



“ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL”



“FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA”

“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INGENIERÍA INVERSA EN EL REDISEÑO DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA POR PRUEBA DE BURBUJA DE JUNTAS SOLDADAS”

“TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO”

LUIS ALFREDO CHIGUANO GUALOTUÑA
luis.chiguano@epn.edu.ec

DIRECTOR: “ING. MARÍA VERÓNICA SOTOMAYOR GRIJALVA”
“veronica.sotomayor@epn.edu.ec”

Quito, Enero 2022

“CERTIFICACIÓN”

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **CHIGUANO GUALOTUÑA LUIS ALFREDO**, bajo mi supervisión.



Firmado electrónicamente por:
**MARIA VERONICA
SOTOMAYOR
GRIJALVA**

ING. VERÓNICA SOTOMAYOR GRIJALVA, MSc.
DIRECTOR DE PROYECTO

“DECLARACIÓN”

“Yo, **Luis Alfredo Chiguano Gualotuña**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento”.

“A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente”.



Luis Alfredo Chiguano Gualotuña

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Luis y Rosario, a mis hermanos Doris, Darío y Andrés por todo el amor y el apoyo que siempre he recibido su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos y han hecho de mí, un hombre de bien.

A mi hija Sofia que iluminó mi vida desde que supe de su existencia, te amo
princesa.

Luis

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a mi Dios y a la Virgen por tener a mi familia completa y con salud en medio de esta pandemia mortal.

A mis padres Luis y Rosario, y mis hermanos Doris, Darío y Andrés por siempre brindarme su apoyo moral y económico, gracias a su paciencia, amor y constante apoyo he podido llegar hasta donde estoy.

A mi hija Sofia Valentina, quien con su sonrisa me motiva a seguir superando los obstáculos.

A mis familiares, amigos y otras personas que me han apoyado y he sentido su afecto a lo largo de toda mi vida.

A la Escuela Politécnica Nacional ya que gracias a su exigencia me formó para poder afrontar los problemas con soluciones a nivel personal y profesional.

A mi directora de tesis Ing. Verónica Sotomayor por su paciencia y orientación en la realización de mi proyecto de titulación.

A las empresas IMEC y VEATPETROLEUM por la oportunidad de comenzar una nueva etapa en el mundo profesional.

CONTENIDO

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Metodología de la Ingeniería Inversa.....	4
1.1.1 Método de criterios ponderados.....	7
1.2 Código API 650	9
1.3 Métodos de inspección no destructiva API 650.....	10
1.3.1 Técnicas de Inspección Superficial.....	11
1.3.2 Técnicas de Inspección Volumétrica.....	14
1.3.3 Técnicas de Inspección de Integridad o Hermeticidad	16
1.4 Inspección por Prueba de Vacío o de Burbuja.....	16
1.4.1 Temperatura superficial.....	18
1.4.2 Aplicación de la solución burbujeante.....	18
1.4.3 Presión de retención de vacío	19
1.4.4 Superposición de la cámara de vacío	20
1.4.5 Ayudas visuales e iluminación	20
1.4.6 Indicación de fugas y evaluación	21
1.5 Componentes de la cámara de vacío	21
1.5.1 Fuente de vacío.....	22
1.5.2 Vacuómetro	23
1.5.3 Eyector Venturi.....	24
1.5.4 Cámara de vacío	25
1.6 Personal Técnico.....	27
1.6.1 Educación.....	28
1.6.2 Capacitación.....	28
1.6.3 Experiencia.....	28

2.	Metodología.....	32
2.1	Introducción.....	32
2.2	Aplicación del Método de Ingeniería Inversa.....	32
2.3	Especificaciones técnicas de las cámaras de vacío.....	32
2.4	Método de criterios ponderados.....	35
2.4.1	Estudio y análisis de alternativas.....	35
2.4.2	Factores para el análisis de alternativas.....	38
2.4.3	Análisis de alternativas.....	39
2.4.4	Selección de la alternativa.....	45
2.5	Análisis de la cámara de vacío seleccionada.....	45
2.6	Re-diseño de la Cámara de vacío.....	47
2.6.1	Elementos de la cámara de vacío.....	47
2.6.2	Dimensionamiento de la cámara.....	58
2.7	Cálculo del espesor del acrílico.....	62
2.7.1	Teoría clásica de placas planas.....	62
2.7.2	Cálculo de la placa acrílica.....	69
2.8	Espesores de los empaques.....	83
2.9	Estimación de costos.....	86
3.	Resultados y Discusión.....	87
3.1	Cumplimiento del diseño de la campana de vacío para la inspección de tanques de almacenamiento.....	87
3.2	Análisis de costos de construcción.....	90
3.3	Comparación de costos de la cámara de vacío.....	93
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	95
4.1	Conclusiones.....	95
4.2	Recomendaciones.....	95
5.	Referencias Bibliográficas.....	96
6.	Anexos.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Delineamiento de la ingeniería inversa	5
Figura 1.2 Diagrama de procesos de Ingeniería Inversa	6
Figura 1.3 Clasificación de los END	11
Figura 1.4 Métodos de inspección visual	12
Figura 1.5 Método de partículas magnéticas	13
Figura 1.6 Método de tintas penetrantes	13
Figura 1.7 Método de Ultrasonido	15
Figura 1.8 Proceso radiográfico	15
Figura 1.9 Inspección de junta soldada por cámara de vacío.....	17
Figura 1.10 Representación gráfica de Ec. de vacío y Ec. manométrica respectivamente	20
Figura 1.11 Equipo de vacío	22
Figura 1.12. Bomba para generación de vacío.....	22
Figura 1.13 Compresor de aire	23
Figura 1.14 Vacuómetro	24
Figura 1.15 Efecto Venturi	25
Figura 1.16 Partes de una cámara de vacío	25
Figura 1.17 Etapas de la evaluación de un END.....	27
Figura 1.18 Cumplimiento del personal técnico.....	31
Figura 2.1 Partes de la cámara de vacío seleccionada	46
Figura 2.2 Vacuómetro	51
Figura 2.3 Niple hembra	52
Figura 2.4 Unión Macho.....	53
Figura 2.5 Venturi Mazzei 0784	57
Figura 2.6 Área de inspección	59
Figura 2.7 Dimensionamiento del acrílico	59
Figura 2.8 Dimensionamiento del empaque de caucho esponja	60
Figura 2.9 Dimensionamiento del empaque de esponja de alta densidad.....	60
Figura 2.10 Montaje de elementos.....	61
Figura 2.11 Plan medio de una placa.....	63
Figura 2.12 Distribución de carga en una placa rectangular.....	64
Figura 2.13 Superposición de esfuerzos en una placa empotrada	66
Figura 2.14 Placa acrílica con sus condiciones de borde	69
Figura 2.15 Círculo de Mohr	74
Figura 2.16 Teoría de energía de la distorsión.....	75

Figura 2.17 Factor geométrico de concentración de esfuerzos kt para una barra plana con orificio transversal en flexión	76
Figura 2.18 Método gráfico para hallar el factor de concentración de esfuerzos kt	77
Figura 2.19 Representación gráfica de la variación del espesor en función de la presión	81
Figura 2.20 Espesor de la placa del piso del tanque	84
Figura 2.21 Vista isométrica del empaque de caucho esponja.....	85
Figura 2.22 Espesor del empaque esponjoso	85
Figura 2.23 Vista isométrica del empaque de espuma de alta densidad	85
Figura 2.24 Espesor del empaque de espuma de alta densidad.....	86
Figura 3.1 Geometría fija del borde inferior de la placa acrílica.....	88
Figura 3.2 Presión en la parte inferior de la placa acrílica.....	88
Figura 3.3 Geometría fija del borde inferior de la placa acrílica.....	88
Figura 3.4 Geometría fija del borde inferior de la placa acrílica.....	89
Figura 3.5 Esfuerzo de Von Mises mediante simulación	89
Figura 3.6 Costo porcentual por parámetro de construcción	92
Figura 3.7 Valores totales de las cámaras de vacío analizadas	93
Figura 3.8 Valores porcentuales de las cámaras de vacío	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Requisitos de un procedimiento de prueba de fugas por cámara de vacío..	18
Tabla 1.2. Horas de entrenamiento por técnica no destructiva.....	28
Tabla 1.3. Tiempo de experiencia de acuerdo al nivel del inspector.	30
Tabla 2.1 Cámara de vacío número 1.....	33
Tabla 2.2 Cámara de vacío número 2.....	33
Tabla 2.3 Cámara de vacío número 3.....	34
Tabla 2.4 Cámara de vacío número 4.....	34
Tabla 2.5 Cámara de vacío número 5.....	35
Tabla 2.6 Descripción de la cámara de vacío número 1.....	36
Tabla 2.7 Descripción de la cámara de vacío número 2.....	36
Tabla 2.8 Descripción de la cámara de vacío número 3.....	37
Tabla 2.9 Descripción de la cámara de vacío número 4.....	37
Tabla 2.10 Descripción de la cámara de vacío número 5.....	38
Tabla 2.11 Evaluación del peso específico de cada criterio	40
Tabla 2.12 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de ensamblar.....	41
Tabla 2.13 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de manufacturar .	41
Tabla 2.14 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de mantenimiento	42
Tabla 2.15 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de operación.....	42
Tabla 2.16 Evaluación del peso específico para el criterio seguridad	43
Tabla 2.17 Evaluación del peso específico para el criterio peso.	43
Tabla 2.18 Evaluación del peso específico para el criterio costo	44
Tabla 2.19 Peso ponderado de las cámaras por cada criterio.....	44
Tabla 2.20 Cuadro final del análisis de criterios ponderados	45
Tabla 2.21 Cámara de vacío VBT CO.....	45
Tabla 2.22 Características del acrílico respecto a otros materiales.....	47
Tabla 2.23 Propiedades físicas del acrílico	48
Tabla 2.24 Propiedades mecánicas del acrílico	48
Tabla 2.25 Aplicaciones del caucho en función de la dureza	49
Tabla 2.26 Características del empaque del caucho esponja	50
Tabla 2.27 Características del empaque de la esponja de alta densidad	51
Tabla 2.28 Características del vacuómetro	52
Tabla 2.29 Grados de vacío Normalizado	53
Tabla 2.30 Unidades de medición de vacío	54
Tabla 2.31 Rendimiento de Inyectores.....	55
Tabla 2.32 Capacidad de succión del aire	56

Tabla 2.33 Compresor Seleccionado	58
Tabla 2.34 Tabla de la variación del espesor en función de la presión para cada rendimiento.....	80
Tabla 2.35 Interpolación para los espesores de 12mm y 15mm	82
Tabla 2.36 Presión de trabajo para los espesores disponibles en el mercado	82
Tabla 2.37 Detalle de materiales usados	86
Tabla 3.1 Detalle de materiales usados	87
Tabla 3.2 Detalles de costos de construcción	91
Tabla 3.3 Detalles de costos por parámetro.....	92
Tabla 3.4 Detalle de materiales usados	93

ANEXOS

ANEXO I Proforma para la cámara de vacío No. 4	101
ANEXO II Costo del manómetro	102
ANEXO III Costo del caucho esponja	103
ANEXO IV Costo de la lámina acrílica.	104
ANEXO V Rendimiento Venturi 0784-Sistema Inglés.....	105
ANEXO VI (Continuación) Rendimiento de Venturi 0784-Sistema Métrico.....	106

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo aplicar el método de ingeniería inversa para el rediseño de una cámara de vacío para inspección no destructiva por prueba de burbuja de juntas soldadas. La industria petrolera exige calidad cuando de fabricación se trata, es por ello, que se efectúa un análisis de los códigos que rigen a la técnica no destructiva Prueba de burbuja con la finalidad de efectuar el re-diseño de una cámara de vacío junto con la selección de materiales y equipos, de manera que se dé cumplimiento a los requerimientos de inspección de las uniones soldadas de fondo y techo de los tanques de almacenamiento, de esta manera, se busca brindar a las unidades verificadoras ecuatorianas y demás compañías encargadas de brindar esta técnica no destructiva la oportunidad de fabricar su propia campana de vacío a un costo bajo y rentable en comparación a lo ofrecido en el mercado nacional y extranjero.

Se realiza una extracción de información del código API 650, ASME Sección V, ASTM E515 referente a tanques de almacenamiento, prueba de vacío y la cámara de vacío, dicha información mediante el método de ingeniería inversa sirve para determinar la ruta de trabajo. Se realiza un análisis de las opciones de cámaras de vacío que el mercado ofrece y mediante la matriz de criterios ponderados estudiar aquellas cuyo peso ponderado es mayor y conjuntamente también rescatar características importantes de algunas de ellas que aporten en este estudio de re-diseñar una cámara de vacío. A paso siguiente se procedió a seleccionar los materiales, accesorios y equipo en base a lo que ofrece el mercado nacional para posteriormente dimensionar tomando en cuenta los parámetros establecidos en el código API 650, realizando el cálculo del espesor de la ventana transparente de acrílico y lo propio con los empaques en base a catálogos de empaques, en tanto que, el re-diseño fue realizado mediante un paquete computacional. Finalmente se estimó el costo de la cámara de vacío para finalmente comprar los valores y diagnosticar si la construcción de este equipo es factible en el país.

Palabras clave: Código API 650, cámara de vacío, juntas soldadas, presión, ASME Sección V, prueba de vacío, tanque de almacenamiento.

ABSTRACT

The object of this project is applied Reverse Engineering Method for redesign a vacuum chamber for non-destructive inspection by bubble test of welded joints. Oil industry requires quality in the manufacturing, by that; is necessary an analysis of the codes that manage the non-destructive technique of the Bubble Test to redesign a vacuum chamber, selection of materials and equipment; and achieve with the inspection requirements of the bottom and roof welded joints of the storage tanks. Then, this project seeks to providing in Ecuador the opportunity to manufacture a low cost and profitable vacuum hood compared with equipment offered in national and foreign market.

Next, determine the work path with a review of information from the API 650, ASME Section V, ASTM E515 code referring to storage tanks, vacuum test and the vacuum chamber. Followed by, an analysis of the options of vacuum chambers that market offers and get a Weighted Criteria Matrix to identify important characteristics and choose the best alternative for the redesign.

Then, select the materials, accessories and equipment according the supplies in the local market for sizing with the parameters established in the API 650 code and computational calculations, for example, thickness of the transparent acrylic window and seals based on sealing catalogs. Finally, estimate the cost of the vacuum chamber and diagnose if the construction of this equipment is feasible in Ecuador.

Keywords:

API 650 Code, Vacuum Chamber, Welded Joints, Pressure, ASME Section V, Vacuum Test, Storage Tank.

“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INGENIERÍA INVERSA EN EL REDISEÑO DE UNA CÁMARA DE VACÍO PARA INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA POR PRUEBA DE BURBUJA DE JUNTAS SOLDADAS”

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador al fabricar tanques exclusivamente para almacenar petróleo se rige principalmente por el Código API 650, donde se encuentran establecidas las exanimaciones no destructivas para el control correspondiente de calidad de las uniones soldadas existentes [1]. Una de ellas es la prueba de cámara de vacío que gracias a la diferencia de presión generada entre el interior de la cámara y el ambiente pueden detectarse indicaciones abiertas a la superficie en las uniones soldadas; su aplicación como método de inspección no destructivo de tanques en el país es muy baja dado que la oferta nacional de este tipo de equipos es inexistente [2], además, el elevado costo que representa la importación este tipo de equipos del mercado internacional hace difícil su accesibilidad. Considerando en implementar este equipo en empresas dedicadas a la aplicación de ensayos no destructivos, se efectúa este estudio para proponer un diseño de cámara de vacío para inspeccionar juntas soldadas de tanques y que en un futuro estudio sea propuesta la construcción, buscando que su costo sea accesible.

Se enlistan los factores que limitan la comercialización de este tipo de equipos en el país:

- a) Producción y comercialización bajo pedido.
- b) La poca acogida en el medio ya sea por desconocimiento o facilismo.
- c) Costo que requiere la adquisición del equipo.
- d) La decaída industrialización del mercado nacional.
- e) Escases de empresas que desean adquirir el equipo.
- f) El pensamiento del cliente (comúnmente considera un gasto adicional y no una inversión productiva).

La ingeniería inversa permite mejorar el proceso de reconstrucción y modificación de cualquier pieza. Son diversas las causas por las que en ocasiones se tiene una pieza y se desea reproducir. Tal es el caso de partes de las que se requieren cambios periódicos y que necesitan ser actualizadas continuamente.

Las juntas de soldadura pasan por un proceso de inspección, el mismo ha ido actualizándose hasta llegar a convertirse en un proceso industrial de tal magnitud que es

usado en gran parte del campo ingenieril, esto se debe a que, al desarrollo de recomendaciones y parámetros que no solo controlan el proceso sino que también garantiza una inspección visual eficiente; un desarrollo del proceso requiere de manera obligatoria un personal capacitado (experiencia, capacitación y certificación) para poder efectuar una inspección, para la instrucción del mismo existen estándares y normas que guían su proceso de aprendizaje y preparación. Con una mejora del personal no solo se refiere a la rama ingenieril, dentro del área técnica existe un crecimiento, en donde, es requerido también la calificación y certificación de su personal (soldadores, tuberos, reparadores, entre otros) y los procesos que dentro de la misma se desarrollan (Soldadura, reparación, mantenimiento, entre otros). [3] Se efectúa un estudio de la técnica de inspección por cámara de vacío para inspeccionar los tanques de almacenamiento y cuya información se encuentra compilada en el código API 650 y respaldada en el código ASME sección V artículo 10.

Entre toda la información que pudiera ser recopilada de documentos cuya veracidad sea comprobada se rescata lo que son: parámetros a cumplir de la prueba de vacío, requisitos de los inspectores, variantes de cámaras de vacío disponibles en el mercado, materiales usados en este tipo de equipos, entre otros; y posteriormente mediante la aplicación del método de ingeniería inversa utilizar esta información y diseñar una cámara de vacío, es decir, dimensionar, seleccionar los materiales y calcular los espesores que sean necesarios, seleccionar los equipos y accesorios complementarios para realizar una inspección no destructiva por cámara de vacío. Finalmente establecer la estimación de costos que representará construir este tipo de equipos en el país y comparar con los ofertados en otros mercados y de esta manera, establecer las conclusiones pertinentes.

Objetivo general

Aplicar el método de ingeniería inversa para el rediseño de una cámara de vacío para inspección no destructiva por prueba de burbuja de juntas soldadas.

Objetivos específicos

- Obtener información fundamental acerca del método de ingeniería inversa.
- Comprender los requisitos y parámetros que deben cumplirse para poder efectuar la prueba de vacío según el código API 650.
- Comprender el principio de funcionamiento de la cámara de vacío y las funciones que cumplen las partes principales de la misma en la aplicación de la técnica de prueba de vacío.
- Definir los materiales y efectuar el cálculo de los espesores que sean necesarios de los cuales se va a componer la cámara de vacío con la finalidad de establecer su geometría y posteriormente elegir los equipos y accesorios que permitan su funcionamiento.
- Estimar el costo de la cámara de vacío propuesta.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Metodología de la Ingeniería Inversa

Dentro de las empresas se realizan tareas y actividades programadas con antelación, lo más común a nivel general son por ejemplo renovaciones tecnológicas en maquinaria y equipos, el mantenimiento preventivo o correctivo de los mismos donde ya se encuentre previsto la reparación o cambio de componentes, llevar los productos a mercados conocidos y nuevos, entre las más importantes; toda actividad debe llevar una planificación basada en metodologías que precisamente optimizan recursos y tiempo sin descuidar u omitir puntos importantes de una actividad. [4] Una de las metodologías que se usan con dicha finalidad toma el nombre de Ingeniería Inversa, comúnmente puesta en práctica para producir una versión mejorada del producto o una copia [5]. La aplicación de esta metodología ha resultado ser no solo una efectiva estrategia de enseñanza sino también una excelente herramienta para la innovación, con la meta de al formar ingenieros, estos tengan las bases suficientes en lo que al diseño se refiere.

