REGISTRO DE PROCEDIMIENTOS PARA LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS O (HRPH).

Para llevar a cabo una prueba hidrostática es necesario llevar un registro de cada paso en la operación. A continuación, en la figura 4.1, se dispone de un formato de registro de pruebas que será de gran utilidad para el o los operarios.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE SOLDADURA

REGISTRO DE PROCEDIMIENTOS PARA PRUEBAS HIDROSTÁTICAS (HRPH)

1. ESPECIFICACIONES INICIALES DE LA TUBERÍA DE PRUEBA

Material:	Tubería de acero						
Diámetro exterior (cm), [inch]	Diámetro nominal (cm), [inch]	Perímetro central (cm), [inch]	Espesor de pared (mm)	Área (cm ²)	Presión (psi)		longitud (cm)
					Diseño	Prueba	
[]	[]	[]					

long. (cm) x área (cm²)

volumen (cm³)

2. VOLUMEN DE LLENADO:

3. LECTURAS Y MEDICIONES DURANTE Y DESPUÉS A LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.

Nº	Hora	Presión (psi)	Perímetro (mm)	Dilatación (mm)	Observaciones
1					
2					
3					
4					
5					

4. TIEMPO DE DURACIÓN DE LA PRUEBA (presurización): min.

5. SE CONSIDERA SATISFACTORIO EL RESULTADO DE LA PRUEBA:

Elaboró:	Revisó:	Aprobó:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

Figura 4.1 Formato para pruebas hidrostáticas

CAPÍTULO V

SEGURIDAD INDUSTRIAL Y ANÁLISIS DE COSTOS

La preocupación por la seguridad es una de las características más sobresalientes de nuestra civilización, es por ello que las personas que manejan máquinas o controlan procesos, no pueden exponerse a riesgos laborales. Por tanto, las averías de equipos y los fallos humanos son causa fundamental que afecta a las actividades industriales.¹⁹

Es por ello que el principal objetivo de la seguridad Industrial es:

- Dar condiciones seguras a los trabajadores en todos los lugares donde se estén desarrollando actividades.
- Salvaguardar la vida, salud e integridad física de los trabajadores, así como el normal desenvolvimiento de sus actividades.
- Evitar accidentes, disminuir, mitigar y reducir los factores de riesgos.

5.1 RIESGOS EN LAS PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

Para manipular el módulo de pruebas hidrostáticas se debe tener en cuenta ciertos criterios, ya que en este tipo de trabajo como en cualquier se está expuesto a ciertos riesgos es por ello que la primera prioridad es garantizar la seguridad del personal del área donde se esté trabajando.

Para la utilización del módulo de pruebas hidrostáticas ya que está es una maquinaria fija se deberá tener en cuenta lo siguiente:

¹⁹ www.ffii.es/publicaciones/libro_seguridad_industrial/LSI_Cap02.pdf

- El módulo de pruebas hidrostáticas se utilizará únicamente en las funciones para las que han sido diseñadas.
- Muerte o lesiones graves y daños a la propiedad puede ser el resultado de la falla en una articulación o conexión durante las pruebas hidrostáticas, por lo que se debe mantener a todas las personas a una distancia segura durante la prueba. Además la sección de prueba debe ser supervisada en todo momento durante la prueba.
- Todo operario que utilice una máquina deberá ser instruido y entrenado adecuadamente en su manejo y en los riesgos inherentes a la misma. Dentro de este punto cabe mencionar la seguridad personal que el o los operarios deben tener en cuenta para resguardar su integridad.
- El equipo personal básico consta de: gafas de seguridad, botas con punta de acero, casco o máscara facial, guantes, entre otros elementos opcionales.
- El módulo y todos sus dispositivos deberán ser revisados y sometidos a todas las operaciones establecidas que aconseje el buen funcionamiento de la misma.
- Las columnas y vigas metálicas deberán ser capaces de soportar cualquier esfuerzo que pueda ser transferido a ellos, por las pruebas hidrostáticas, por la expansión o contracción de los mismos durante el trabajo, además deberán estar unidas de tal manera que mantengan entre si su propia relación.

El principal riesgo asociado con la realización de pruebas hidrostáticas es la presión, la cual es alta y si existe una ruptura, el chorro de agua producido puede lesionar a las personas localizadas en el área inmediata es por ello que se deben tomar todas las precauciones para garantizar que no se creen riesgos para el personal en la realización de las pruebas.

- Antes de aplicar la presión de la prueba, se debe sacar completamente el aire de la sección de tubería por probar, se deberán instalar un sistema mediante el cual el aire pueda ser expulsado mientras el sistema es llenado con agua. Después de que todo el aire ha sido expulsado, las tomas se cierran y la presión se aplica. Al terminar la prueba de presión, los cauchos selladores deberán ser retirados con precaución ya que como estos están sometidos a presión pueden provocar accidentes.
- Cualquier tubería, deberá ser cuidadosamente examinada durante las pruebas de presión. Además si esta está dañada o defectuosa deberá ser reemplazada por otra, ya que la utilización de esta puede provocar ciertos riesgos en la realización de la prueba hidrostática y deberá repetirse hasta que los resultados sean satisfactorios.
- Asegurarse de que todas las tuberías están restringidas contra posible movimiento de falla catastrófica en una conexión o articulación. Cuando se presuriza, articulaciones o conexiones defectuosas pueden separarse de repente causando movimiento violento y peligroso de tuberías o partes.
- Las fugas en una articulación o conexión pueden preceder inmediatamente una falla catastrófica. Nunca acercarse o intentar reparar o detener pérdidas mientras que la sección de ensayo está presurizada. Siempre despresurizar la sección de prueba antes de realizar reparaciones.
- Es muy importante que durante la prueba hidrostática, se realice una supervisión rigurosa de cada una de las operaciones, con objeto de garantizar una buena calidad y confiabilidad del proceso.
- La persona encargada de la realización de la prueba hidrostática debe conocer detalladamente los planos, especificaciones, normas de diseño y construcción y toda la información relacionada con el proceso, con el fin de ejecutar sus funciones adecuadamente.

- Después de la terminación exitosa de una prueba hidrostática, se reducirá la presión en la tubería de prueba y se evacuará el agua de una forma segura. Una vez que se haya extraído toda el agua, se desalojará la tubería y el módulo de pruebas hidrostáticas está listo para ser utilizado en una nueva prueba.
- Las pruebas a una presión excesiva o por tiempo excesivo puede dañar el sistema de tuberías. Cuando se realicen pruebas a presiones de diseño o menores, la duración de la prueba, incluyendo el tiempo para presurizar, el tiempo para la expansión inicial, el tiempo a presión de prueba y el tiempo para despresurizar deben limitarse a un período de tiempo práctico dado que la sección de la prueba no debe ser dejado sin supervisión en ningún momento durante la prueba hidrostática.

Además existen otros riesgos que se pueden presentar en la preparación de las tuberías para la realización de pruebas hidrostáticas, ya que este tipo de trabajo puede implicar que un operario tenga que soldar, cortar, esmerilar o cualquier otra tarea que produzca una llama abierta, chispas o calor, y se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Se debe remover todo el material inflamable del área de trabajo antes de comenzar a trabajar con fuentes de calor.
- Hay que asegurarse que el extintor de fuego apropiado esté al alcance y listo para ser usado.

5.2 COSTOS DE MATERIA PRIMA, MANO DE OBRA, SOLDADURA Y ELEMENTOS ADICIONALES

Se podrá determinar los valores de la materia prima la cual se utilizó para la construcción del módulo de pruebas hidrostáticas, estos valores se tendrían que cuantificar en una tabla para su mejor comprensión, así ver *tabla 5.2*.

Cabe señalar que los costos de la gata hidráulica, la viga metálica y la vulcanización de los cauchos selladores fueron financiados por el laboratorio de soldadura de la EPN y que dentro de los costos de mano de obra se deberá tomar en cuenta que lo único que se realizó como un trabajo adicional fue la vulcanización de los cauchos selladores y cuyo costo está especificada en la *tabla 5.2*.

Además se debe considerar los costos que significaron el consumo de energía eléctrica ya que para la elaboración del presente proyecto de titulación se usaron herramientas eléctricas las cuales se las indica en la *tabla 5.1* con sus respectivas horas de uso.