Este gran proceso llamado Ingeniería inversa es utilizada ampliamente realizar análisis, procesos de mediciones, incluso pruebas controladas con la finalidad de re-diseñar un objeto a imagen y semejanza y finalmente reproducirlo; un ejemplo sencillo es la recreación o reproducción de componentes con un alto valor de comercialización en sectores importantes como lo es el industrial, y es que esto dentro de los negocios es visto como algo normal y muy lucrativo, es por ello que, el ingeniero encargado de realizar esta tarea debe conocer en su plenitud el funcionamiento de la pieza original a reproducir y el proceso característico que va a permitir su delineamiento o ciclo (Figura 1.1). [4] A nivel profesional han sido varias las organizaciones que han definido a la ingeniería inversa desde el punto de vista de cada una de ellas, por ejemplo, la Sociedad de Ingenieros de Fabricación (SME, Society of Manufacturing Engineers) asevera que el uso de la ingeniería inversa “comienza con un producto o proceso terminado y trabaja de manera lógica para descubrir la nueva tecnología subyacente” [6],

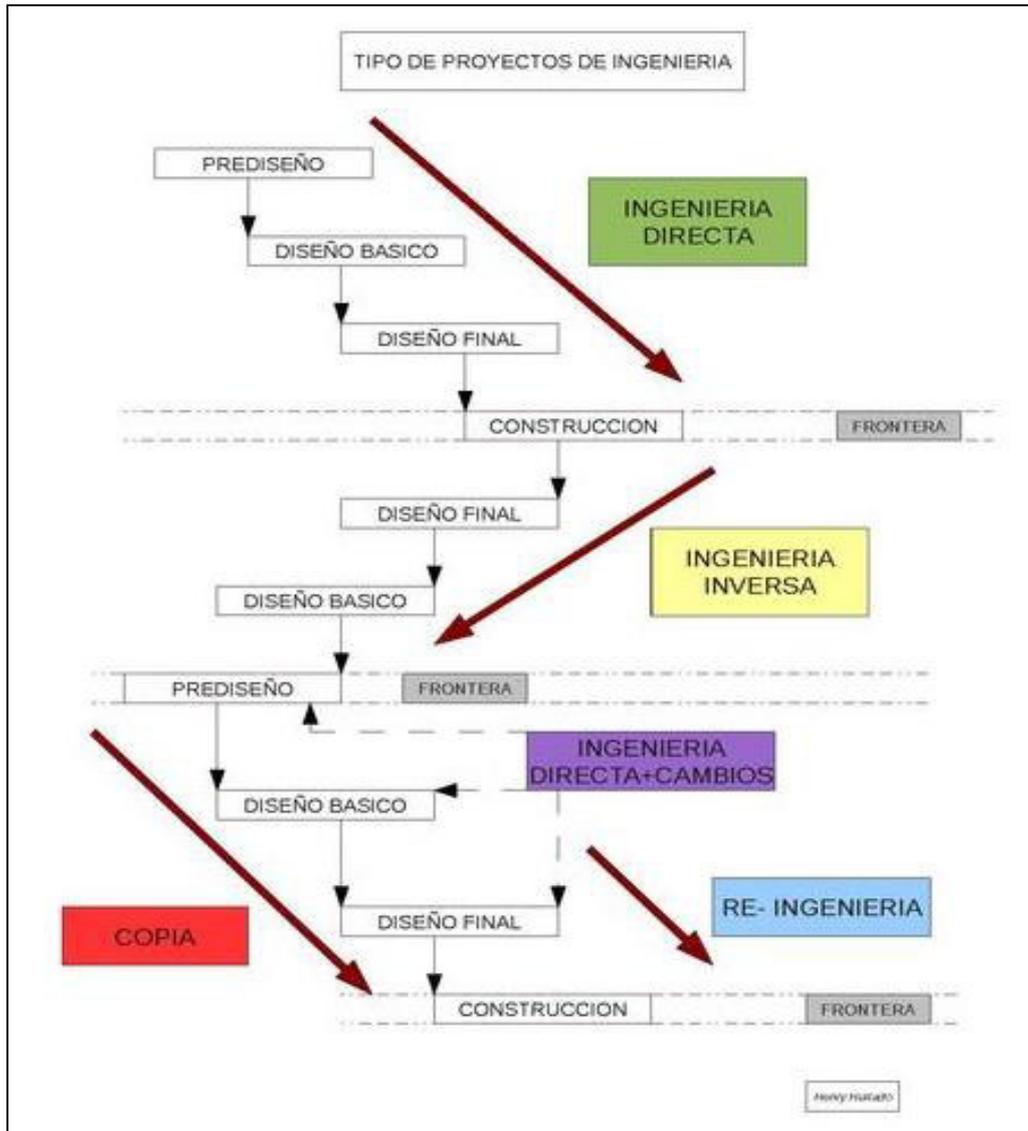


Figura 1.1 Delineamiento de la ingeniería inversa
(Fuente: [6])

De acuerdo con Jiménez E., [7] “la Ingeniería Inversa también es considerada como un proceso de sistematización, es decir, un proceso que pone de manifiesto o explicita las relaciones objetivas entre los elementos y las relaciones que hacen posible la existencia de un objeto, para posteriormente construir un modelo de dicho objeto. De hecho, la especialidad de la Ingeniería inversa hace posible su aplicación en diversos campos del conocimiento y, por lo tanto, a diversos casos particulares diferentes entre sí, lo que implica la existencia de una multiplicidad de métodos de análisis. En este sentido la Ingeniería inversa es una colección de métodos o, equivalentemente, una metodología.”

Hay una metodología que está asociada perfectamente con la definición de Ingeniería Inversa, la cual permite relacionar y obtener fases que llevan a cabo una secuencia lógica de estudio y análisis de la Ingeniería inversa (Ver Figura 1.2).

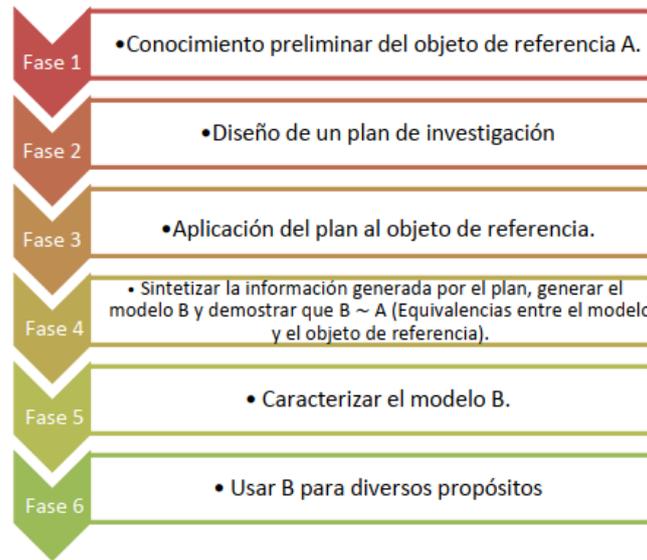


Figura 1.2 Diagrama de procesos de Ingeniería Inversa
(Fuente: [7])

FASE 1

En esta fase inicial se efectúa un estudio del objeto mediante la recopilación de información de cualquier medio disponible, en ciertos casos, la recolección de información es realizada mediante pruebas de laboratorio.

FASE 2

Esquematizar un plan de investigación con la finalidad de sintetizar la información y darle una estructura ordenada al estudio, donde se describan los procedimientos a ser ejecutados.

FASE 3

Fase donde se aplican los objetos estudiados y los procedimientos seleccionados al objeto de estudio.

FASE 4

Efectuar un análisis en paralelo de los objetos (objeto analizado y el objeto generado) de manera que sean demostradas las características mejoradas del objeto generado.

FASE 5

Esta fase describe una nueva caracterización del objeto generado, en donde, se definen las nuevas características y los nuevos límites que lo re direccionan.

FASE 6

Como última fase se implementa el nuevo objeto generado con mejoras y limitaciones y se verifica la funcionalidad y utilidad del objeto.

Dichas fases se describen mediante un procedimiento:

- a) Es mostrado el elemento A.
- b) Las referencias y características del elemento A son definidas.
- c) Los objetivos son escritos y definidos.
- d) Con las dos anteriores, es delineado el proceso que conlleva a una investigación.
- e) El resultado generado del literal d) se conoce como plan de investigación.
- f) Al elemento A se lo aplica el plan de investigación establecido
- g) El resultado del paso f) es información de A.
- h) Se considera el paso c) y con los resultados del paso g) se genera B
- i) B es un modelo.
- j) Se verifica, según el paso c), si B es equivalente a A.
- k) Se realizan las respectivas conclusiones.
- l) Se evalúa B.
- m) B es aplicable.

La aplicación del método brinda ventajas, entre las principales: es empleado en el duplicado de partes y componentes, permite ordenar el proceso de ingeniería inversa, dentro del diseño del plan de investigación es importante para el desarrollo de procedimientos y programas donde se caracteriza al objeto a ser referenciado y re-diseñado, asegura la presencia de indicadores que determinan la equivalencia entre el objeto original y el reproducido.

1.1.1 Método de criterios ponderados

Es un método de evaluación de soluciones que comúnmente es aplicado en las diferentes etapas del proceso de diseño, posterior a cada listado de alternativas, ya que, se efectúa una evaluación de las mismas con la finalidad de que puedan usarse de base para una posterior toma de decisiones y las mismas tengan un respaldo ingenieril sustentado.

La presencia de dos elementos es indispensable cuando de tomar una decisión se trata:

- a) *Alternativas*: Lo recomendado es disponer de entre 3 a 6 alternativas, y como mínimo se requiere de 2 alternativas, cada alternativa debe diferenciar sus características.
- b) *Criterios*: En base a los criterios establecidos se efectúa la evaluación de las alternativas seleccionadas, igualmente también se realiza la ponderación relativa entre las mismas.

Este tipo de evaluaciones usualmente no se centran sobre un elemento o componente determinado, sino más bien, su enfoque se centra en la ponderación de diversos aspectos del elemento o componente en base a criterios que frecuentemente implican juicios de valor también denominados como métodos de evaluación y se agrupan de la siguiente manera:

- **Métodos Ordinales**

La persona evaluadora clasifica de manera ordenada las diferentes alternativas para cada criterio. El problema que se ocasiona con este tipo de métodos radica en lo difícil de integrar los resultados de los diferentes criterios en una evaluación global, esto se debe a que no es sensible a la ponderación de cada criterio.

- **Métodos Cardinales**

La persona evaluadora debe cuantificar o valorar sus juicios con respecto a la efectividad de las alternativas y los criterios por su nivel importancia dentro del elemento. La ventaja de este tipo de métodos es que hace fácil la integración de las evaluaciones parciales y obtener un solo resultado global, por otro lado, existe un inconveniente en la cuantificación ya que a menudo resulta arbitraria, en especial en las etapas iniciales del diseño.

- **Método ordinal corregido de criterios ponderados**

En su mayoría, cuando se trata de la selección entre diferentes soluciones (en especial en la etapa de diseño conceptual) este método es bastante recomendado y se aplica teniendo en cuenta el orden en base a las preferencias que requiere sean controladas, ya que, sin la necesidad de realizar la evaluación de los parámetros de cada propiedad y aún más sin la necesidad de estimar numéricamente el peso de cada criterio, es posible obtener resultados globales satisfactoriamente significativos. [8]

El método usa tablas en las cuales cada criterio (o solución, para un criterio específico) se evalúa con el resto de criterios (o soluciones) y posteriormente son asignados los siguientes valores: [8]

- 1 Si el criterio (o solución) de las filas es mayor (superior, >) que el criterio de las columnas.
- 0,5 Si el criterio (o solución) de las filas es igual (equivalente, =) al criterio de las columnas.
- 0 Si el criterio (o solución) de las filas menor (inferior, peor, <) que el criterio de las columnas.

Posteriormente, para cada criterio (o solución), se efectúa la sumatoria de los valores asignados en relación al resto de criterios (o soluciones), al que se añade una unidad con la finalidad de que el criterio o solución menos favorable obtenga un valor nulo, en otra columna se realiza el cálculo de los valores ponderados de cada criterio (o solución). [8] Es importante recalcar que el peso de ponderación es seleccionado y no necesariamente deben ser los mismos valores, también es común encontrar pesos ponderados en donde se muestra un valor y su recíproco también sea utilizado.

1.2 Código API 650

El código API 650 es un documento estándar encargado de cubrir los requerimientos en materiales, diseño, fabricación, montaje, métodos de inspección de juntas, calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores para tanques de almacenamiento, cilíndrico, vertical, sobre el suelo, cerrado y abierto, soldados, de tamaño variable y capacidades de almacenamiento que cubre presiones internas próximas a la presión atmosférica, en casos particulares se permite presiones internas más altas cuando se cumple con requerimientos adicionales (requerimientos mínimos para el diseño de tanques de almacenamiento sujeto a cargas sísmicas). Este código se aplica solo a tanques en donde el fondo es uniformemente soportado y también para tanques en servicio no refrigerado que tienen una temperatura máxima de diseño de 90°C o menos. [9]

API 650 solamente cubre los tanques en los cuales se almacenan fluidos líquidos y están contruidos de acero con el fondo uniformemente soportado por una cama de hormigón, grava, arena o asfalto, diseñados para soportar una presión de operación atmosférica o menor a 18 kPa (2.61 psi) o presiones internas que no excedan el peso del techo por unidad de área y una temperatura de operación no mayor a 93 °C. [9] Un apartado importante del

código son las técnicas de inspección no destructiva de juntas, conceptualizadas a continuación.

1.3 Métodos de inspección no destructiva API 650

Los Ensayos No Destructivos (END) se definen como métodos que utilizan o principios físicos o principios químicos, con la finalidad de evaluar indirectamente los materiales sin afectar, modificar, alterar o deteriorar en la utilización futura del objeto. Un END principalmente es aplicado para detectar discontinuidades metalúrgicas, verificar la dimensionalidad de un objeto, verificar un ensamblaje apropiado, detectar algún tipo de material extraño. El conocimiento acerca de los END da una ventaja al inspector, esto permite que se trace una guía al momento de efectuar una prueba, es importante, saber diferenciar ciertos términos esenciales que se manejan dentro de los END como lo es discontinuidad, defecto e indicación.

- a. *Discontinuidad*: técnicamente se define como la interrupción en la homogeneidad intencional o no de un material o componente, es decir, es la falta de continuidad o cohesión del mismo
- b. *Defecto*: Indicación relevante (con tamaño, forma, orientación o ubicación) que se encuentra fuera de los criterios de aceptación de un código o norma bajo el cual se realiza el END.
- c. *Indicación*: También llamado imperfección, es toda respuesta (desviación o cambio) cualitativa a la aplicación de un método no destructivo.

La clasificación de los END más utilizada se basa de acuerdo a la posición donde se ubican las discontinuidades, en la Figura 1.3 se enlistan las técnicas no destructivas de acuerdo a la clasificación mencionada:

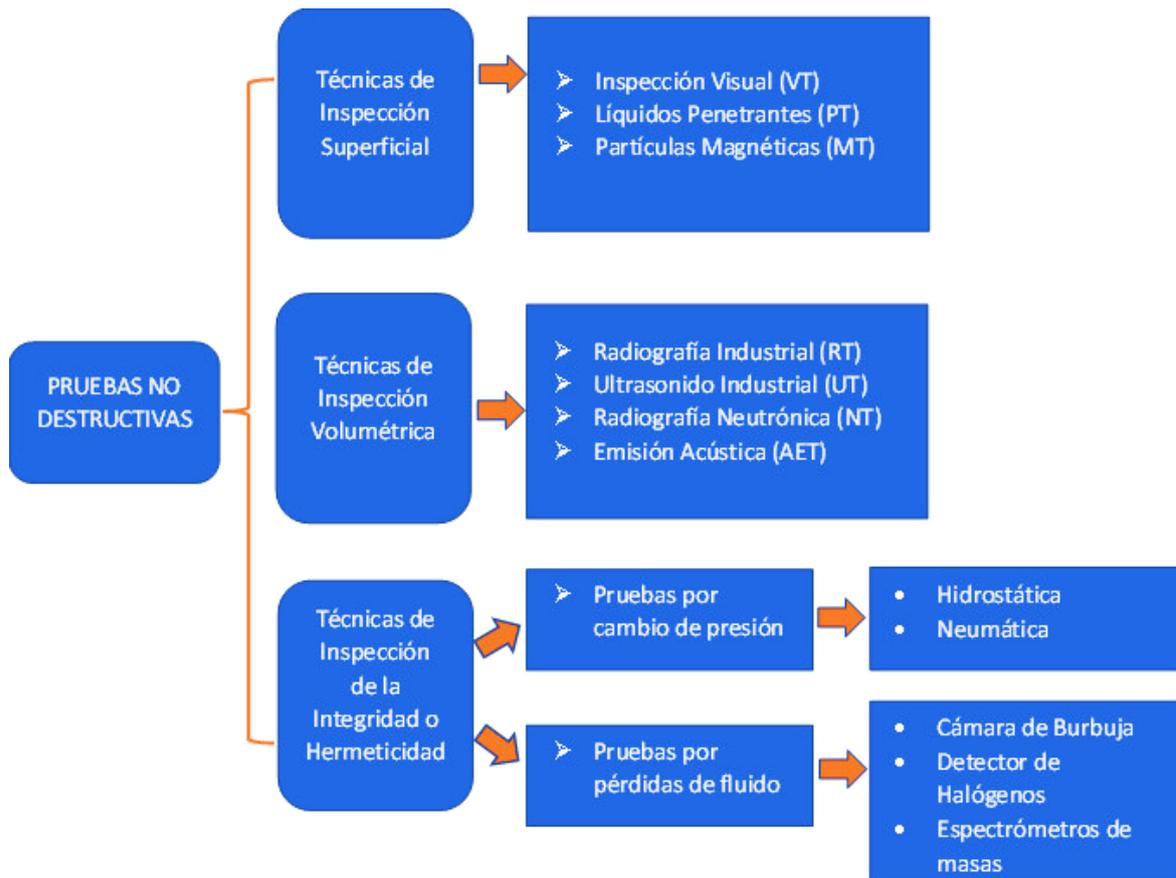


Figura 1.3 Clasificación de los END
(Fuente: [10])

1.3.1 Técnicas de Inspección Superficial

Mediante este tipo de técnicas se comprueba la integridad superficial del material, se utilizan cuando se desea detectar discontinuidades en la superficie, abiertas o a profundidades menores de 3mm. [11] El código API 650 aplica 3 técnicas superficiales: inspección visual, líquidos penetrantes y partículas magnéticas.

- Inspección Visual - VT

Es un ensayo no destructivo utilizado para determinar discontinuidades del tipo superficial en las soldaduras, es importante ya que inicialmente se utiliza en la evaluación general del tanque, tal ensayo puede aplicarse de forma directa e indirecta (Ver Figura 1.4), es decir, solo la vista o con la ayuda de varios instrumentos como el uso de espejos, magnificadores, linternas, reglas, calibrador, micrómetro, galga, luxómetro, removedor de escoria, entre otros. [3]

Al igual que cualquier otro método, la inspección visual tiene sus limitaciones como: realizar solo exámenes superficiales, es de variable y poca resolución, causa fatiga y distracción a los ojos, necesariamente requiere de buena iluminación y se debe tener acceso visual al área a ser inspeccionada. La inspección visual de soldadura debe realizarse al 100% en las juntas a tope y de filete de los elementos que formen parte del tanque con penetración completa o parcial según se requiera.