ELEMENTOS ELÉCTRICOS	HORAS USADAS
Soldadora	6
Amoladora	10
Taladro de pedestal	7
Compresor	3

Torno	5
-------	---

Tabla 5.1 Elementos eléctricos con horas usadas

El costo de energía se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$\text{KW hora} = \frac{\text{Volts} \times \text{Amps} \times \text{Factor de potencia} \times \text{tiempo en horas}}{1.000} \quad (5.1)$$

En donde:

– Soldadora:

$$\frac{30 \text{ V} \times 86 \text{ A} \times 0.8 \times 6 \text{ horas de uso}}{1000} = 12.384$$

$$\Rightarrow \text{Costo Kw/H} = \$ 0.0857$$

$$\Rightarrow 0.0857 \times 12.384 = \$ 1.061$$

– Amoladora:

$$\frac{110 \text{ V} \times 6.1 \text{ A} \times 0.8 \times 10 \text{ horas de uso}}{1000} = 5.368$$

$$\Rightarrow \text{Costo Kw/H} = \$ 0.0857$$

$$\Rightarrow 0.0857 \times 5.368 = \$ 0.46$$

– Taladro de pedestal:

$$\frac{220 \text{ V} \times 2.85 \text{ A} \times 0.78 \times 7 \text{ horas de uso}}{1000} = 3.42342$$

$$\Rightarrow \text{Costo Kw/H} = \$ 0.0857$$

$$\Rightarrow 0.0857 \times 3.42342 = \$ 0.2933$$

– Compresor:

$$\frac{220 \text{ V} \times 6.78 \text{ A} \times 0.8 \times 3 \text{ horas de uso}}{1000} = 3.57984$$

$$\Rightarrow \text{Costo Kw/H} = \$ 0.0857$$

$$\Rightarrow 0.0857 \times 3.57984 = \$ 0.3067$$

– Torno:

$$\frac{220 \text{ V} \times 10 \text{ A} \times 0.84 \times 5 \text{ horas de uso}}{1000} = 9.24$$

$$\Rightarrow \text{Costo Kw/H} = \$ 0.0857$$

$$\Rightarrow 0.0857 \times 9.24 = \$ 0.7918$$

En consecuencia el costo total por uso de energía eléctrica es de \$ 2.9128.

En la tabla 5.2 se indica todos los valores unitarios y el costo total que implicó la realización del módulo de pruebas hidrostáticas.

Numero	Descripción de parte	Valor unitario	Valor total
1	Viga metálica UPN 100x6	148.00	148.00
1	Gata hidráulica 30 toneladas	250.00	250.00
2	Vulcanización de cauchos selladores	150.00	300.00
1	Manómetro 1000 PSI	39.85	39.85
1	Tubo galvanizado ½ pulgada	22.00	22.00
1	Permatex	3.00	3.00
1	Bote de pintura esmalte negro	6.50	6.50

1	Bote de pintura esmalte rojo	6.50	6.50
1	Kilo de electrodos # 6010	4.50	4.50
1	Kilo de electrodo # 7018	5.00	5.00
5	Codos galvanizados	0.58	2.90
2	Tee galvanizada	0.56	1.12
1	Válvula check	17.31	17.31
2	Válvula de bola	19.37	38.74
360	Copias	0.02	7.20
3	Anillados	1.60	4.80
	Costo de energía eléctrica	2.91	2.91
		TOTAL	\$ 860.33

Tabla 5.2 Costo de fabricación del módulo de pruebas hidrostáticas

5.3 OPTIMIZACIÓN DE COSTOS Y TIEMPO

Cabe recalcar que para la optimización de costos se procedió a utilizar elementos que estaban al alcance de nuestra mano y con lo cual se redujeron los costos de materia prima.