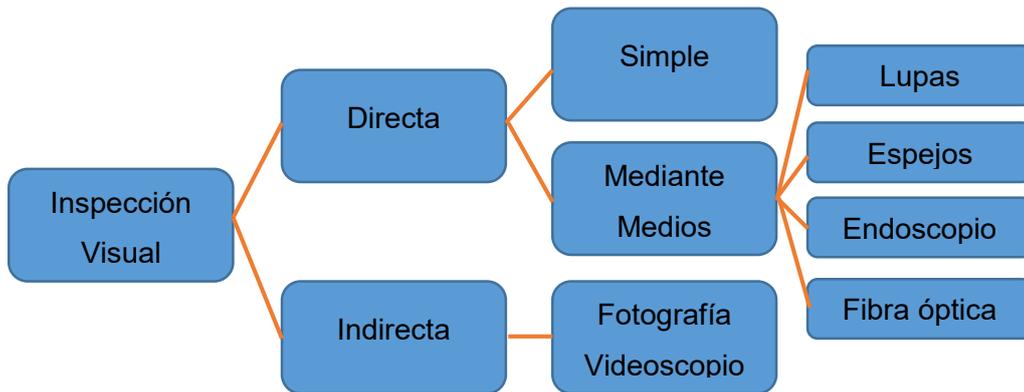


Figura 1.4 Métodos de inspección visual

(Fuente: [12])

- Inspección por Partículas Magnéticas – MT

Este método de inspección permite localizar discontinuidades sub-superficiales y también superficiales en materiales ferromagnéticos como el acero. Utiliza el magnetismo como principio físico para inspeccionar. Este tipo de materiales poseen un poder de atracción o capacidad hacia otros metales, es decir, cuando un metal es magnético, hay atracción en sus extremos o polos a otros metales que igualmente poseen la propiedad magnética o la capacidad de magnetizarse. [13] (Ver Figura 1.5)

Ahora cuando un material presenta discontinuidades, las mismas funcionarán como polos, de esta manera, van a generar atracción con materiales magnéticos o ferromagnéticos siempre y cuando se encuentren cercanos. De modo que un metal magnético se lo puede magnetizar global o localmente y en su superficie se esparce partículas o polvo de material ferromagnético con alta permeabilidad que será acumulada justamente en las discontinuidades presentes sea superficiales o sub-superficiales del material inspeccionado. [3] Este método es aplicable para detectar discontinuidades perpendiculares a las líneas de fuerza del campo magnético. De acuerdo al tipo de magnetización, los campos que se inducen en los materiales son longitudinales o circulares.

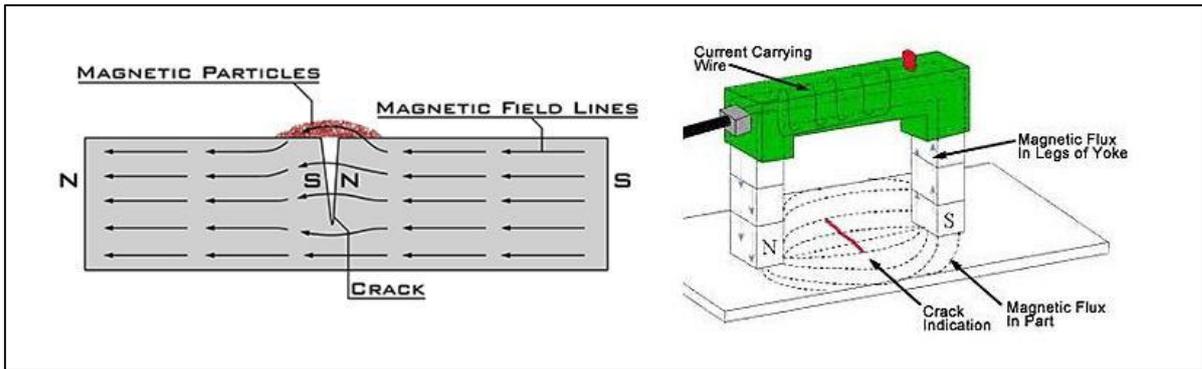


Figura 1.5 Método de partículas magnéticas

(Fuente: [14])

Con este método las discontinuidades más importantes y abundantes a ser detectadas son las que se abren a la superficie, mediante partículas magnéticas se detectan con mayor facilidad y de una manera más rápida en comparación al método de tintas penetrantes.

- Inspección por Líquidos Penetrantes – PT

Es un método de inspección superficial cuyo principio físico de funcionamiento toma el nombre de capilaridad, el método consiste en aplicar un líquido que puede ser del tipo colorante o fluorescente (penetrante), con excelentes características de penetración, capaz de incrustarse en pequeñas discontinuidades encontradas en la superficie limpia de suciedad del material inspeccionado, seguido de una limpieza del exceso de líquido en los alrededores de la junta de soldadura y posteriormente se rocía otra sustancia (revelador) que se encarga de la extracción del líquido penetrante del interior de las discontinuidades (Ver Figura 1.6), hay que acotar que dichos líquidos toman colores diferentes. [15]

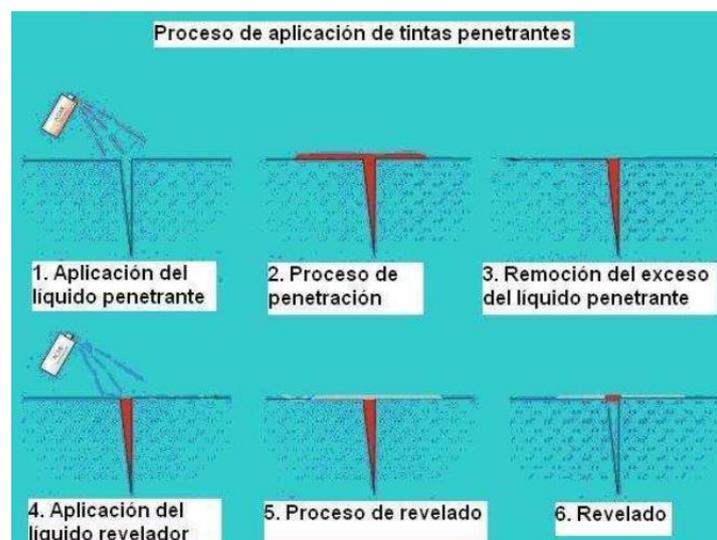


Figura 1.6 Método de tintas penetrantes

(Fuente: [2])

El método de tintas penetrantes se aplica tanto a materiales ferromagnéticos como a los no ferromagnéticos tomando en cuenta que el material no debe ser poroso; una de las desventajas de este método es el tiempo, es una inspección relativamente larga en comparación al método de partículas magnéticas; una ventaja del método es que los equipos son de menor costo en comparación al mismo método anterior, por ello, no es costoso si se trata de una inspección unitaria y el traslado de los equipos se facilita enormemente. [15]

Cuando se trata de una discontinuidad fina y delgada o existe el requerimiento de una alta sensibilidad, se recomienda emplear penetrantes del tipo fluorescente; cuando se trata de discontinuidades con un tamaño relativamente grande o el requerimiento de una sensibilidad entre baja y normal, es recomendable usar penetrantes del tipo visible. La superficie del material a inspeccionar es también otro factor a considerar; por ejemplo, existen casos donde la superficie a trabajar es rugosa o burda, algo común de encontrar en uniones soldadas o en piezas fundidas, en este sentido, se recomienda utilizar un penetrante líquido que sea fácilmente removible con agua; para el caso en que la superficie del material es tersa y pulida, se puede emplear un penetrante fácilmente removible con solvente.

1.3.2 Técnicas de Inspección Volumétrica

Mediante estas técnicas se conoce la integridad de un material en su espesor y a su vez, detectar discontinuidades internas que no son visibles en la superficie de la junta. [11] Las técnicas de inspección reconocidas por el código API 650 son: inspección por ultrasonido y el método radiográfico.

- Inspección por Ultrasonido - UT

Este método de inspección está basado en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales, el método ofrece resultados como el tamaño, posición, cantidad, tipo y otras características de las discontinuidades, en comparación al método radiográfico el costo es menor, brinda resultados más rápidos y en la mayoría de los casos no es posible tener registros permanentes, en la Figura 1.7 se observa el ensayo ultrasónico. [16] El principio de funcionamiento está basado en la impedancia acústica, aquella que es el resultado del producto entre la velocidad máxima de propagación del sonido y la densidad propia del material. En general, los equipos

utilizados para la inspección ultrasónica permiten detectar discontinuidades superficiales, sub-superficiales e internas, para ello, es indispensable que el equipo y el palpador tengan un rango de frecuencia adecuado (rango de frecuencia entre 0.25 - 25 MHz). El sonido mientras recorre el material se refleja por las interfaces existentes haciendo que sea detectado y posteriormente analizado con la finalidad de determinar la presencia y ubicación de las discontinuidades. [17]

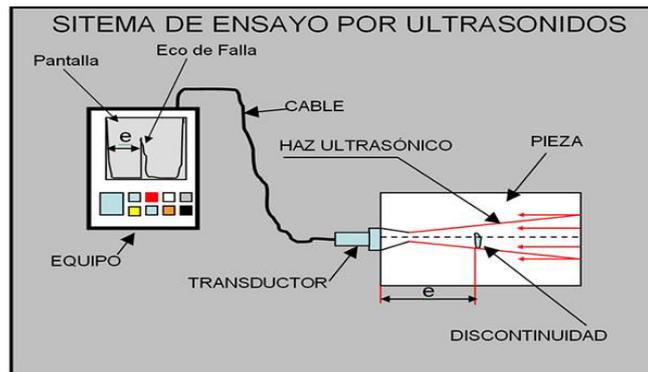


Figura 1.7 Método de Ultrasonido

(Fuente: [2])

- Inspección Radiográfica - RT

Es una técnica de inspección volumétrica que realiza la inspección de una pieza basándose en las propiedades de los rayos x y los rayos gamma como es la propagación de energía a través de los materiales, de esta manera se produce una atenuación que es proporcional al espesor, densidad y estructura del material, posteriormente la energía que atraviesa el material pasa a ser registrada en una película radiográfica, y mediante un proceso químico de revelado se hace visible el registro grabado en la película. [16]. Ver Figura 1.8 del proceso radiográfico.

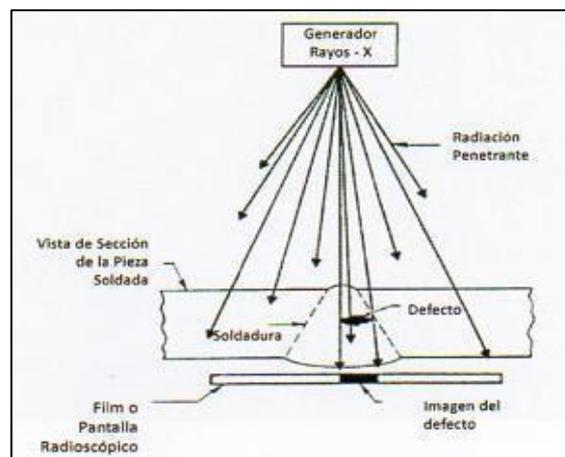


Figura 1.8 Proceso radiográfico

(Fuente: [18])

La ventaja más destacada de aplicar esta técnica de inspección es que se obtienen registros permanentes con la dimensión real de la pieza, el costo que representa este equipo es alto en comparación a otras técnicas. Antes de aplicar la técnica en tanques hay que abrir la compuerta con el objetivo de inspeccionar el estado del interior del tanque, a paso siguiente, se evacuan los residuos del interior del tanque como lo es el gas (desgasificación), y sustancias como agua, crudo, entre otros; el realizar esta evacuación demanda de mucho tiempo pudiendo llegar a ser días hasta que el ambiente interno del tanque sea apto para realizar la inspección radiográfica. [16]

Es necesario realizar inspección radiográfica a soldaduras a tope de la envolvente, soldaduras a tope de la plancha anular del fondo, soldaduras a tope de las conexiones efectuadas a ras. No se solicita la inspección radiográfica cuando se trata de soldaduras del techo, soldaduras del fondo, soldaduras de la junta envolvente-anillo superior o techo-anillo superior, soldaduras de la junta envolvente-fondo, soldaduras de los accesorios del tanque.

1.3.3 Técnicas de Inspección de Integridad o Hermeticidad

Son técnicas que permiten comprobar la capacidad ya sea de un recipiente o un componente para contener un fluido (gaseoso o líquido) a una presión inferior, igual o mayor a la presión atmosférica, esto sin que exista una caída de presión considerable o pérdida del volumen del fluido de prueba durante un tiempo de prueba establecido. [11] API 650 establece solamente una técnica de hermeticidad y es la Prueba por cámara de vacío, que se detalla en el siguiente apartado.

1.4 Inspección por Prueba de Vacío o de Burbuja

Esta técnica de inspección se efectúa en las juntas soldadas de fondo y techo, tanto en la construcción como en la reparación de los tanques de almacenamiento. La inspección de las soldaduras del tanque se efectúa a través de una cámara de vacío con las dimensiones 150 mm (6 pulg) de ancho por 750 mm (30 pulg) de largo y la parte superior de la cámara debe ser transparente para una apreciación visual de las juntas. Durante la inspección debe existir una adecuada iluminación de manera que se pueda interpretar correctamente los resultados que se presenten. La parte abierta de la cámara será sellada herméticamente con la superficie del tanque a examinar utilizando un empaque adecuado. Para la detección de fugas se debe utilizar una solución de película jabonosa o solución comercial adaptable

a las condiciones ambientales y de trabajo. La Figura 1.9 muestra la inspección de una junta soldada por cámara de vacío [9]



Figura 1.9 Inspección de junta soldada por cámara de vacío
(Fuente: [19])

La realización de la prueba de vacío se basa de acuerdo a un procedimiento escrito efectuado por el fabricante y aprobado por el ente regulador, en dicho procedimiento debe constar: la realización de un examen visual de las soldaduras del fondo antes de efectuar la prueba de vacío, verificación del estado de la cámara de vacío y el empaque de sellado, el área a inspeccionar debe estar seca y al verter la solución jabonosa se deben generar burbujas por mínimas que estas sean. Al elaborar un procedimiento escrito de la prueba de fugas por cámara de vacío se toman en cuenta requisitos generales y específicos [20].

Como requisitos generales de la prueba se tienen: medidor de presión (manómetro o vacuómetro), presión de prueba de vacío, tiempo de retención del vacío, superposición de la cámara de vacío y criterios de aceptación. Los requisitos específicos del procedimiento de prueba de fugas por cámara de vacío se enlistan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Requisitos de un procedimiento de prueba de fugas por cámara de vacío.

REQUISITOS	Variable Esencial	Variable No Esencial
Solución formadora de burbuja (marca, tipo)	X	
Temperatura superficial	X	
Técnica de preparación superficial	X	
Intensidad luminosa	X	
Requisitos para la calificación del desempeño del personal		X
Cámara de vacío (forma y tamaño)		X
Fuente d vacío		X
Forma de aplicación de la solución		X
Técnica de limpieza pos prueba		X
Requisitos para la calificación del personal		X

(Fuente: [20])

Durante la examinación no destructiva de una junta soldada se toman en cuenta los siguientes requisitos [20]:

1.4.1 Temperatura superficial

Al igual que una técnica estándar, la temperatura superficial del área a ser examinada deberá encontrarse en el rango entre 4°C (40°F) y 52°C (125°F) mientras dure la prueba para que la solución jabonosa cumpla su función sin problemas; al existir calentamiento y enfriamiento de la pieza por la temperatura ambiente, esta variación deberá encontrarse en el mismo rango. En caso de que las condiciones de temperatura para efectuar la prueba difieran del rango, se podrá realizar con otra temperatura siempre que esta, se encuentre estipulada en el procedimiento.

1.4.2 Aplicación de la solución burbujeante

La solución formadora de burbujas deberá producir una película que no se desprenda del área a ser examinada, las burbujas producidas deberán soportar la baja tensión superficial o el secado del aire, además, no debe existir un exceso de burbujas que puedan provocar dificultades en la búsqueda de fugas. Se recomienda no utilizar jabones o detergentes de uso doméstico como solución formadora de burbujas en la prueba de vacío, se seleccionará una solución creada exclusivamente para este tipo de ensayos no destructivos tomando en cuenta su compatibilidad con la temperatura a la que se va a realizar la prueba. [14] La solución formadora de burbujas se aplica de manera lenta y cuidadosa en la superficie a ser inspeccionada, evitando la aparición temprana de burbujas

por la turbulencia que pudiera generarse, la solución debe ser rociada por toda el área para posteriormente colocar la cámara de vacío.

1.4.3 Presión de retención de vacío

Es importante definir la presión, se conoce a la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. La presión es una propiedad intensiva utilizada específicamente cuando se trata de un gas o un líquido, la interpretación es diferente cuando se trata de una superficie sólida, en esos casos toma el concepto de esfuerzo normal. La presión real en una posición cualquiera se llama presión absoluta, y es medida a partir de la presión cero absoluto (vacío absoluto). La mayoría de instrumentos usados para mediciones de presión, son calibrados para indicar una lectura de cero a partir de la presión atmosférica, es decir, muestra la variación entre la presión atmosférica local (P_{atm}) y la presión absoluta (P_{abs}), a esta variación se la denomina presión manométrica (P_{man}).

La presión manométrica (P_{man}) puede ser negativa o positiva, es importante recalcar que, las presiones menores a la presión atmosférica (P_{atm}) son llamadas como presiones de vacío y son medidos con instrumentos llamados vacuómetros, usados específicamente para presiones de vacío o incluso con manovacúómetros que miden presiones positivas y negativas. Las presiones antes mencionadas (manométrica, absoluta, atmosférica y de vacío) están íntimamente relacionadas por las fórmulas:

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad \text{a.1)}$$

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm} \quad \text{a.2)}$$

Las fórmulas a.1) ecuación de presión de vacío y a.2) ecuación de presión manométrica son representadas en la Figura 1.10 para un mejor entendimiento:

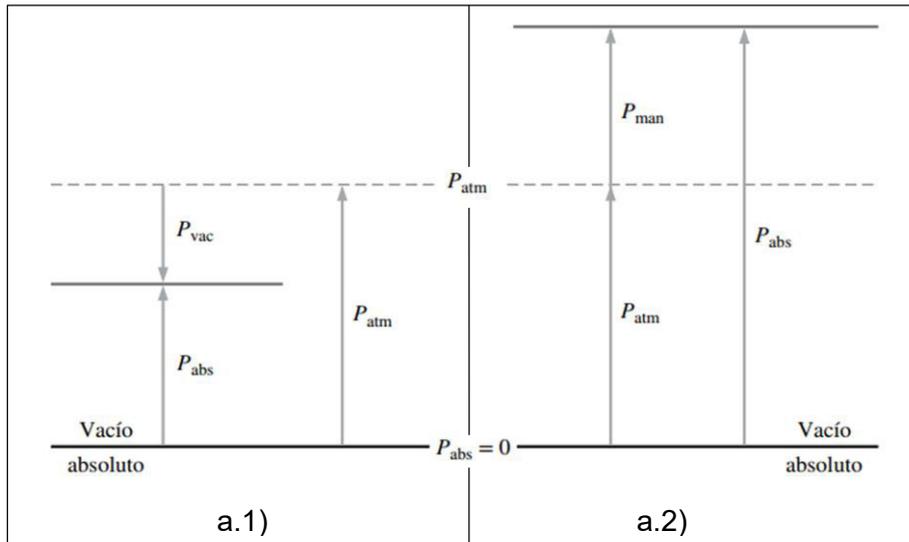


Figura 1.10 Representación gráfica de Ec. de vacío y Ec. manométrica respectivamente
(Fuente: [16])

Una vez aclarado el concepto de presión de vacío, esta se puede aplicar para diferentes beneficios entre los que resaltan los sistemas de enfriamiento y la examinación no destructiva, el enfoque en específico es la inspección no destructiva por cámara de vacío. Al colocar la cámara de vacío sobre la superficie a examinar, ya incluida la película de solución, se encarga de vaciar o succionar hasta llegar a la presión parcial de vacío requerida, es decir, se genera un diferencial de presión entre ambos lados de la película de la solución, el cual, debe mantenerse por lo menos durante 10 segundos del tiempo de examinación.

1.4.4 Superposición de la cámara de vacío

La cámara de vacío debe poseer una superposición o traslape mínimo de 50mm (2pulg) como mínimo en la superficie donde se coloca la cámara para cada subsecuente prueba.

1.4.5 Ayudas visuales e iluminación

La examinación visual directa se efectúa si los ojos se encuentran al menos a 600 mm (24 pulg) de la superficie a ser examinada y en un ángulo mayor a 30° respecto de la misma superficie. Con la finalidad de mejorar el ángulo de visión se usan espejos y adicional una lupa durante la prueba. La iluminación de la superficie a examinar es importante, puede ser utilizada la luz blanca natural o artificial, el valor mínimo de luminosidad es de 1076 lux en la zona de prueba durante la inspección y evaluación de las fugas, debe ser verificado mediante un medidor de iluminación (luxómetro) y debe constar en el informe de la prueba.

[9]

La examinación visual indirecta sustituye a la directa dependiendo de las condiciones para efectuar la prueba. Normalmente este tipo de examinación utiliza accesorios visuales como espejos, telescopios, boroscopios, cámaras, entre otros, los mismos deberán poseer una capacidad de resolución e intensidad luminosa de al menos, equivalente a los valores obtenidos empleando la examinación visual directa.

1.4.6 Indicación de fugas y evaluación

El vacío durante la prueba debe permanecer como mínimo 5 segundos o el tiempo establecido en el procedimiento y se evalúa de la siguiente forma:

- a. Cuando hay un crecimiento continuo de una burbuja o una zona burbujeante sobre la superficie del material o sobre una junta de soldadura, es un indicativo de fuga a través de un orificio de paso en la región examinada.
- b. El área que estuvo bajo prueba es aceptada, en el caso de que no se observe ninguna formación continua de burbujas, a menos que se especifique lo contrario en la sección del código de referencia.
- c. Hallada la fuga, se marca la ubicación de la fuga para efectuar la posterior reparación; una vez completadas las reparaciones, se vuelve a efectuar la prueba a las áreas reparadas y se vuelve a evaluar. [21]
- d. Posterior a la prueba, la limpieza no es obligatoria, pero si el fabricante lo requiere, se efectúa y se vuelve a poner el producto en servicio.

1.5 Componentes de la cámara de vacío

El vacío generado se define a la extracción del aire dentro de un ambiente cerrado. Al generarse eso se produce una caída de presión menor a la atmosférica y cuyo valor inicia desde la presión atmosférica hacia abajo. Es importante conocer los parámetros (presión y caudal) que toma en cuenta el vacío, de estos depende el control, aumento, disminución de la presión establecida. Al fabricar partes que van a estar sometidas a presiones de vacío, se debe tomar en cuenta la resistencia de los materiales utilizados y si los esfuerzos sobre los mismos no van a generar alguna pérdida en el vacío. Cada componente debe desempeñar su rol adecuadamente, de manera que, la cámara de vacío cumpla con los requerimientos establecidos en el código aplicado, para esto, la selección de los mismos se basa en primer lugar a las propiedades mecánicas de los materiales y en segundo lugar a criterios ingenieriles proporcionados por personal competente y calificado con años de experiencia. En cuanto a los requerimientos de montaje, se debe contar con las

herramientas necesarias y adecuadas para el armado de los diferentes acoples, accesorios e instrumentos que van a formar el equipo de vacío, Figura 1.11.

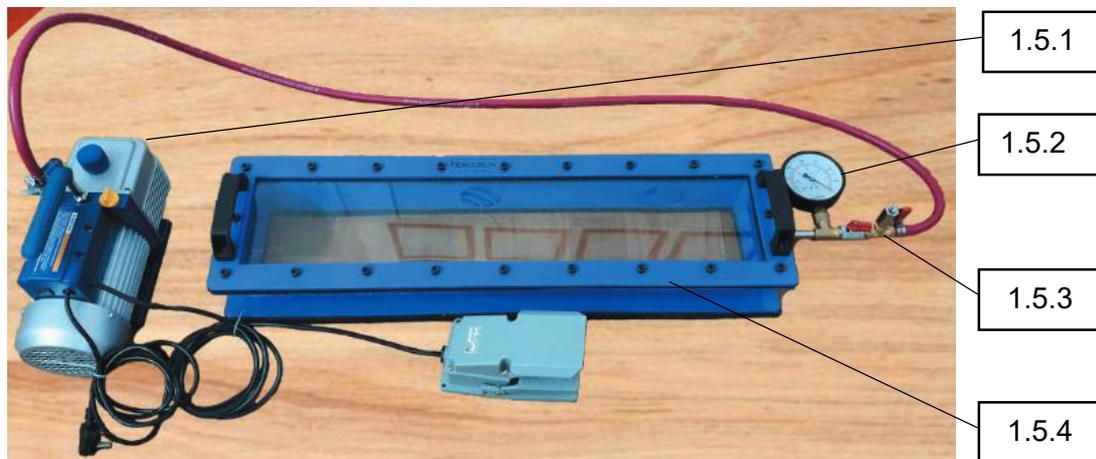


Figura 1.11 Equipo de vacío
(Fuente: [22])

Se definen los componentes principales de una cámara de vacío para inspección de juntas soldadas:

1.5.1 Fuente de vacío

- Bomba de vacío

Equipo diseñado para extraer gases del interior de recipientes, redes de tuberías o en cualquier proceso donde se requiera reducir la presión interior de un sistema, a valores inferiores a la atmosférica [23] Las bombas de vacío (Figura 1.12) se usan para la extracción gaseosa del interior de cuerpos cerrados entre los cuales se destacan las tuberías, recipientes, entre los principales.



Figura 1.12. Bomba para generación de vacío
(Fuente: [23])

Existen diferentes diseños, siendo los más comunes las bombas de pistón, tornillo, paletas lobulares, de diafragma o de anillo líquido. En cuanto a su funcionamiento es similar al de su compresor homólogo, pero con la diferencia de que está pensada para aspirar y no para comprimir el aire o gas que aspira. [23]

- Compresor

Un compresor de aire (Figura 1.13) “es una máquina diseñada para tomar el aire del ambiente, considerando el uso que le quiera dar, almacenarlo y comprimirlo dentro de un tanque llamado calderín y con ese aire, darle potencia a otras herramientas neumáticas o bien realizar múltiples tareas como hinchar neumáticos de coches” [24]. Está constituido por tres partes: el compresor que es la parte más importante en el funcionamiento, debido a que es el cilindro con pistón impulsado por un motor eléctrico, que permite tomar el aire del ambiente y comprimirlo para sus empleos, el tanque de depósito es un recipiente donde se almacena el aire comprimido para ser utilizado posteriormente, el equipo de control y suministro que es el encargado de tomar el aire comprimido por el pistón del compresor que se ha almacenado en el calderín [24]



Figura 1.13 Compresor de aire
(Fuente: [24])

1.5.2 Vacuómetro

Para la prueba de burbuja se debe utilizar un vacuómetro que cubra una presión de vacío parcial de entre 21 KPa (3psi) y 35 KPa (5 psi) por debajo de la presión atmosférica, si el comprador exige realizar una segunda prueba será con una presión de vacío parcial entre 56 KPa (8psi) y 70 KPa (10psi) para detectar fugas muy pequeñas. El vacuómetro es un

instrumento que sirve para medir presiones inferiores a la presión atmosférica (Figura 1.14). La medida del vacuómetro no tiene más significado que valorar la caída de presión.

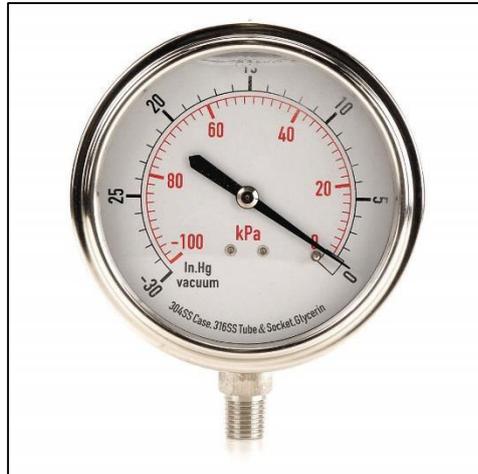


Figura 1.14 Vacuómetro

(Fuente: [25])

1.5.3 Eyector Venturi

Son dos las fuentes utilizadas para la generación del vacío en aplicaciones de inspección no destructiva por cámara de vacío, se hace referencia a las bombas de vacío y a los compresores que necesitan de un acople llamado eyector Venturi para generar el vacío. Para este caso en específico, se analizará el eyector Venturi o de vacío.

Usando una válvula de paso con un compresor de aire o una bomba de vacío, el aire que se encuentra en el interior de la cámara es evacuado produciendo una diferencia de presiones a través de la soldadura, la cual al encontrarse cubierta con una capa de solución jabonosa provocará la formación de burbujas a causa del aire retenido en las porosidades de la junta. El eyector (Ver Figura 1.15) acelera la velocidad de una corriente de fluido produciendo una compresión. El fluido puede ser agua, vapor de agua, aire o cualquier otro gas. Es utilizado para producir una compresión denominándose así eyector si se emplea para producir una depresión o vacío, el aire aspirado y el aire comprimido salen a través del silenciador.

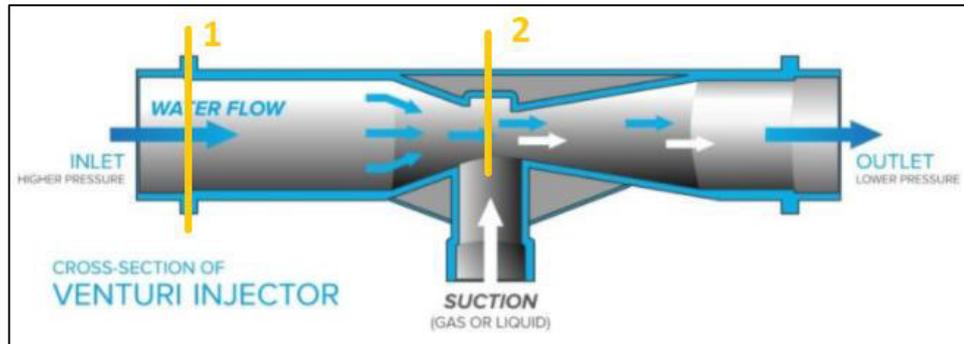


Figura 1.15 Efecto Venturi

(Fuente: [26])

El efecto Venturi establece que es el efecto mediante el cual un fluido disminuye su presión al aumentarse su velocidad gracias a la disminución de sección. El efecto Venturi está apoyado en el principio de Bernoulli y en la ecuación de continuidad, efectuándose un cálculo sencillo en bases a sus ecuaciones. El principio de Bernoulli establece que la energía por toda sección de un circuito cerrado es constante. Cuando se produce un aumento de velocidad, existe una disminución de la presión de manera que, la sumatoria de energías se mantiene constante en todo el circuito.

1.5.4 Cámara de vacío

En general una cámara de vacío (Figura 1.16) consta de 2 elementos principales, una ventana acrílica y un empaque.

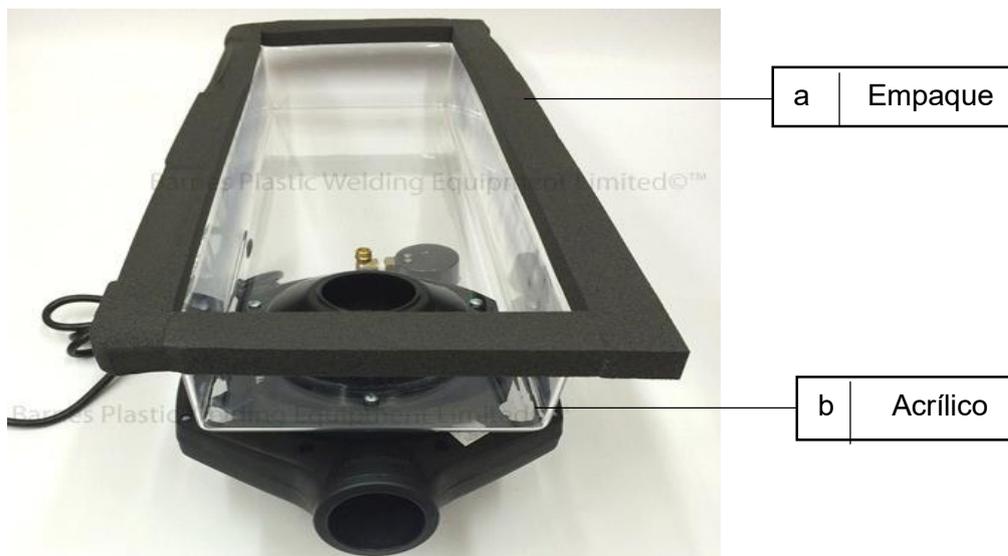


Figura 1.16 Partes de una cámara de vacío

(Fuente: [27])

a) Empaque

El empaque es una pieza formada de material blando con la finalidad de que pueda adoptar la forma de una superficie evitando de esta manera vacíos, se ubica entre dos piezas para lograr un buen ajuste entre ambas, evitando pérdidas o entrada de fluidos (aceite, agua, refrigerante, combustible, etc). La función principal es lograr la estanqueidad entre 2 superficies, donde se evite la fuga de lubricante, aceite, gas, presión o fluido que se requiera retener, a la par también, garantizar la hermeticidad y sellado de las superficies. La función más importantes es lograr la estanqueidad del motor, donde se evite la fuga de lubricante o presión, también garantiza la hermeticidad del motor. Los empaques son sustratos que actúan como interfaz o sello entre dos superficies. Se pueden encontrar en toda la industria, pero son comunes en la electrónica, transporte, manipulación de fluidos y electrodomésticos. Su montaje necesita resistencia a varios fluidos, alta adherencia a superficies difíciles de unir, así como una aplicación rápida y fácil.

b) Ventana Acrílica

También denominado PMMA (Polimetilmetacrilato), es un material termoplástico, es decir, fácil de formar y moldear sobrepasando la temperatura de transición vítrea o punto de plasticidad, puede ser pigmentado de cualquier color o puede transparente sin ningún proceso de pigmentación, una característica importante es su capacidad de mantener una estabilidad de sus propiedades al ambiente durante períodos de tiempo largos.

Este material tiene la mayor resistencia a la intemperie de los plásticos, resiste satisfactoriamente a la radiación solar intensa, al frío excesivo, inclusive a cambios de temperatura súbitos. A pesar de los embates climáticos, no existe pérdida de transparencia y claridad al aire libre, su capacidad para filtrar luz ultravioleta no se ve afectada y permanece estable con el pasar del tiempo. Una característica importante es su elevada resistencia al impacto, en comparación al vidrio, la resistencia del acrílico es mucho mayor, algo que acotar sobre el acrílico, es que este material es aún mucho más ligero respecto al mismo material. Posee una excelente resistencia química gran parte de sustancias como son ácidos como el ácido sulfúrico y el amoniaco, también los hidrocarburos alifáticos como el hexano, octano y nafta. Por lo contrario, los hidrocarburos aromáticos son perjudiciales para el acrílico, sumados a ellos, los compuestos orgánicos como el benceno, acetona y el tolueno puede disolver el acrílico.

El cambio de temperatura provoca la contracción o expansión del acrílico, este par de procesos no sucede en función del tiempo. Una carga constante sobre una lámina acrílica, si se considera a largo plazo, es capaz de deformar permanentemente, para evitar o minimizar este problema normalmente se aumenta el espesor de la lámina, también es posible reduciendo el tamaño del área sin soporte o inclusive usando configuraciones termoformadas. El termoformado del acrílico se logra a una temperatura que oscila entre los 163 y 176 °C, dentro de ese rango de temperatura el material puede ser moldeado fácilmente y con una baja presión, debido a esto, los moldes son económicos, pueden ser de madera o plástico.

1.6 Personal Técnico

El inspector que realice la prueba de vacío debe tener una excelente visión (si es necesario con corrección) de manera que pueda leer una carta estándar Jaeger Tipo 2 a una distancia no menor de 300 mm (12 pulg). El inspector deberá realizar controles anuales de manera que cumpla con este requerimiento. En la prueba por cámara de vacío incluye la realización del examen, la interpretación y evaluación de los resultados. En la Figura 1.17 se muestran las etapas de la evaluación de un END:

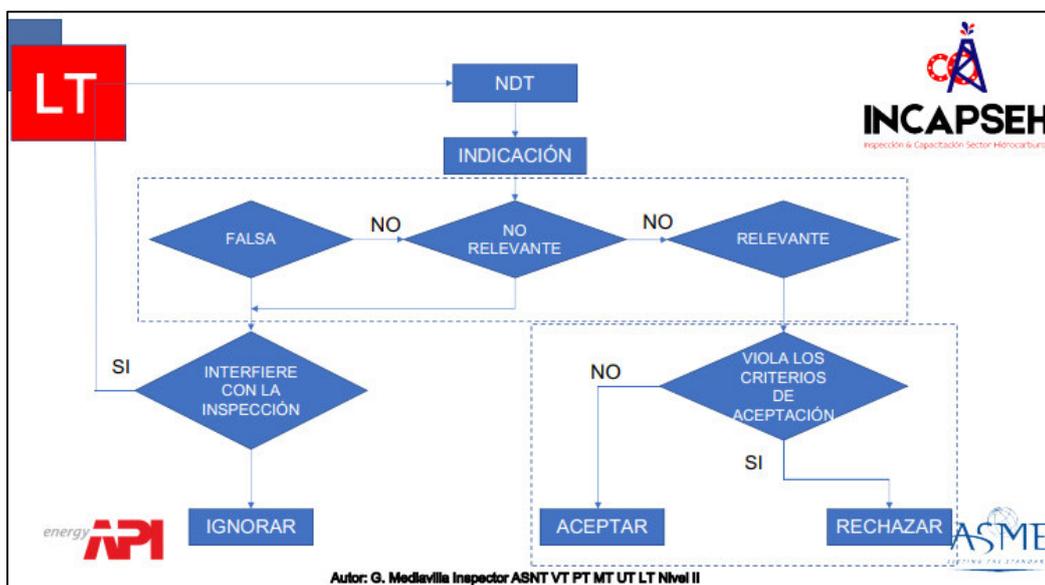


Figura 1.17 Etapas de la evaluación de un END

(Fuente: [28])

La ARCH (Agencia de Regulación y Control Hidrocarburiífero) es el organismo encargado de calificar y acreditar al personal técnico de cada empresa, para ello el personal o llamado OEC (Organismo Evaluador de la Conformidad) debe cumplir con el perfil de inspector en ensayos no destructivos vigente y detallado en el Registro Oficial No. 500 Suplemento, en donde menciona 3 secciones: Educación, Capacitación y Experiencia. [29]

1.6.1 Educación

Dentro de los requerimientos para un aspirante a inspector está el título, que puede ser: título de tercer nivel reconocido por la Senescyt en las siguientes ingenierías: Mecánica, Petróleos y Química, título de tecnología en las carreras indicadas, título en carreras distintas a las mencionadas o Bachilleres.

1.6.2 Capacitación

En lo que confiere a capacitaciones, un aspirante a inspector en END debe cumplir con: 72 horas en normas técnicas específicas por cada alcance que involucre la realización de esta actividad, 24 horas respecto al manejo y calibración de equipos, 24 horas referente a metrología, 16 horas para la norma ISO/IEC 17020.

1.6.3 Experiencia

Los inicios para un técnico aspirante a inspector son importantes, el número de horas de entrenamiento recomendado por la Practica Recomendada SNT-TC-1A [29] es fundamental para compaginar de buena manera con la técnica no destructiva deseada. En la Tabla 1.2 se resumen las horas de entrenamiento por técnica no destructiva.