Para la optimización de tiempo en la realización del presente proyecto de titulación se estableció un cronograma de actividades el cual se le dio el debido seguimiento para concluirlo en el plazo establecido el mismo que se lo adjunta en la tabla 5.3

ACTIVIDADES	SEMANAS															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Elaboración del Plan de Proyecto	●	●														
Entrega del plan de proyecto			●													
Aprobación del plan de proyecto			●	●												
Recopilación y organización de la información obtenida					●	●	●									
Redacción del proyecto							●	●	●	●						
Estudio de normas, planos, materiales y elementos									●	●						
Obtención de materiales y elementos									●	●	●					
Montaje de materiales y elementos												●	●	●		
Detalles finales de acabados del módulo de pruebas														●	●	
Realización de pruebas hidrostáticas																●

Tabla 5.3 Cronograma para la optimización de tiempo

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

Con la realización de este proyecto de titulación se ha podido establecer las siguientes conclusiones:

- El objetivo general propuesto en el presente proyecto de titulación se ha logrado cumplir, es decir se ha conseguido construir un módulo de pruebas hidrostáticas y el cual cumpla con todos los requisitos necesarios para que los se puedan realizar los ensayos necesarios en tuberías metálicas de 4 a 10 pulgadas.
- Debido a que la tecnología está en constante evolución, se debe considerar cuales elementos harán una mejor labor para el registro de pruebas y si el formato es el más idóneo en los procesos.
- El módulo construido permite simular de una manera óptima todas las presiones a las que están sometidas las tuberías metálicas para el buen funcionamiento de las mismas.
- Se identificaron los criterios con que se debe dimensionar para la construcción de un sistema de presurización para tuberías metálicas.
- El equipo diseñado es de muy buena utilidad especialmente para trabajos en los que se involucra tuberías metálicas.
- El presente proyecto de titulación se lo ha conseguido con la ayuda otorgada por el laboratorio de soldadura de la EPN, la información recolectada en libros, folletos, páginas web, manuales y con los

conocimientos adquiridos durante la formación académica y las prácticas pre-profesionales.

- Se espera que el presente Proyecto, se lo tome en cuenta como una fuente de información para los estudiantes. Ya que además de la información recolectada, se cuenta con experiencias propias y recogidas de distintas fuentes de información y expertos en la materia.

6.2 RECOMENDACIONES GENERALES

- El presente proyecto puede ser mejorado instalando elementos eléctricos adicionales como por ejemplo un registrador de presión vs tiempo impreso que sea parte de la documentación de prueba, con lo cual se podrá tener una lectura más clara de las pruebas obteniendo mejores resultados.
- Es recomendable que se realicen las pruebas en el módulo con una persona que sepa cuál es el funcionamiento y todas las normas de seguridad que se deben tomar en cuenta para evitar accidentes en la realización de estas.
- Cuando se opere una máquina considerar el factor de seguridad y los riesgos y accidentes que se pudieran dar por la mala utilización de la misma.

Además se deben tomar en cuenta las limitaciones de este equipo, tales como:

- No operar este equipo con otro fluido de pruebas que no sea agua.
- No tratar de realizar algún tipo de adaptación al sistema sin un estudio previo.
- No realizar pruebas a tuberías que no se sustenten en las normas

especificadas en el presente proyecto.

Recomendaciones para el operario:

- Al momento de realizar las pruebas, procurar estar asistido por al menos una persona.
- Realizar todos los procedimientos de seguridad descritos, tales como la preparación de la tubería y la verificación de fugas antes de proseguir con la prueba.
- Seguir todos los consejos de preservación del equipo y sus accesorios.
- Si se presenta una fuga en medio de una prueba, no tratar de controlarla con el sistema presurizado, ya que esto conllevaría a un riesgo mayor.
- Con el fin de mejorar el desempeño del módulo es recomendable diseñar y fabricar un conjunto de tapones cónicos con lo cual se garantizara la hermeticidad en las pruebas hidrostáticas.
- Ubicar el módulo de pruebas hidrostáticas en un sitio de prueba aislado con un visor que separe el área y solo se vea el manómetro o registro de presión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Para la realización del presente proyecto se han citado las siguientes fuentes de consulta:

- DE ACEVEDO Netto, J. M. y ACOSTA ALVAREZ, (1976) Manual de Hidráulica, Ediciones HARLA.
- FORCHHEIMER P, (1950), Tratado de Hidráulica, Editorial LABOR S.A.
- MOTT L. Robert, Mecánica de Fluidos, Sexta Edición
- PASCAL, Blaise. (1647) “Estática de Fluidos”, Microsoft ® Encarta ® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation.
- SANDOVAL, Ramiro, (1993), Principios de Hidráulica.
- STREETER, Victor L. (1990) “Mecánica de los fluidos”. (Madrid, Ediciones del Castillo.
- TIPPENS, Paul E. (1992) “Fluidos en reposo”, FISICA (Ciudad de México, McGraw-Hill), p. 262-274
- WEBBER B. (1965) Mecánica de fluidos para ingenieros, Ediciones URMO.
- <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>
- <http://www.fisica.usach.cl/~lhrodrig/fisica1/hidrostdb.pdf>
- <http://ing.unne.edu.ar/pub/Capitulo01-A04.pdf>
- <http://www.pemex.com/files/standards/especificaciones03>

- <http://www.prlog.org/10144420-techniques-for-hydrostatic-test.pdf>
- http://www.engineeringtoolbox.com/ansi-flanges-pressure-temperature-d_342.html
- http://www.engineeringtoolbox.com/astm-steel-pipes-working-pressure-d_775.html
- http://www.engineeringtoolbox.com/asme-b31pressure-piping-d_39.html
- http://www.slc.ca.gov/Division_Pages/MFD/SLPT/Revised_SLPT_Guidelines_12-03-03.pdf
- <http://www.banksengineering.com/blrhydro.htm>
- <http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/26093.aspx>
- <http://www.amgas.com/hydro.htm>
- http://www.pstvm.com/welle2/manualesvigas_upn.pdf
- http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrostatic_test
- <http://www.cheresources.com/airleaktest.pdf>
- <http://www.asapchile.cl/index.php>
- <http://www.facenil.com/tuberias/hierrogalvanizado.htm>
- www.ffii.es/publicaciones/libro_seguridad_industrial/LSI_Cap02.pdf
- www.catpumps.com

- <http://www.sanfrancisco.olx.com.ar>
- http://www.osha.gov/SLTC/etools/evacuation/portable_hydro.html#1
- http://cad-cae.com/PDF_CAD_CAE/Soldadura.pdf
- <http://siems-klein.com/files/images/ostatni-zarizeni/mega-interior.pdf>
- http://www.helbertycia.com/xt_Imagepopup.asp?XMLPath=20578iFile=41.jpg
- <http://www.ilustrados.com/publicaciones/multimedia/hu-pre45.jpg&imgrefurl>
- http://www.koboldmessring.com/fileadmin/koboldfiles/media/manometro_tipo_bourdon_con_diafragma_man-r_l1-man-r.gif&imgrefurl
- http://es.wikipedia.org/wiki/Propiedades_mecanicas_de_los_materiales

ANEXOS

ANEXO 1

REFERENCIA DE LAS PRESIONES DE TRABAJO PARA LAS TUBERÍAS A SER PROBADAS EN EL MÓDULO DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS.

Tuberías de acero al carbón

Presión de trabajo ASTM A53 B

Medida Nominal (in)	Diámetro externo de la tubería OD (in)	Cédula	Espesor de pared - t - (in)	Diámetro interno - d - (in)	Tipo de junta	psi
4	4.500	40ST	0.237	4.026	Soldada	430
		80XS	0.337	3.826	Soldada	695
6	6.625	40ST	0.280	6.065	Soldada	696
		80XS	0.432	5.761	Soldada	1209
8	8.625	30	0.277	8.071	Soldada	526
		40ST	0.322	7.981	Soldada	643
		80XS	0.500	7.625	Soldada	1106
10	10.75	30	0.307	10.136	Soldada	485
		40ST	0.365	10.020	Soldada	606
		XS	0.500	9.750	Soldada	887
		80	0.593	9.564	Soldada	1081

ANEXO 2


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE SOLDADURA**
REGISTRO DE PROCEDIMIENTOS PARA PRUEBAS HIDROSTÁTICAS (HRPH)