Tabla 1.2. Horas de entrenamiento por técnica no destructiva

MÉTODO DE EXAMINACIÓN	NIVEL ENPND	TÉCNICA	HORAS DE ENTRENAMIENTO	EXPERIENCIA		
				HORAS MÍNIMAS EN EL MÉTODO	HORAS TOTALES EN PND	
Emisión Acústica	I	-	40	210	400	
	II		40	630	1200	
Electromagnético	I	Medición de campo CA	40	210	400	
	II		40	630	1200	
	I	Corriente de Eddy	40	210	400	
	II		40	630	1200	
	I	Campo remoto	40	210	400	
	II		40	630	1200	
Georadar	I	-	8	60	120	
	II		20	420	800	
Ondas guiadas	I		40	240	460	
	II		40	240	460	
Métodos laser	I		Rugosimetría	8	70	130
	II			24	140	260
	I	Holografía/ Xerografía	40	210	400	
	II		40	630	1200	
Prueba de fugas	I	Prueba de la burbuja	2	3	15	
	II		4	35	80	

	I	Cambio de presión	24	105	200	
	II		16	280	530	
	I	Diodo de alógeno	12	105	200	
	II		8	280	530	
	I	Espectrometría de masa	40	280	530	
	II		24	420	800	
Prueba de Líquidos Penetrantes	I	-	4	70	130	
	II		8	140	270	
Fuga de Flujo magnético	I		16	70	130	
	II		12	210	400	
Partículas magnetizables	I		12	70	130	
	II		8	210	400	
Tecnología de microondas	I		40	210	400	
	II		40	630	1200	
Radiografía por neutrones	I		28	420	800	
	II		40	1680	2400	
Prueba radiográfica	I		Radiográfica	40	210	400
	II			40	630	1200
	I		Radiografía computarizada	40	210	400
	II			40	630	1200
	I	Tomografía computarizada	40	210	400	
	II		40	630	1200	
	I	Radiografía digital	40	210	400	
	II		40	630	1200	
Térmica/Infrarroja	I	-	32	210	400	
	II	Diagnóstico de edificios	34	1260	1800	
	II	Electricidad y mecánica	34	1260	1800	
	II	Ensayos de materiales	34	1260	1800	
Prueba ultrasónica	I	-	40	210	400	
	II		40	630	1200	
	II	Tiempo de difracción de vuelo	40	160	n/a	
	II	Arreglo de fases	80	160	n/a	
Análisis vibracional	I	-	24	420	800	
	II		72	1680	2400	
Prueba visual	I		8	70	130	
	II		16	140	270	

(Fuente: [29])

En la Tabla 1.3 se muestra un resumen de los métodos de inspección aplicados y el tiempo de experiencia requerida.

Tabla 1.3. Tiempo de experiencia de acuerdo al nivel del inspector.

MÉTODOS	INSPECTOR ASNT NIVEL II O III Debe entrenar al Inspector Nivel I, Reportar y firmar los resultados del ensayo	INSPECTOR ASNT NIVEL I Debe recibir instrucción y debe trabajar bajo supervisión de un Inspector nivel II o III
Radiografía Industrial (RT) Ultrasonido para detección de discontinuidades (UTPA/TOFD) Emisión acústica (AET) Ondas Guiadas (GW) Análisis de vibraciones (AV) Termografía (IT) Electromagnetismo (ET) Tintas penetrantes (PT)	Títulos reconocidos por SENECYT: Experiencia al menos 60% en el método correspondiente certificado. Ingeniero Mecánico, Petróleos, Químico 10 MESES realizando END Tecnólogo Mecánico, Petróleos, Químico 20 meses realizando END Bachiller 40 MESES realizando END	Títulos reconocidos por SENECYT: Experiencia al menos 60% en el método correspondiente certificado. Ingeniero Mecánico, Petróleos, Químico 4 MESES realizando END Tecnólogo Mecánico, Petróleos, Químico 8 meses realizando END Bachiller 16 MESES realizando END
Partículas magnéticas (MT) Ultrasonido para medición de espesores (UT) Inspección visual (VT) Pruebas hidrostáticas (PCLT) Prueba neumática (BT) Caja de vacío, burbuja	Títulos reconocidos por SENECYT: Experiencia al menos 60% en el método correspondiente certificado. Ingeniero Mecánico, Petróleos, Químico 5 MESES realizando END Tecnólogo Mecánico, Petróleos, Químico 10 meses realizando END Bachiller 20 MESES realizando END	Títulos reconocidos por SENECYT: Experiencia al menos 60% en el método correspondiente certificado. Ingeniero Mecánico, Petróleos, Químico 2 MESES realizando END Tecnólogo Mecánico, Petróleos, Químico 4 meses realizando END Bachiller 8 MESES realizando END

(Fuente: [29])

La preparación de un inspector en Ensayos No Destructivos es continua, son importantes las capacitaciones que fomentan al conocimiento y aprendizaje, de tal manera que se brinde a la industria dedicada a la inspección no destructiva personal competitivo capaz de brindar un servicio de calidad. Finalmente, en la Figura 1.18 se observa un resumen de los requerimientos que debe cumplir el personal técnico para realizar END.



Figura 1.18 Cumplimiento del personal técnico
(Fuente [30])

2. Metodología

2.1 Introducción

Mediante la aplicación del método de ingeniería inversa se re-diseña una cámara de vacío para inspección no destructiva, este análisis permite dimensionar la cámara de vacío acorde a los requerimientos del código API 650 en un software, teniendo claro los materiales y espesores adecuados, también se efectúa la selección de accesorios complementarios de la cámara de vacío.

2.2 Aplicación del Método de Ingeniería Inversa

Se establece el procedimiento a seguir y dar cumplimiento a este estudio:

- a) Se presentan 5 variantes de cámaras de vacío que se encuentran en el mercado.
- b) Especificaciones técnicas y características de las mismas.
- c) Mediante el método de criterios ponderados se resaltan aspectos importantes que pueden incluirse o no en el re-diseño de la cámara de vacío.
- d) Con base en los análisis anteriores, el código API 650 y los criterios ingenieriles por personal técnico calificado se procede a caracterizar o re-diseñar una cámara de vacío.
- e) Se efectúa una selección de materiales.
- f) Se calcula el espesor que necesitan los empaques y la placa transparente.
- g) Se realiza el dimensionamiento en un software.
- h) Se efectúa la estimación de costos de los materiales.

2.3 Especificaciones técnicas de las cámaras de vacío

El mercado proporciona algunos diseños de cámaras de vacío como, por ejemplo: cámaras de vacío compuestas por paredes rígidas y también existen otros tipos de cámaras de vacío que omiten las paredes y se encuentra únicamente conformada por la ventana transparente y el empaque, las cámaras de vacío extraen el aire interior mediante bombas de vacío o por compresores de aire con adaptación de un eyector. No existe una gran variedad de marcas de este tipo de equipos, es por ello, que en la industria de la inspección no destructiva del país lo más común es encontrar cámaras de vacío de fabricación casera. Desde la Tabla 2.1 hasta la Tabla 2.5 se muestran equipos con mayor facilidad de

adquisición, los valores de las dimensiones vienen dadas por L x A x H (Longitud x Ancho x Altura):

Tabla 2.1 Cámara de vacío número 1.

			
IDENTIFICACIÓN			
Marca	SILVERWING	Ubicación de importación	Texas, EEUU
Modelo	V750	Precio	\$ 3 145.00
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Dimensiones	L 935 A 265 H 190 mm	Longitud de prueba	750 mm (29.5 pulg)
Peso	10.5 Kg	Uso	Inspección juntas a tope y traslape
Presión nominal	508 mmHg (10psi/0.7bar)	Detalle	Luz LED, válvula de alivio de vacío

(Fuente: [31])

Tabla 2.2 Cámara de vacío número 2.

			
IDENTIFICACIÓN			
Marca	SILVERWING	Ubicación de importación	Texas, EEUU
Modelo	V600LP	Precio	\$ 2 500.00
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Dimensiones	L 660 A 220 H 150 mm	Longitud de prueba	600 mm (23.5 pulg)
Peso	2.75 Kg	Uso	Inspección juntas a tope y traslape
Presión nominal	254 mmHg (5psi/0.37bar)	Detalle	Válvula alivio de vacío

(Fuente: [31])

Tabla 2.3 Cámara de vacío número 3.

			
IDENTIFICACIÓN			
Marca	LEISTER	Ubicación de importación	Quito, Ecuador
Modelo	VACUUM BOX	Precio	\$ 1 147.67
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Dimensiones	L 830 A 320 H 150 mm	Temperatura ambiente	0-50 °C
Peso	3.8 Kg	Uso	Inspección de juntas de soldadura
Presión nominal	375 mmHg (7.2psi/0.5bar)	Detalle	Despresurización mediante pulsador

(Fuente: [32])

Tabla 2.4 Cámara de vacío número 4.

			
IDENTIFICACIÓN			
Fabricado por	Vaccum Box Testing CO.	Ubicación de importación	Texas, EEUU
Modelo	N/A	Precio	\$ 470.54
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Dimensiones	L 762 A 191 [mm]	Longitud de prueba	N/R
Peso	N/R	Detalle	Eyector Venturi
Presión mínima	560 mm Hg (10.8psi / 0.75bar)	Uso	Inspección juntas a tope
N/R: No existen registros			

(Fuente: [25])

Tabla 2.5 Cámara de vacío número 5.

			
IDENTIFICACIÓN			
Fabricado por	TPS INC.	Ubicación de importación	Texas, EEUU
Modelo	30FBLJ	Precio	\$ 628.00
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
Dimensiones	L 762 A 178 H 41 [mm]	Espesor de placa	10 mm
Peso	N/A	Uso	Inspección juntas a traslape
Presión	0 - 762 mm Hg (14.7pi / 1bar)	Detalle	Eyector Venturi

(Fuente: [33])

Los costos de cada cámara de vacío fueron encontrados previa a la pandemia, en el ANEXO I se comprueba el costo de la cámara de vacío No. 4, el resto se verifica en las fuentes oficiales.

2.4 Método de criterios ponderados

2.4.1 Estudio y análisis de alternativas

Una vez que se conocen las cámaras de vacío se procede a efectuar una descripción minuciosa en donde son enlistados desde la Tabla 2.6 hasta la Tabla 2.10 todos los aspectos de cada una de las alternativas como son: la estética, el diseño, la fuente de vacío, accesorios, los detalles, entre otros:

Tabla 2.6 Descripción de la cámara de vacío número 1.

SILVERWING V750
Equipo con alta calidad estética,
El diseño con el que fue construido cumple con las normas de inspección API 650 y API 653 (750mm de longitud inspeccionada) por lo que, permite verificar el estado de las soldaduras de placas tanto del fondo del tanque como del techo.
Una característica importante de este equipo es tiene LEDs integrados para mantener el nivel de luminosidad correcto.
El diseño del sellado es de 2 etapas de manera que mejora el vacío inicial requerido; los sellos pueden reemplazarse sin inconveniente.
Dentro de los accesorios que lo complementan se encuentran: un vacuómetro calibrado, una válvula de alivio de presión para controlar el vacío.
Como fuente de poder pueden ser utilizados bombas de vacío o compresores.
De fácil maniobrabilidad.
Peso adecuado que reduce la fatiga del operador.

(Fuente: [31])

Tabla 2.7 Descripción de la cámara de vacío número 2.

SILVERWING V600LP
Equipo construido bajo el cumplimiento del Código API 650 y API 653 para la verificación de juntas a traslape y a tope.
Ofrece una visibilidad más cercana del área inspeccionada.
La intensidad luminosa se logra con linternas u otro tipo de accesorio de ser necesario.
Los accesorios que complementan al equipo son: un vacuómetro calibrado, una válvula de alivio de presión para controlar el vacío.
Empaque de neopreno para un completo sellado.
Como fuente de poder se requiere de una bomba de vacío.
De fácil maniobrabilidad.
Peso adecuado que reduce la fatiga del operador.

(Fuente: [31])

Tabla 2.8 Descripción de la cámara de vacío número 3

LEISTER VACUUM BOX
Equipo utilizado para una fácil comprobación de la estanqueidad de geomembranas y encontrar cualquier tipo de fugas en sus costuras.
Fabricado de vidrio orgánico (acrílico) por su resistencia y capacidad de transmitir la luz.
Para controlar de mejor manera la presurización de la cámara cuenta con un botón pulsador.
Se visualiza completamente el área de inspección sin inconvenientes.
La intensidad luminosa se logra con linternas u otro tipo de accesorio de ser necesario.
Los accesorios que complementan al equipo son: un vacuómetro calibrado en escalas psi/bar, una válvula en forma de pulsador para el alivio de presión y controlar el vacío.
La fuente de poder utilizada es una bomba de vacío.
La salida de la succión está centrada longitudinalmente.
Es fácilmente maniobrable.
Equipo es más liviano en comparación a las cámaras analizadas y adecuado para la inspección de materiales deformables.

(Fuente: [32])

Tabla 2.9 Descripción de la cámara de vacío número 4

VACUUM BOX TESTING CO.
Equipo cuya función es la de evaluar cordones de soldadura de manera rápida y confiable.
Ventana de acrílico de alta resistencia transparente.
El vacío es generado por un eyector de aire (Venturi).
Visualización completa del área de inspección sin inconvenientes.
La intensidad luminosa se logra con linternas u otro tipo de accesorio de ser necesario.
Los accesorios que complementan al equipo son: un vacuómetro calibrado en escalas psi/bar, eyector Venturi para producir el Venturi, válvula de alivio.
La fuente de poder que se utiliza es un compresor.
Es necesario maniobrar con cuidado por la falta de orejas de sujeción.
El equipo es liviano y fácil de transportar.

(Fuente: [25])

Tabla 2.10 Descripción de la cámara de vacío número 5.

TPS 30FBLJ
Equipo cuya función es inspeccionar juntas traslapadas con espesor de placas planas de 10mm (3/8 pulg).
La ventana transparente es acrílico liviano de alta resistencia que ofrece mayor resistencia a los golpes.
Para producir el vacío se utiliza un eyector de aire.
El empaque de neopreno garantiza la hermeticidad entre superficies.
Área de inspección cumple con el código API 650.
La intensidad luminosa se logra con linternas u otro tipo de accesorio de ser necesario.
Los accesorios que complementan al equipo son: un vacuómetro calibrado en escalas psi/bar, eyector Venturi.
La fuente de poder con que se adapta es el compresor.
Su maniobrabilidad debe ser cuidadosa por la falta de orejas de sujeción.
Equipo es ligero para una fácil transportación.

(Fuente: [33])

2.4.2 Factores para el análisis de alternativas

Se recomienda que la cámara de vacío re-diseñada cumpla en su mayoría, con los factores: facilidad de manufactura, facilidad de ensamblaje, facilidad de mantenimiento, facilidad de operación, bajo costo, brindar seguridad y bajo peso, analizados mediante el método de criterios ponderados por su importancia principalmente al realizar proyectos de toda índole. A raíz de este método cuantitativo se halla una cámara de vacío acorde a nuestra necesidad, además, permite evaluar las cámaras de vacío por cada criterio. La información proporcionada en base a este análisis permite diseñar una cámara de vacío, con base en la cámara de vacío seleccionada y adicionalmente parámetros que se consideren importantes de las otras alternativas. Se efectúa el análisis de cada factor:

- Facilidad de ensamblar y manufacturar

Es recomendable un equipo con un número mínimo de piezas y a su vez fáciles de ensamblar, consecuentemente de esto, la manufacturación se vuelve fácil sin la necesidad del uso de herramientas especiales ni tampoco de mano de obra altamente calificada, de manera que, disminuyen los costos.

- Facilidad de mantenimiento

Parámetro fundamental cuyo fin es, generar un buen funcionamiento durante una prueba, de esta manera, se evita gastos por reparaciones obligatorias y el equipo se mantendrá

optimo durante mucho tiempo; la reposición de cualquier parte por desgaste es rápida y económica.

- Facilidad de operación

El equipo debe brindar al inspector técnico una fácil movilidad, por tanto, debe ser ligero, además, la simplificación de pasos para su operación recae en un re-diseño básico y cumplidor.

- Costo

Al ser una estimación de costos se toma en cuenta el valor de manufactura, el costo es un factor importante y que permite a un equipo ser competitivo dentro de un mercado.

El costo de alquiler de máquinas y equipos para realizar cortes de materiales, se toma en cuenta para el montaje y manufacturado.

Es un diseño simple y funcional para lo cual se toman en cuenta el costo de mano de obra por la manufactura y montaje.

- Seguridad

Se evalúa la capacidad de resistencia de los elementos de la cámara de vacío, acotando que, al aumentar el nivel de seguridad también aumentará su valor.

El re-diseño del equipo debe brindar seguridad y el normal funcionamiento debe ser garantizado al igual que la seguridad del técnico operador.

- Peso

Se tiene como prioridad que el equipo sea ligero para su fácil movilización y mayor facilidad de operación para el inspector, esta es una ventaja que es tomada en cuenta en el re-diseño.

2.4.3 Análisis de alternativas

La evaluación de los factores antes señalados es por el método de criterios ponderados. Se muestran los valores para el análisis en la matriz:

5: El criterio de la fila es más importante (superior, mejor o $>$) que el criterio de la columna.

1: Ambos criterios son equivalentes (iguales) de importantes.

0.2: El criterio de la fila es menos importante (inferior, peor o $<$) que el criterio de la columna.

A partir de los datos ya establecidos (cámaras de vacío, criterios y los valores de la matriz) efectuamos el análisis de manera ordenada, inicialmente se evalúa el peso específico de cada criterio (Tabla 2.11):

Tabla 2.11 Evaluación del peso específico de cada criterio

Ponderación de los criterios									
	Facilidad de ensamble	Facilidad de manufacturar	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de operación	Seguridad	Peso	Costo	Total + 1	Peso ponderado definido
Facilidad de ensamble	-	1	5	5	0,2	1	0,2	13,40	0,18
Facilidad de manufacturar	1	-	5	1	1	1	1	11,00	0,15
Facilidad de mantenimiento	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1	1	3,80	0,05
Facilidad de operación	0,2	1	5	-	1	1	1	10,20	0,14
Seguridad	5	1	5	1	-	5	1	19,00	0,25
Peso	1	1	1	1	0,2	-	1	6,20	0,08
Costo	5	1	1	1	1	1	-	11,00	0,15
Total								74,60	1,00

Se evalúa desde la Tabla 2.12 hasta la Tabla 2.18 los pesos específicos de las diferentes soluciones para cada criterio:

Tabla 2.12 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de ensamblar

Calificación de opciones por cada criterio							
Facilidad de ensamblar	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	0,2	0,2	0,2	0,2	1,8	0,04
V600LP	5	-	1	1	5	13	0,27
LEISTER VB	5	1	-	0,2	1	8,2	0,17
VBT CO.	5	1	5	-	5	17	0,36
TPS 30FBLJ	5	0,2	1	0,2	-	7,4	0,16
Total						47,4	1,00

Tabla 2.13 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de manufacturar

Facilidad de manufacturar	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	0,2	0,2	0,2	0,2	1,8	0,04
V600LP	5	-	1	0,2	1	8,2	0,19
LEISTER VB	5	1	-	1	1	9	0,20
VBT CO.	5	5	1	-	5	17	0,38
TPS 30FBLJ	5	1	1	0,2	-	8,2	0,19
Total						44,2	1,00

Tabla 2.14 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de mantenimiento

Facilidad de mantenimiento	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	0,2	0,2	0,2	1	2,6	0,06
V600LP	5	-	1	1	5	13	0,29
LEISTER VB	5	1	-	1	0,2	8,2	0,19
VBT CO.	5	1	1	-	5	13	0,29
TPS 30FBLJ	1	0,2	5	0,2	-	7,4	0,17
Total						44,2	1,00

Tabla 2.15 Evaluación del peso específico para el criterio facilidad de operación

Facilidad de operación	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	1	0,2	1	1	4,2	0,15
V600LP	1	-	1	1	1	5	0,18
LEISTER VB	5	1	-	1	1	9	0,32
VBT CO.	1	1	1	-	1	5	0,18
TPS 30FBLJ	1	1	1	1	-	5	0,18
Total						28,2	1,00

Tabla 2.16 Evaluación del peso específico para el criterio seguridad

Seguridad	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	5	1	5	1	13	0,32
V600LP	0,2	-	5	1	1	8,2	0,20
LEISTER VB	1	0,2	-	0,2	5	7,4	0,18
VBT CO.	0,2	1	5	-	1	8,2	0,20
TPS 30FBLJ	1	1	0,2	1	-	4,2	0,10
Total						41	1,00

Tabla 2.17 Evaluación del peso específico para el criterio peso.

Peso	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	5	5	5	5	21	0,44
V600LP	0,2	-	0,2	1	1	3,4	0,07
LEISTER VB	0,2	5	-	0,2	0,2	6,6	0,14
VBT CO.	0,2	1	5	-	1	8,2	0,17
TPS 30FBLJ	0,2	1	5	1	-	8,2	0,17
Total						47,4	1,00

Tabla 2.18 Evaluación del peso específico para el criterio costo

Costo	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	Total + 1	Peso relativo
V750	-	5	5	5	5	21	0,37
V600LP	0,2	-	5	5	5	16,2	0,28
LEISTER VB	0,2	0,2	-	5	5	11,4	0,20
VBT CO.	0,2	0,2	0,2	-	0,2	1,8	0,03
TPS 30FBLJ	0,2	0,2	0,2	5	-	6,6	0,12
Total						57	1,00

Posteriormente en la Tabla 2.19 se tabulan los resultados de cada cámara por criterio.

Tabla 2.19 Peso ponderado de las cámaras por cada criterio.

Consolidado de calificación de opciones							
	Facilidad de ensamble	Facilidad de manufacturar	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de operación	Seguridad	Peso	Costo
V750	0,04	0,04	0,06	0,15	0,32	0,44	0,37
V600LP	0,27	0,19	0,29	0,18	0,20	0,07	0,28
LEISTER VB	0,17	0,20	0,19	0,32	0,18	0,14	0,20
VBT CO.	0,36	0,38	0,29	0,18	0,20	0,17	0,03
TPS 30FBLJ	0,16	0,19	0,17	0,18	0,10	0,17	0,12

Finalmente, la Tabla 2.20 representa los datos finales calculados y bajo los cuales se realiza la selección de la mejor alternativa adicionalmente, tanto para cada criterio como para el total se señala el valor máximo y mínimo, siendo el máximo el color naranja y el mínimo el color verde y a la par, enfatizar en estos valores de manera que sea posible utilizar algunos criterios a conveniencia para plasmar un diseño acorde a las necesidades que se desea sanear.

Tabla 2.20 Cuadro final del análisis de criterios ponderados

Calificación total por opción por criterio ponderado								
	Facilidad de ensamble	Facilidad de manufacturar	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de operación	Seguridad	Peso	Costo	Total
V750	0,007	0,006	0,003	0,020	0,081	0,037	0,054	0,21
V600LP	0,049	0,027	0,015	0,024	0,051	0,006	0,042	0,21
LEISTER VB	0,031	0,030	0,009	0,044	0,046	0,012	0,029	0,20
VBT CO.	0,064	0,057	0,015	0,024	0,051	0,014	0,005	0,23
TPS 30FBLJ	0,028	0,027	0,009	0,024	0,026	0,014	0,017	0,15
NOTA								
Se selecciona el mayor y menor valor por cada criterio siendo:								
 Criterio de mayor valor								
 Criterio de menor valor								

2.4.4 Selección de la alternativa

En base a la Tabla 2.20, la mejor opción de los equipos propuestos es la cámara de vacío VBT CO. con un peso total de ponderación de **0.23**.

2.5 Análisis de la cámara de vacío seleccionada

En primer lugar, se analizan las calificaciones por criterio de la cámara de vacío seleccionada (Ver Tabla 2.21).

Tabla 2.21 Cámara de vacío VBT CO.

	Facilidad de ensamble	Facilidad de manufacturar	Facilidad de mantenimiento	Facilidad de operación	Seguridad	Peso	Costo	Total
VBT CO.	0,064	0,057	0,015	0,024	0,051	0,014	0,005	0,23

- Facilidad de ensamblar

El equipo presenta el mayor peso ponderado para este criterio (0.064), por tanto, cuenta con un número de piezas adecuado y básico con la capacidad de cumplir sin problema con el vacío requerido. El equipo cuenta esencialmente con los elementos que se muestran en la Figura 2.1:

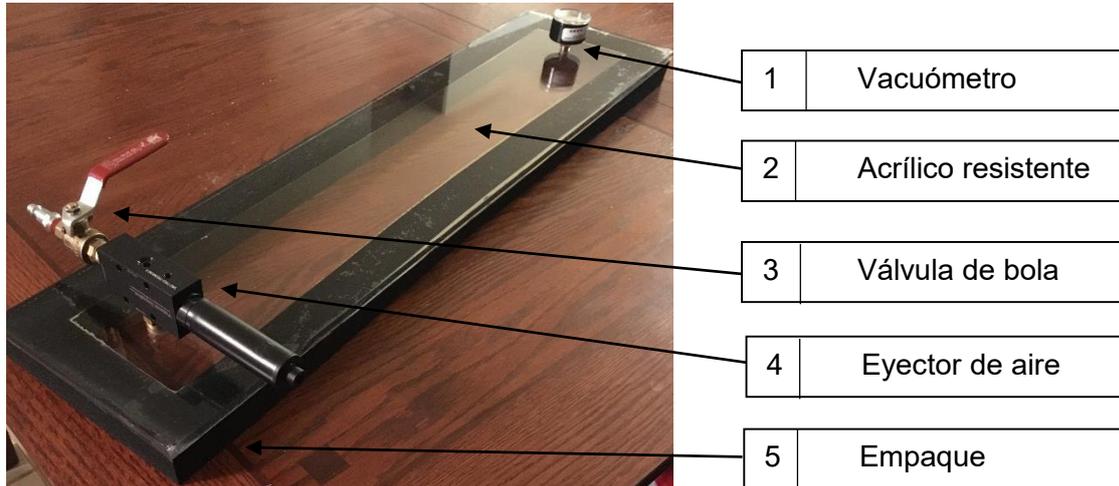


Figura 2.1 Partes de la cámara de vacío seleccionada

(Fuente: [25])

- Facilidad de manufacturar

El equipo presenta facilidades para su manufactura, así lo demuestra la calificación de este criterio (0.057), al ser un diseño sin complicaciones, no es necesario un personal altamente calificado, por tanto, la elaboración de un equipo similar no va a presentar complicaciones representativas.

- Facilidad de mantenimiento

El mantenimiento preventivo y correctivo son importantes para un rendimiento óptimo, gracias a su diseño básico, es posible controlar periódicamente de manera fácil la hermeticidad de la cámara para evitar inconvenientes durante una prueba no destructiva y en caso de desgaste del empaque, este es fácil de cambiar en un tiempo prudente.

- Facilidad de operación

El modelo no cuenta con manijas de sujeción, esto no representa un problema para el transporte debido a, que su peso es manejable, y otro punto importante es que, el eyector debe ser cerrado mediante una válvula una vez producido el vacío.

- Seguridad

Existe un acoplamiento directo del eyector y el vacuómetro en el acrílico transparente, de ocurrir una mala operación, los mencionados elementos podrían resultar averiados o inclusive la integridad misma de la cámara.

- Peso

El peso adecuado me permite transportar el equipo sin inconvenientes el peso ponderado de 0.014 me dice que el peso es menor que los 10.5 Kg (23.14 lb) de la cámara más pesada, en conclusión, es una buena opción de diseño que se toma en cuenta.

- Costo

Definitivamente por su diseño básico y con un número esencial de piezas los costos se abaratan notablemente, es por ello que, el peso ponderado para el costo es el más económico (0.005).

2.6 Re-diseño de la Cámara de vacío

2.6.1 Elementos de la cámara de vacío

- Ventana acrílica

La cámara seleccionada utiliza el acrílico como ventana transparente (Ver Anexo IV), para este estudio, se mantiene este material para el mismo fin, ya que en el país es altamente comercial y presenta ciertas características respecto a materiales similares y son enlistadas en la Tabla 2.22:

Tabla 2.22 Características del acrílico respecto a otros materiales

Acrílico, Vidrio y Policarbonato
El acrílico posee una resistencia 17 veces mayor al impacto que el vidrio, mientras que el policarbonato ofrece una resistencia 250 veces mayor.
El acrílico puede transmitir la luz en un 92%, mientras que el policarbonato lo hace en un 88% y el vidrio en un 84%.
El acrílico presenta mayor rigidez que el policarbonato.
El acrílico es más ligero que el vidrio.
El acrílico posee menos resistencia a los químicos que el policarbonato.
El acrílico tiene mayor facilidad de corte que el policarbonato y el vidrio.
Por costo el vidrio < acrílico < policarbonato (policarbonato 2 o 3 veces más que el acrílico).

(Fuente: [34], [35], [36])

Las propiedades físicas y mecánicas del acrílico corroboran su elección (Tabla 2.23 y Tabla 2.24 respectivamente), las mismas son proporcionadas por la casa comercial DISTRIBUIDORA BOSTON:

Tabla 2.23 Propiedades físicas del acrílico

PROPIEDADES FÍSICAS
Transmisión de la luz del 92-95% (mayor transparencia que el vidrio)
Material liviano (densidad de 1.2 gr/cm ³)
No se opaca ni tiende a amarillarse con el tiempo
Facilidad para el termoformado (temperaturas entre 140 a 180 °C)
Máxima temperatura recomendada para servicio 65 a 90°C
Mínima temperatura recomendada para servicio -40°C
Baja resistencia a la abrasión
No tiene olor ni sabor

(Fuente: [37])

Tabla 2.24 Propiedades mecánicas del acrílico

PROPIEDADES MECÁNICAS			
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD	NORMA ASTM
Densidad	1.19	gr/cm ³	ASTM D792
Resistencia a la tracción	700	Kg/cm ²	D638
Elongación a la rotura (%)	3	%	D638
Módulo de elasticidad	31000	Kg/cm ²	D638
Resistencia al choque	1.5	Kg/ cm ²	D256
Resistencia a la flexión	1050	Kg/cm ²	D790
Resistencia a la compresión	1080	Kg/cm ²	D695
Módulo de flexión	28600	Kg/cm ²	D790
Resistencia a la rotura	630	Kg/cm ²	D732
Dureza a la penetración Rockwell	M95 - M100	-	D785
Dureza a la penetración Barcol	525	-	D2583
Concentración residual	2	%	D702
Esfuerzo último a la tracción	887.15	Kg/cm ²	-
Esfuerzo de fluencia	591.43	Kg/cm ²	-

(Fuente: [38] y [14])

- Empaque No.1

La cámara seleccionada usa un solo empaque de caucho, el mismo debe encargarse de sellar el área a inspeccionar, de tal forma que, la superficie de contacto con el tanque debe

deformarse y acoplarse a las imperfecciones del mismo, la superficie unida a la ventana acrílica debe mantenerse homogénea y rígida de manera que al ejercer presión sobre la cámara exista una distribución uniforme de la carga por el contorno de la ventana acrílica. En el presente diseño, con la finalidad de mejorar el sellado de la cámara se utilizan 2 empaques de diferente material, esto debido a que, la dureza del material aumenta con el espesor.

El primer empaque es el encargado de brindar la rigidez y homogeneidad a la cámara de vacío por lo que el material idóneo debe cumplir con estos requerimientos. El caucho es usado frecuentemente en la fabricación de empaques, adicional a dicha información, en las cámaras de vacío analizadas el caucho sigue siendo el material primario para los empaques. Ver Anexo III. El mercado nacional ofrece una gran variedad de cauchos de los cuales fue seleccionado el caucho esponja que puede acoplarse a la superficie del tanque y deformarse sin inconvenientes en el cordón de soldadura. El caucho esponja posee una dureza shore entre 10 A y 50 A, siendo 10 A mucho más blando que 50 A. [39] La dureza Shore en escala A y D se utilizan para los cauchos y elastómeros termoplásticos (Shore A para cauchos blandos y Shore D para cauchos más duros). En la Tabla 2.25 se muestran aplicaciones del caucho en función de la dureza. [40]

Tabla 2.25 Aplicaciones del caucho en función de la dureza

25 - 35 Shore A	Bandas elásticas
50 Shore A	Sellos de caucho
55 Orilla A	Sellos para puertas y gomas de borrar
60 Shore A	Limpiaparabrisas
65 Shore A	Neumáticos de coche
70 - 80 Shore A	Suelas y tacones de zapatos, cinturones de cuero
75 - 80 Shore A	Ruedas blandas de patines y monopatines
75 Shore A	Almohadillas de manipulación de abrasivos
70 - 90 Shore A	Juntas tóricas hidráulicas
80 Shore A	Alfombrillas de ratón
85 Shore A	Arandelas para grifos
90 Shore A	Cable de teléfono
95 Shore A	Neumáticos sólidos para carretillas elevadoras
98 Orilla A	Ruedas duras de patines y monopatines
100 Shore A	Goma Ebonita

(Fuente: [40])

Respecto a la resistencia al aplastamiento de las juntas, que según la marca de juntas Garlock, recomienda un esfuerzo a la compresión máxima de 15 000 psi en juntas GYLON y fibra comprimida, y 10 000 psi en juntas GRAPH-LOCK y MULTI-SELL, acotando que el valor real de los materiales mencionados es más alto. En el caucho, la tensión máxima es de 900 psi para materiales con una dureza por debajo de los 70 Shore A, y 1 200 psi con una dureza de 70 Shore A en adelante. [41] En la Tabla 2.26 son enlistadas las características del material:

Tabla 2.26 Características del empaque del caucho esponja

CARACTERÍSTICA	Unidad	VALOR
Dureza	Shore A	65
Gravedad específica	-	1.2
Esfuerzo de tensión	MPa	12.8
Elongación	%	490
Temperatura de operación máxima	°C	120
Temperatura de trabajo	°C	80
Resistencia a baja temperatura	°C	- 40
Módulo de elasticidad	MPa	50
Límite elástico	MPa	15
Coefficiente de Poisson	-	0.45
Densidad	Kg/m ³	1200

(Fuente: [42])

- Empaque No. 2

El segundo empaque es más deformable, posee una menor densidad con la finalidad de que el equipo brinde un sellado óptimo tanto en juntas a tope como juntas a traslape. Se utiliza un empaque de espuma de poliuretano (espuma de tapicería), material de fácil accesibilidad y que, además, puede deformarse lo suficiente y cubrir las imperfecciones de la superficie. Se establecen las características técnicas (Ver Tabla 2.27) del material proporcionados por la casa comercial LA CASA DE LA ESPONJA:

Tabla 2.27 Características del empaque de la esponja de alta densidad

PROPIEDAD	RESULTADO	MÉTODO DE PRUEBA
Poros por pulgada	40-50 PPI	GFC PRUEBA No. 26
Densidad aparente	20.6-25.62 Kg/m ³	ASTM D3574-91
Fuerza de compresión 25%	0.30 PSI MINIMO	ASTM D3574-91
Fuerza de compresión 50%	0.40 PSI MINIMO	ASTM D3574-91
Compresión establecida 50%	15% MAXIMO	ASTM D3574-91
Fuerza de tensión	10 PSI MINIMO	ASTM D3574-91
Elongación última	100% MINIMO	ASTM D3574-91
Fuerza de rasgado	2.5 lb/in MINIMO	ASTM D3574-91
Calidad de corte/suajado	BUENO A EXCELENTE	GFC PRUEBA #1

(Fuente: [43])

- Vacuómetro

La selección del vacuómetro es idéntica a la de un manómetro, en la mayoría de las especificaciones dictan que los manómetros se deben seleccionar de manera que su escala no se encuentre menos de 1.5 o más de 4 veces la presión de prueba. [30] En la

Tabla 2.28 se muestran las características del vacuómetro que cumple con el requerimiento establecido, dicho accesorio es proporcionado por la casa comercial TECNIMETRO (Ver Figura 2.2):



Figura 2.2 Vacuómetro

(Fuente: [44])

Tabla 2.28 Características del vacuómetro

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Marca	GAUGE
Modelo	Sin Denominación
Tamaño	2 ½" (63 mm)
Rango de medición	30 in Hg (vacío absoluto) – 60 psi
Diámetro de conexión	1/4"
Temperatura de operación	-40 a 65 °C
Ventana	Polycarbonato

(Fuente: [44])

Acotando, en todas las conexiones roscadas machos se colocan teflón para prevenir cualquier tipo de fuga por conexión. El Anexo II refleja la cotización de este accesorio ya calibrado.

- Niples

Se utilizan 2 niples hembra (Ver Figura 2.3) de 1/4" de diámetro, hechos del material ASMT A106 con rosca NPT, el primer niple se une a una unión y al Venturi, el segundo niple se une a una unión y al vacuómetro.



Figura 2.3 Niple hembra

(Fuente: [45])

- Uniones

Mediante uniones macho (Ver Figura 2.4) de 1/4" en material ASTM A106 con rosca NPT, se conectan por un lado a los niples y por el otro son empotrados en la cámara acrílica.



Figura 2.4 Unión Macho

(Fuente: [46])

- Eyector Venturi

Antes de seleccionar el eyector Venturi es importante indicar los grados de vacío normalizados (Ver Tabla 2.29) y tener en cuenta que el accesorio trabajará a un vacío máximo de 20 in Hg (67,73 kPa).

Tabla 2.29 Grados de vacío Normalizado

Grado de vacío	Rango	Símbolo
Bajo Vacío	10^5 a 10^2 Pa	LV
Medio Vacío	10^2 a 10^{-1} Pa	MV
Alto Vacío	10^{-1} a 10^{-5} Pa	HV
Ultra Alto Vacío	10^{-5} a 10^{-9} Pa	UHV
Ultra Alto Vacío Extremo	$< 10^{-9}$ Pa	EHV
NOTA: Se detalla la simbología		
LV: low vacuum		
MV: medium vacuum		
HV: high vacuum		
UHV: ultra-high vacuum		
EHV: extremely high vacuum		

(Fuente: [47])

La cámara de vacío trabajará en el Bajo Vacío, es decir, que los accesorios y equipos deben encontrarse en este rango de presión. Es importante tabular las unidades de presión (Tabla 2.30) manejadas comúnmente al trabajar en el vacío, esto con la finalidad de comprender el cambio de unidades que se maneja al hablar de equipos de vacío.