1. ESPECIFICACIONES INICIALES DE LA TUBERÍA DE PRUEBA							
Material:	Tubería de PVC						
Diámetro exterior (cm), [inch]	Diámetro nominal (cm), [inch]	Perímetro central (cm), [inch]	Espesor de pared	Área (cm ²)	Presión (psi)		longitud (cm)
					Diseño	Prueba	
11,56	10,16	36,1	7 mm	81,073386	100	300	110
[4,55]	[4]	[14,21]	long. (cm) x área (cm ²)		volumen (cm ³)		
2. VOLUMEN DE LLENADO:			110	81,0733862	8918,0725		

3. LECTURAS Y MEDICIONES DURANTE Y DESPUÉS A LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.					
Nº	Hora	Presión (psi)	Perímetro (mm)	Dilatación (mm)	Observaciones
1	15:30	100	362	1	sin fugas
2	15:31	200	363	2	sin fugas
3	15:33	300	365	4	sin fugas
4	15:40	0	363	2	dilatación mínima
5					

4. TIEMPO DE DURACIÓN DE LA PRUEBA (presurización): 10 min.

5. SE CONSIDERA SATISFACTORIO EL RESULTADO DE LA PRUEBA: Sí

Elaboró:
Fecha: 2010-02-12

Revisó:
Fecha: 2010-02-12

Aprobó:
Fecha: 2010-02-12

ANEXO 3


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE SOLDADURA**
REGISTRO DE PROCEDIMIENTOS PARA PRUEBAS HIDROSTÁTICAS (HRPH)

1. ESPECIFICACIONES INICIALES DE LA TUBERÍA DE PRUEBA							
Material:	Tubería de acero						
Diámetro exterior (cm), [inch]	Diámetro nominal (cm), [inch]	Perímetro central (cm), [inch]	Espesor de pared	Área (cm ²)	Presión (psi)		longitud (cm)
					Diseño	Prueba	
16,24	15,24	51	5 mm	182,41512	696	800	104
[6,39]	[6]	[20,07]					
				long. (cm) x área (cm ²)	volumen (cm ³)		
2. VOLUMEN DE LLENADO:				104	182,415119	18971,1724	

3. LECTURAS Y MEDICIONES DURANTE Y DESPUÉS A LA PRUEBA HIDROSTÁTICA.

Nº	Hora	Presión (psi)	Perímetro (mm)	Dilatación (mm)	Observaciones
1	18:50	200	510	0	sin fugas
2	18:53	400	511	1	sin fugas
3	18:55	600	513	3	sin fugas
4	19:00	780	514	4	presencia de fugas en cauchos
5	19:10	0	512	2	dilatación normal

4. TIEMPO DE DURACIÓN DE LA PRUEBA (presurización): 20 min.

5. SE CONSIDERA SATISFACTORIO EL RESULTADO DE LA PRUEBA: Sí

Elaboró:
Fecha: 2010-02-12

Revisó:
Fecha: 2010-02-12

Aprobó:
Fecha: 2010-02-12

Escuela de Formación de Tecnólogos

ORDEN DE ENCUADERNADO

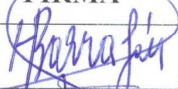

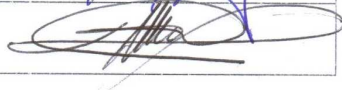
De acuerdo con lo estipulado en el ART. 17 del Instructivo para la Aplicación del Reglamento del Sistema de Estudios, dictado por la comisión de Docencia y Bienestar Estudiantil el 9 de Agosto de 2000, y una vez comprobado que se han realizado las correcciones, modificaciones y más sugerencias realizadas por los miembros del Tribunal Examinador para el proyecto escrito presentado por los señores:

ATAHUALPA CORTEZ HENRY RAMIRO

DELGADO MACÍAS JOSÉ IGNACIO

Se emite la presente orden de encuadernación con fecha: 06 de Abril de 2010

Para constancia firman los miembros de Tribunal Examinador:

NOMBRE	FUNCIÓN	FIRMA
Ing. Homero Barragán	Director	
Ing. Mario Granja	Miembro	
Ing. Willan Monar	Miembro	



 Ing. Carlos Posso Játiva
 DIRECTOR ESFOT