Tabla 2.30 Unidades de medición de vacío

Unidades de medición de vacío									
Unidades de presión							Unidades de depresión		
Pascal [Pa]	PSI	Pulgadas de Hg	mm de Hg	Atm	mbar	% vacío	mbar	mm de Hg	Pulgadas de Hg
101300	14.69	30.00	759.75	1.0	1013	0	0	0	0
100000	14.50	29.61	750	0.987	1000	1.3	-13.32	-10.0	-0.39
98100	14.23	29.05	735.75	0.968	981	3.2	-33.32	-25.0	-0.98
90000	13.05	26.85	675	0.888	900	11.1	-113.29	-85.0	-3.35
80000	11.60	23.69	600	0.789	800	21.0	-213.26	-159.9	-6.30
70000	10.15	20.73	525	0.691	700	30.9	-319.09	-239.3	-9.42
60000	8.70	17.77	450	0.592	600	40.8	-416.52	-312.4	-12.30
50000	7.25	14.81	375	0.494	500	50.6	-511.50	-383.6	-15.10
40000	5.80	11.85	300	0.395	400	60.5	-608.80	-456.6	-17.98
30000	4.35	8.884	225	0.296	300	70.4	-704.09	-528.1	-20.79
20000	2.90	5.923	150	0.197	200	80.2	-802.73	-602.0	-23.70
10000	1.45	2.961	75	0.099	100	90.1	-901.38	-676.0	-26.62
9000	1.31	2.665	67.5	0.089	90	91.8	-927.50	-695.6	-27.39
8000	1.16	2.369	60	0.079	80	92.1	-933.02	-699.8	-27.55
7000	1.02	2.073	52.5	0.069	70	93.1	-943.32	-707.5	-27.85
6000	0.870	1.777	45	0.059	60	94.1	-953.70	-715.3	-28.16
5000	0.725	1.481	37.5	0.049	50	95.1	-964.35	-723.3	-28.47
4000	0.580	1.185	30	0.040	40	96.1	-975.12	-731.3	-28.79
3000	0.435	0.888	22.5	0.030	30	97.0	-987.83	-740.9	-29.17
2000	0.290	0.592	15	0.020	20	98.0	-999.67	-749.8	-29.52
1000	0.145	0.296	7.5	0.010	10	99.0	-999.99	-750.0	-29.53
0	0	0	0	0	0	100	-1013	-759.8	-29.91

(Fuente: [48])

Para seleccionar un eyector venturi es importante hallar el volumen del interior de la cámara y el caudal de salida del aire del mismo [49], para efectuar los cálculos se establecen las fórmulas correspondientes:

$$V = a * b * h \quad \text{b.1}$$

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{b.2}$$

Donde, la simbología y valores establecidos son detallados a continuación:

V : Volumen [mm^3]

a : largo, 750 [mm]

b : ancho 150 [mm]

h : altura 55 [mm]

t : tiempo 15 [s]

Q : caudal [l/min]

Una vez reemplazados los datos, se obtiene un volumen de $V = 6.19 \text{ lt}$ y un caudal de $Q = 24.75 \text{ l/min}$, dicho valor de caudal es utilizado para hallar el eyector venturi.

Se busca el eyector venturi que posee dicha capacidad de extracción (caudal) es decir, 24.75 l/min, con este valor y según el código API 650 se debe llegar a una presión de vacío de 20 in de Hg (0.84 bar).

En el país se comercializan eyectores de la marca Mazzei, el adquirir otra marca representa realizar una importación para lo cual el costo será mayor, debido a ello, se optó por un eyector venturi marca Mazzei que como plus adicional trabajan tanto con líquidos como con aire. Para seleccionar el venturi correcto es importante interpretar los parámetros enumerados de la tabla de rendimientos (Ver

Tabla 2.31):

Tabla 2.31 Rendimiento de Inyectores




Tabla de Rendimiento de Inyectores

Capacidad de Succión de Aire (MÉTRICO) REV 2014

Presión Operacional kg/cm ²		Modelo 0287 15mm Roscas		Modelo 0384 15mm Roscas		Modelo 0484 15mm & 20mm Roscas		Modelo 0484X 20mm Roscas		Modelo 0584 15mm & 20mm Roscas		Modelo 0684 20mm Roscas	
ENTRADA del Inyector	SALIDA del Inyector	Flujo de la Línea Principal l/min	Succión de Aire l/min										
↓	↓	↓	↓										
a	b	c	d										

(Fuente: [50])

Donde:

- a. Presión a la entrada del inyector, el valor de presión que se admite a la entrada oscila entre 0.35 – 8.44 kg/cm².

- b. Presión a la salida del inyector, estos valores son menores a la presión de entrada
- c. Flujo de la línea principal, depende de la presión en la entrada del inyector
- d. Succión de aire, caudal que depende de la presión de salida del inyector

El eyector debe tener la capacidad de succionar aire de la cámara a 24.75 l/min hasta alcanzar la presión de vacío de 20 in de Hg (0.67 bar). La presión a la entrada del eyector será de 3.5 bar, que es lo que produce el compresor.

En el catálogo encontramos una presión de entrada del eyector de 3.52 kg/cm² (3.45 bar), con la presión mencionada, se halla un caudal de succión de 24.75 l/min en los diferentes modelos de eyectores.

El modelo 0784, que posee una capacidad de succión de entre 1.3 – 27.4 l/min (0.88 CFM) a una presión operacional de 3.52 kg/cm² (3.45 bar), es decir, puede cumplir con el caudal requerido sin que el accesorio sea forzado. [51] En la Tabla 2.32, se visualiza un resumen en donde se muestra la capacidad del eyector Venturi seleccionado.

Tabla 2.32 Capacidad de succión del aire

MAZZEI - 0784			
PRESIÓN ENTRADA [kg/cm ²]	PRESIÓN SALIDA [kg/cm ²]	FLUJO LÍNEA PRINCIPAL [l/min]	SUCCIÓN DE AIRE [l/min]
3.52	0.00	51.6	27.4
	0.35		24.5
	0.70		20.3
	1.05		16.8
	1.41		9.6
	1.76		6.4
	2.11		4.3
	2.46		2.8
	2.81	*(3.01)	1.3
* El valor en paréntesis indica la presión de salida del eyector cuando deja de aspirar (punto cero de succión).			

(Fuente: [51])

Para un detalle más completo en el Ver Anexo V se encuentra la tabla completa del rendimiento del inyector Mazzei 0784. La rosca del eyector tanto para la conexión de entrada como para la salida es de 3/4 de pulgada, y la rosca en la sección de succión es

de 1/4 de pulgada (Ver Figura 2.5), estas conexiones hay que tenerlas presentes ya que existen cambios de diámetro que son solucionados con el uso del accesorio llamado bushing para reducir o ampliar la medida dependiendo de la necesidad.

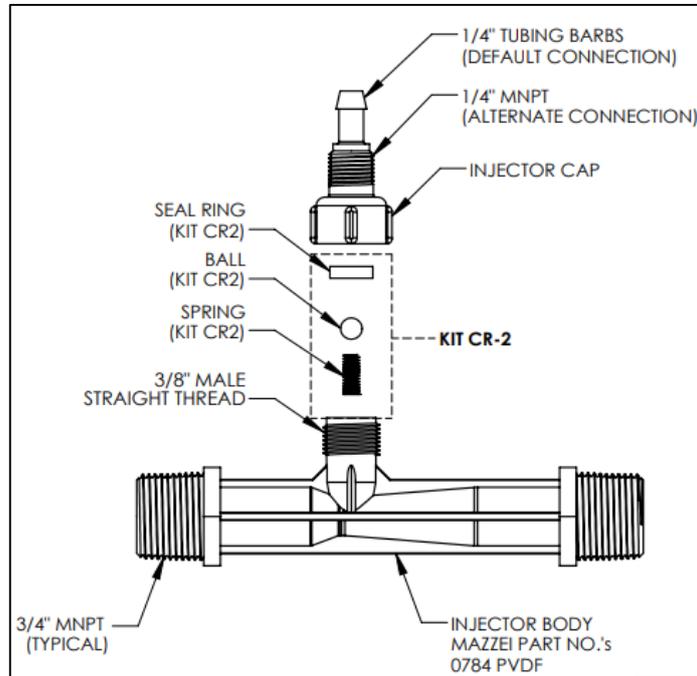


Figura 2.5 Venturi Mazzei 0784

(Fuente: [51])

- Fuente de vacío

Existen 2 maneras de producir el vacío, el primero caso utiliza un eyector de succión para producir el vacío dentro de la cámara, mientras es alimentado por un compresor de aire. El segundo caso no requiere de ningún accesorio especial, se produce con una bomba de vacío que se encarga de succionar el aire que se encuentra en el interior de la cámara.

Fue seleccionado el compresor por la polifuncionalidad del mismo, refiriéndose a su utilización en otras técnicas no destructivas. El compresor se conecta al eyector mediante una manguera de aire, por tanto, el flujo y presión que genere el compresor no debe sobrepasar la capacidad del eyector para evitar algún daño en el accesorio. La selección del compresor también toma como referencia la capacidad del eyector, esto con la finalidad de seleccionar un equipo acorde a mi necesidad y ahorrar costos. En la Tabla 2.33, se detalla el compresor seleccionado que cumple con los requerimientos establecidos.

Tabla 2.33 Compresor Seleccionado

			
IDENTIFICACIÓN			
MARCA	THOMAS USAIR	UBICACIÓN	QUITO
MODELO	AS-06	COSTO	\$ 79,91
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
DIMENSIONES	18X15X24 cm	RPM	1700
POTENCIA	1/4 HP	PRESIÓN	3.5 Bar
FRECUENCIA	60 Hz	PRESIÓN	50 PSI
VOLTAJE	110 - 120	CAUDAL	68 l/min
FASE	1 PH	PESO	4 kg

(Fuente: [52])

Posterior a la selección de los accesorios se describe la forma correcta de ensamblar de los mismos:

- a. En el primer agujero va roscada una unión hembra, posteriormente se enrosca a una unión macho y finalmente se conecta el vacuómetro.
- b. En el siguiente agujero se enroskan los accesorios en el siguiente orden: unión hembra, unión macho, niple hembra, válvula de bola, eyector, manguera del compresor (entrada del eyector).

En los accesorios machos se coloca teflón para mayor ajuste en el roscado del accesorio y de esa manera garantizar alguna fuga de aire.

2.6.2 Dimensionamiento de la cámara

El código API 650 recomienda un área de inspección de 150mm de ancho por 750mm de largo (Ver Figura 2.6), sin una altura recomendable, por lo que queda a criterio ingenieril el darle una altura óptima que permita visualizar el área inspeccionada de manera cómoda.

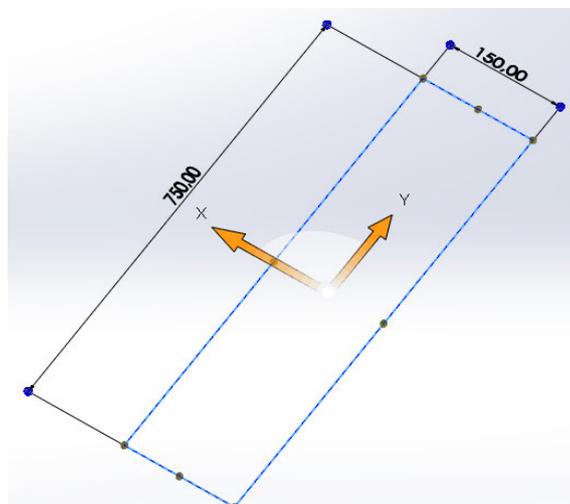


Figura 2.6 Área de inspección

La presión de vacío de una primera prueba que debe soportar la cámara está entre 21 kPa (3 psi, 6 in Hg) y 35 kPa (5 psi, 10 in Hg). En caso de que el comprador requiera de una segunda prueba esta se realizará con una presión de vacío parcial entre 56 kPa (8 psi, 16 in Hg) y 70kPa (10 psi, 20 in Hg). Como conclusión la cámara de vacío deberá soportar un rango de presión de vacío entre 6 in Hg y 20 in Hg.

Los materiales a continuación dimensionados cumplen con la presión y área de inspección establecidas:

- Acrílico

La Figura 2.7 proporciona las dimensiones finales de la ventana acrílica con 2 agujeros de 6.35 mm (1/4 pulg.) para la conexión del vacuómetro y unión respectivamente.

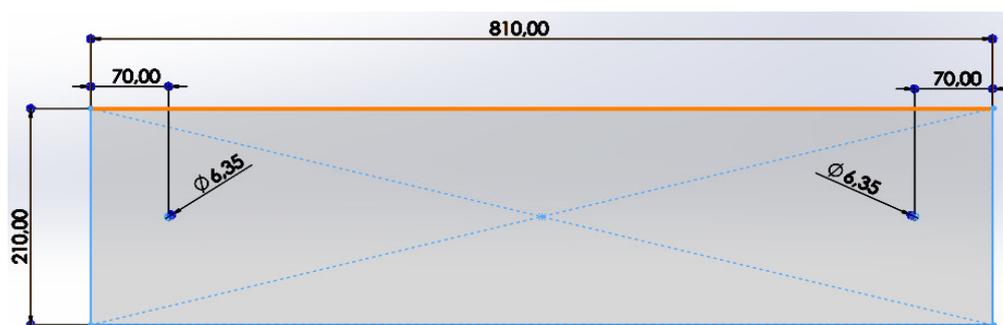


Figura 2.7 Dimensionamiento del acrílico

- Empaque No. 1

En la Figura 2.8 se visualizan las dimensiones del primer empaque (caucho esponja), respetando el área de inspección establecida:

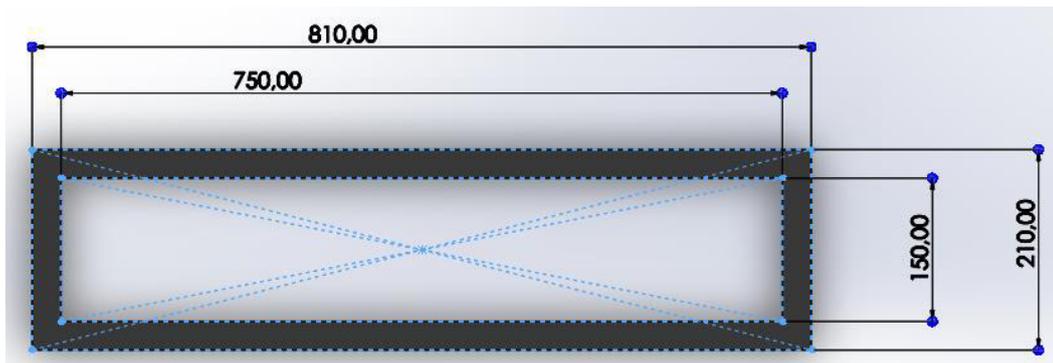


Figura 2.8 Dimensionamiento del empaque de caucho esponja

- Empaque No. 2

La Figura 2.9 muestra las dimensiones del segundo empaque (esponja de alta densidad):

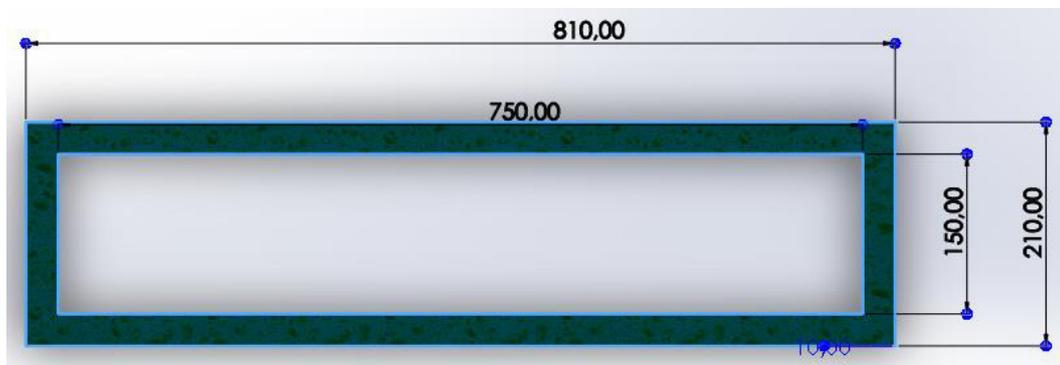


Figura 2.9 Dimensionamiento del empaque de esponja de alta densidad

La adherencia del acrílico, el caucho y la esponja se consigue usando el pegamento denominado llama roja, adecuado para sellar este tipo de materiales, durante este proceso la cámara debe ser prensada para una mejor compactación. En la Figura 2.10 muestra el ensamble generado:

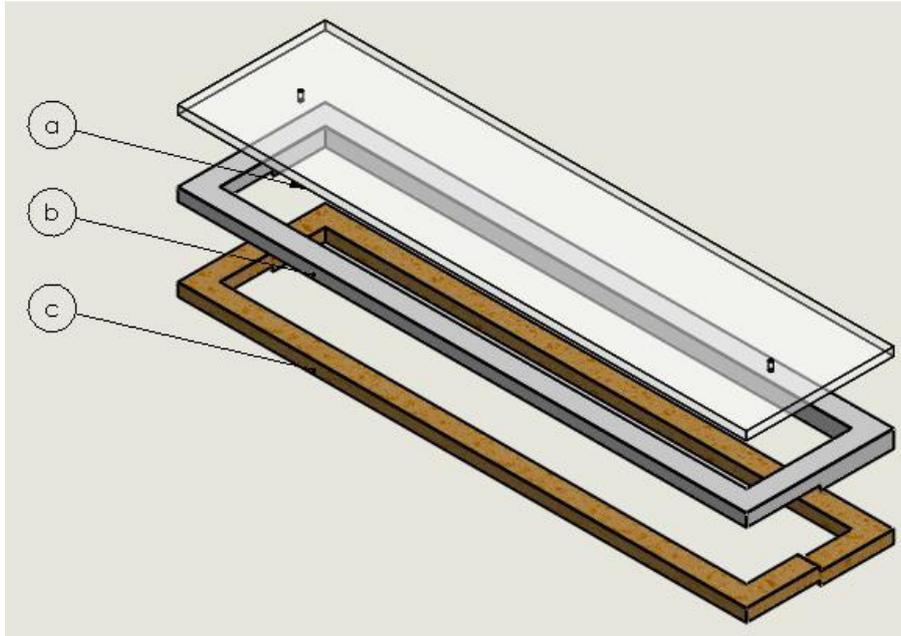


Figura 2.10 Montaje de elementos

Donde:

- a. Ventana acrílica
- b. Empaque de caucho esponjoso
- c. Empaque de esponja de alta densidad

El diseño de la cámara de vacío es simple y proporciona facilidad de montaje, adicional, los agujeros son roscados de manera que se ajusten y sellen las uniones, los acoples machos son envueltos con teflón para garantizar un sello óptimo.

Una vez conocidos los materiales de los que se van a componer la ventana acrílica y los empaques se procede inicialmente a calcular el espesor de la ventana acrílica. Luego tomando como referencia, a la altura H de la cámara de vacío número 5, se le resta el espesor del acrílico calculado para obtener la altura de los empaques, a excepción de la cámara Número 3, todas son para inspección de pisos y techos de tanques, por tanto, cumplen con los requerimientos del código API 650. Se aplica este procedimiento para hallar la altura o espesor de los empaques debido a que, los empaques para cámaras de vacío no siguen el principio de un empaque común (sea automotriz o industrial), en donde es deseable un empaque delgado [41]. Se realiza el cálculo del espesor de la ventana acrílica mediante la teoría de placas [14] y cuyo procedimiento se detalla en el siguiente ítem:

2.7 Cálculo del espesor del acrílico

Las dimensiones seleccionadas para el acrílico permiten manejar y transportar del equipo sin inconvenientes:

Largo: $a = 810$ [mm]

Ancho: $b = 210$ [mm]

Espesor: t [mm]

Se respeta el área de inspección recomendada por el código API 650 (largo interno: 750 [mm] y ancho interno: 150 [mm]). La presión de vacío máxima a la que va a ser sometida la cámara según el código es de 70 kPa (20 pulg. Hg), el diseño propuesto fue analizado para una presión de vacío de 101.3 kPa (30 pulg. Hg), es decir, 0 absoluto. Se enlistan la carga establecida y las propiedades mecánicas del Acrílico necesarias para efectuar el análisis:

$$P_{(x,y)} = q = 101.3 * 10^{-3} \text{ [MPa]}$$

$$E = 31\,000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] = 3040.06 \text{ [MPa]}$$

$$u = 0.33$$

$$S_{ut} = 87 \text{ [MPa]}$$

$$S_y = 58 \text{ [MPa]}$$

Donde:

$P_{(x,y)}$: Carga establecida [MPa]

E : Módulo de Young [MPa]

v : Coeficiente de Poisson

S_{ut} : Esfuerzo último a la tracción [MPa]

S_y : Esfuerzo de cedencia [MPa]

2.7.1 Teoría clásica de placas planas

Es denominado como placa a aquel sólido que posee una de sus dimensiones con un valor muy pequeño, a este se le denomina espesor. El plano medio de placa (Figura 2.11) es la superficie plana que equidista de las 2 caras con mayores dimensiones.

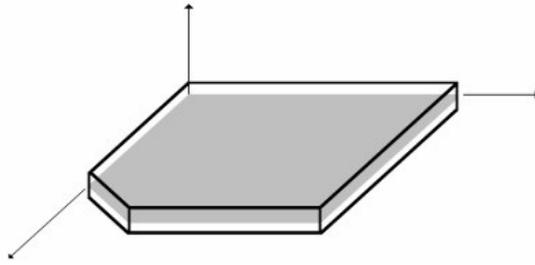


Figura 2.11 Plan medio de una placa
(Fuente: [14])

El estado de placa es definido como el sistema de cargas donde solo actúan momentos contenidos en planos perpendiculares al mismo, es decir, momentos cuyos ejes se encuentran en el plano medio; y fuerzas externas normales al plano medio de la placa. Es posible suponer que en una placa existen variaciones de magnitudes que intervienen en el proceso a lo largo del espesor, y se las puede conglomerar mediante una función conocida con valores respecto al plano medio de la misma. [14]

Las hipótesis necesarias para generar la teoría de placas son las siguientes:

- a) El material de la placa es elástico, homogéneo e isótropo.
- b) Es válida la teoría de las pequeñas deformaciones. La deflexión del 10% del espesor de la placa es considerada como un límite máximo para satisfacer la teoría de pequeñas deformaciones.
- c) Es aplicable la hipótesis de Navier, que manifiesta, en resumen, que todos los puntos situados sobre una recta normal al plano medio de la placa sin deformar, permanecen después de la deformación sobre una recta normal al plano medio deformado.
- d) Los puntos ubicados en el plano medio solo se mueven en la dirección perpendicular al mismo, es decir, solo se considera la deformación provocada por la flexión.
- e) Todos los puntos situados sobre una recta normal al plano medio tienen la misma deflexión, que se traduce de la siguiente forma: $w_{(x,y,z)} = w_{(x,y)}$.
- f) La tensión normal al plano medio de la placa es considerada despreciable.

La aplicación de estas hipótesis permite expresar las deformaciones, tensiones, desplazamientos y esfuerzos en el plano medio solamente en función de la deflexión $w_{(x,y)}$ característica de cada punto de la placa, de esta manera, el problema tridimensional se convierte en bidimensional. Después, son establecidas las ecuaciones de equilibrio, se encuentra la ecuación diferencial en derivadas parciales que satisface la función $w_{(x,y)}$.

- Cálculo de la deflexión

La deflexión en una placa plana se halla mediante series trigonométricas, las series de Fourier en específico aún en su complejidad, proporcionan una solución bastante exacta; el Método de Levy es un método menos complejo basado en series simples, donde una carga q distribuida uniformemente por todo el largo de la placa es perpendicular a la misma, en la Figura 2.12 se muestra la distribución de la carga.

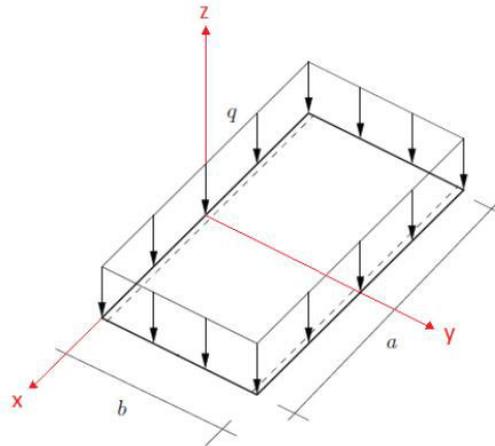


Figura 2.12 Distribución de carga en una placa rectangular
(Fuente: [14])

Al aplicar el Método de Levy deben cumplirse las siguientes condiciones:

- Placa rectangular de dimensiones, $a \times b \times t$.
- Condiciones de empotramiento en 2 bordes paralelos, $w = 0$.
- Condiciones cualesquiera en los otros 2 bordes.

Bajo las condiciones mencionadas, la solución de la deflexión $w_{(x,y)}$ es de la forma:

$$w_{(x,y)} = \sum_{n=1}^{\infty} w_{n(x)} \sin(\lambda_n y) \quad (2.1)$$

En donde:

$$\lambda_n = \frac{n \pi}{b} \quad (2.2)$$

Y, $w_{n(x)}$ es solución de la ecuación diferencial:

$$\frac{d^4 w_{n(x)}}{dx^4} - 2\lambda_n^2 \frac{d^2 w_{n(x)}}{dx^2} + \lambda_n^4 w_{n(x)} = \frac{P_{n(x)}}{D} \quad (2.3)$$

En donde:

$$D = \frac{E t^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad (2.4)$$

$$P_{n(x)} = \frac{2}{b} \int_0^b P_{(x,y)} \sin(\lambda_n y) dy = \frac{2}{b} \int_0^b -q \sin(\lambda_n y) dy$$

$$P_{n(x)} = -\frac{2q}{b} \left(\frac{b}{n\pi} \right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \Big|_0^b \quad (2.5)$$

$$P_{n(x)} = P_n \quad \text{puesto que no depende de } x$$

Entonces:

$$P_n = -\frac{4q}{n\pi} \quad \text{si } n \text{ es impar} \quad (2.6)$$

$$P_n = 0 \quad \text{si } n \text{ es par} \quad (2.7)$$

La Ecuación (2.3) es una ecuación diferencial lineal con coeficientes constantes cuya solución es la suma de una solución homogénea y una particular:

$$w_{n(x)} = w_{n(x)}^h + w_{n(x)}^p \quad (2.8)$$

a) La solución del término homogéneo es:

$$w_{n(x)}^h = (A_n + B_n \cdot \lambda_n \cdot x) \sinh(\lambda_n \cdot x) + (C_n + D_n \cdot \lambda_n \cdot x) \cosh(\lambda_n \cdot x)$$

Como la solución es simétrica en x, las funciones impares tienen coeficientes nulos, dando como resultado:

$$A_n = D_n = 0$$

$$w_{n(x)}^h = B_n \cdot \lambda_n \cdot x \cdot \sinh(\lambda_n \cdot x) + C_n \cdot \cosh(\lambda_n \cdot x) \quad (2.9)$$

b) La solución de la ecuación particular es una constante:

$$w_n^p(x) = \frac{P_n}{D \cdot \lambda_n^4} \quad (2.10)$$

De modo que, la solución general de la Ecuación (2.8) será igual a la sumatoria de las Ecuaciones (2.9) y (2.10):

$$w_{n(x)} = B_n \cdot \lambda_n \cdot x \cdot \sinh(\lambda_n \cdot x) + C_n \cdot \cosh(\lambda_n \cdot x) + \frac{P_n}{D \cdot \lambda_n^4} \quad (2.11)$$

Para resolver estas ecuaciones es necesario aplicar la propiedad de superposición de esfuerzos (Ver Figura 2.13), donde se asume a la placa base como una placa apoyada en sus 4 lados y posteriormente se suma los momentos ocasionados por el empotramiento.

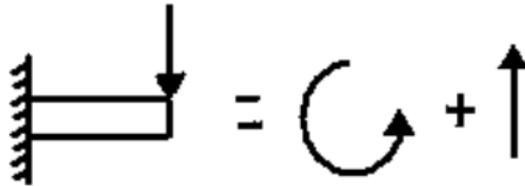


Figura 2.13 Superposición de esfuerzos en una placa empotrada
(Fuente: [14])

Para este caso tenemos las siguientes condiciones de borde:

Cuando: $x = \frac{a}{2} = -\frac{a}{2}$, se obtiene:

$$x = \frac{a}{2} \left\{ \begin{array}{l} M_x = 0 \rightarrow -D(w_{n,xx} + \nu \cdot w_{n,yy}) = 0 \quad (2.12) \\ V_x = 0 \rightarrow -D(w_{n,xxx} + (2 - \nu) w_{n,yyy}) = 0 \quad (2.13) \end{array} \right.$$

Derivando la Ecuación (2.11) respecto a X y agrupando se obtiene:

$$w_{n,x} = \lambda_n [(B_n + C_n) \sinh(\lambda_n \cdot x) + B_n \cdot \lambda_n \cdot x \cdot \cosh(\lambda_n \cdot x)] \quad (2.14)$$

Derivando la Ecuación (2.14)(2.11) respecto a X y agrupando se obtiene:

$$w_{n,xx} = \lambda_n^2 [(2B_n + C_n) \cosh(\lambda_n \cdot x) + B_n \cdot \lambda_n \cdot x \cdot \sinh(\lambda_n \cdot x)] \quad (2.15)$$

Derivando la Ecuación (2.15) respecto a X y agrupando se obtiene:

$$w_{n,xxx} = \lambda_n^3 [(3B_n + C_n) \sinh(\lambda_n \cdot x) + B_n \cdot \lambda_n \cdot x \cdot \cosh(\lambda_n \cdot x)] \quad (2.16)$$

Al evaluar la Ecuación (2.12) se obtiene:

$$M_x = -D(w_{n,xx} + v \cdot w_{n,yy})$$

$$M_x = \sum_{n=1}^{\infty} -D[w_{n,xx} - v \cdot \lambda_n^2 \cdot w_n] \sin(\lambda_n \cdot y)$$

Al evaluar la sumatoria en $x = \frac{a}{2}$:

$$[M_x] = 0 \rightarrow w_{n,xx} - v \cdot \lambda_n^2 \cdot w_{n(x)} = 0 \quad (2.17)$$

Se reemplazan las ecuaciones (2.11) y (2.15) en la Ecuación (2.17) y se obtiene:

$$\lambda_n^2 [(2B_n + C_n) \cosh\left(\lambda_n \cdot \frac{a}{2}\right) + B_n \cdot \lambda_n \cdot \frac{a}{2} \cdot \sinh\left(\lambda_n \cdot \frac{a}{2}\right)]$$

$$- v \cdot \lambda_n^2 \left[B_n \cdot \lambda_n \cdot \frac{a}{2} \cdot \sinh\left(\lambda_n \cdot \frac{a}{2}\right) + C_n \cdot \cosh\left(\lambda_n \cdot \frac{a}{2}\right) + \frac{P_n}{D \cdot \lambda_n^4} \right] = 0$$

Al usar la siguiente ecuación:

$$\alpha_n = \lambda_n \cdot \frac{a}{2} \quad (2.18)$$

Se obtiene:

$$[2B_n + (1 - v)C_n] \cosh(\alpha_n) + (1 - v)B_n \cdot \alpha_n \cdot \sinh(\alpha_n) = \frac{v P_n}{D \cdot \lambda_n^4} \quad (2.19)$$

Ahora al ser evaluada la Ecuación (2.13) se obtiene:

$$V_x = -D(w_{n,xxx} + (2 - v) w_{n,yyy})$$

$$V_x = \sum_{n=1}^{\infty} -D[w_{n,xxx} + (2 - v)(-\lambda_n^2) w_{n,x}] \sin(\lambda_n \cdot y)$$

Y al ser evaluada en $x = \frac{a}{2}$:

$$[V_x] = 0 \rightarrow w_{n,xxx} - \lambda_n^2(2 - \nu) w_{n,x} = 0 \quad (2.20)$$

Se reemplazan las ecuaciones (2.14), (2.16) y (2.18) en la Ecuación (2.20) y se obtiene:

$$\begin{aligned} & \lambda_n^3 [(3B_n + C_n) \sinh(\alpha_n) + B_n \cdot \alpha_n \cdot \cosh(\alpha_n)] \\ & + \lambda_n^3(\nu - 2) [(B_n + C_n) \sinh(\alpha_n) + B_n \cdot \alpha_n \cosh(\alpha_n)] = 0 \end{aligned}$$

Se agrupan los términos y se obtiene:

$$[(1 + \nu)B_n + (\nu - 1)C_n] \sinh(\alpha_n) + (\nu - 1)B_n \cdot \alpha_n \cosh(\alpha_n) = 0 \quad (2.21)$$

La Ecuación (2.19) al ser multiplicada por $\tanh(\alpha_n)$ y sumarse la Ecuación (2.21), se suprime el término C_n , obteniéndose:

$$\begin{aligned} & 2 B_n \sinh(\alpha_n) + (1 + \nu)B_n \sinh(\alpha_n) + (1 - \nu)B_n \cdot \alpha_n \tanh(\alpha_n) \sinh(\alpha_n) \\ & + (\nu - 1)B_n \cdot \alpha_n \cosh(\alpha_n) = \frac{\nu P_n \tanh(\alpha_n)}{D \cdot \lambda_n^4} \end{aligned}$$

Se procede a agrupar términos:

$$\begin{aligned} & \boxed{\eta_n} \\ & \left[(3 + \nu) \sinh(\alpha_n) + (1 - \nu) \cdot \alpha_n \tanh(\alpha_n) \sinh(\alpha_n) + (\nu - 1) \cdot \alpha_n \cosh(\alpha_n) \right] B_n \\ & = \frac{\nu P_n \tanh(\alpha_n)}{D \cdot \lambda_n^4} \end{aligned}$$

Al reemplazar la expresión señalada por el término η_n y despejando B_n el resultado es:

$$B_n = \frac{1}{\eta_n} \cdot \frac{\nu P_n \tanh(\alpha_n)}{D \cdot \lambda_n^4} \quad (2.22)$$

En la Ecuación (2.21) se procede a agrupar términos y se obtiene:

$$B_n [(1 + \nu) \sinh(\alpha_n) + (\nu - 1) \cdot \alpha_n \cosh(\alpha_n)] = (1 - \nu) C_n \sinh(\alpha_n)$$

$$B_n [(1 + \nu) + (\nu - 1) \cdot \alpha_n \tanh(\alpha_n)] = (1 - \nu) C_n$$

$$C_n = \frac{(1 + \nu) + (\nu - 1) \cdot \alpha_n \tanh(\alpha_n)}{(1 - \nu)} \cdot B_n$$

$$C_n = \left[\frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu)} - \alpha_n \tanh(\alpha_n) \right] \cdot B_n$$

$\boxed{\xi_n}$

Reemplazando el término ξ_n la fórmula final es:

$$C_n = \xi_n \cdot B_n \quad (2.23)$$

De esta manera, los coeficientes ahora son conocidos y pueden ser reemplazados según la conveniencia.

2.7.2 Cálculo de la placa acrílica

Debido a que la placa acrílica está adherida al empaque, se asume la condición de los cuatro bordes empotrados (Figura 2.14).

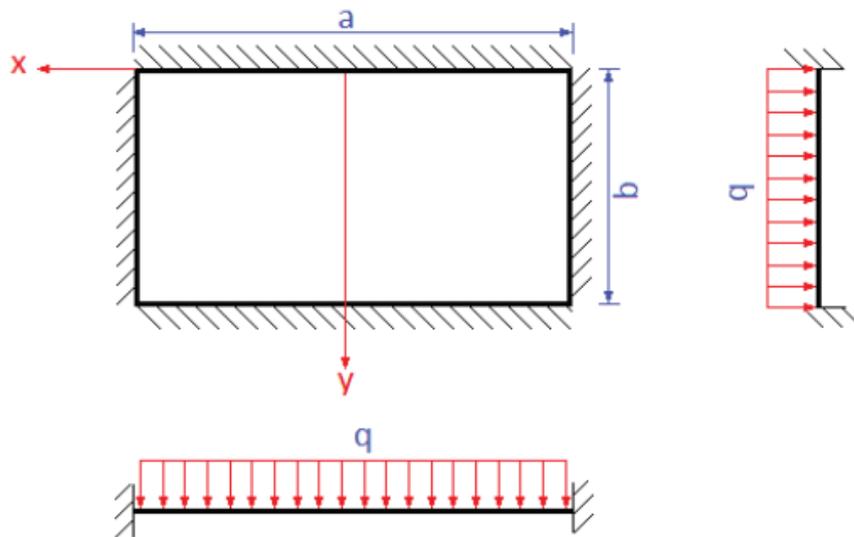


Figura 2.14 Placa acrílica con sus condiciones de borde

(Fuente: [14])

Donde:

$$q = p_{(x,y)} = 101.325 \cdot 10^{-3} \text{ [MPa]}$$

$$a = 810 \text{ [mm]}$$

$$b = 210 \text{ [mm]}$$

$$t \Rightarrow \text{espesor [mm]}$$

En la Ecuación (2.1), el resultado representa una sumatoria de valores impares desde $n = 1$ hasta ∞ , debido a la complejidad de la resolución se particulariza una única solución para $n = 1$, de manera que se encuentra un término no nulo en la sumatoria y se halla una solución precisa en base a la teoría antes mencionada.

Al reemplazar $n = 1$ en las ecuaciones (2.2), (2.4), (2.6), (2.10), (2.18), (2.22), (2.23) se obtuvieron los resultados:

$$\begin{aligned} \text{➤ } \lambda_1 &= \frac{n \pi}{b} = \frac{(1) \pi}{210 \text{ mm}} = 0.015 \left[\frac{1}{\text{mm}} \right] \\ \text{➤ } P_1 &= -\frac{4 q}{n \pi} = -\frac{4 (101.325 * 10^{-3} \text{ Mpa})}{(1) \pi} = -0.129 \text{ Mpa} \\ \text{➤ } \alpha_1 &= \lambda_1 \frac{a}{2} = 0.015 * \frac{810}{2} = 6.06 \\ \text{➤ } D &= \frac{E t^3}{12(1 - u^2)} = \frac{(3040) t^3}{12(1 - 0.33^2)} = 284.30 t^3 \text{ Mpa} = 284.30 t^3 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right] \\ \text{➤ } \frac{P_1}{D * \lambda_1^4} &= \frac{-0.129}{284.30 t^3 * 0.015^4} = -\frac{9060.04}{t^3} [\text{mm}] \end{aligned}$$

$$\eta_1 = (3 + \nu) \sinh(\alpha_1) + (1 - \nu) \cdot \alpha_1 \tanh(\alpha_1) \sinh(\alpha_1) + (\nu - 1) \cdot \alpha_1 \cosh(\alpha_1)$$

$$\eta_1 = (3 + 0.33) \sinh(6.06) + (1 - 0.33) \cdot (6.06) \tanh(6.06) \sinh(6.06) + (0.33 - 1) \cdot 6.06 \cosh(6.06)$$

$$\eta_1 = 712.36$$

$$\text{➤ } B_1 = \frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{\nu P_1 \tanh(\alpha_1)}{D * \lambda_1^4} = \frac{1}{712.36} \cdot \frac{0.33(-0.129) \tanh(6.06)}{284.3 t^3 * 0.015^4}$$

$$B_1 = -\frac{4.197}{t^3} [\text{mm}]$$

$$\text{➤ } \xi_1 = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} - \alpha_1 \tanh(\alpha_1) = \frac{1 + 0.33}{1 - 0.33} - 6.06 \tanh(6.06) = -4.07$$

$$\text{➤ } C_1 = \xi_1 * B_1 = (-4.07) \left(-\frac{4.197}{t^3} \right) = \frac{17.097}{t^3} [\text{mm}]$$

Los coeficientes calculados son reemplazados en la Ecuación (2.1) y se resuelve una solución particular, por tanto, la sumatoria pasa a ser:

$$\rightarrow w_{(x,y)} = w_{n(x)} \sin(\lambda_n y)$$

$$w_{(x,y)} = \left[\frac{P_1}{D \cdot \lambda_1^4} + B_1 \cdot \lambda_1 \cdot x \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x) + C_1 \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x) \right] \sin(\lambda_1 y) \quad (2.24)$$

$$w_{(x,y)} = \left[-\frac{9060.04}{t^3} + \left(-\frac{4.197}{t^3} * 0.015 \cdot x \cdot \sinh(0.015x) \right) + \left(\frac{17.097}{t^3} \cosh(0.015x) \right) \right] \sin(0.015 y) \quad (2.25)$$

- Tensiones en el plano medio de la placa

Al haber hallado la ecuación de la deflexión de la placa, se pudo encontrar los esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy} en un estado plano de tensiones mediante la Ley de Hooke, es decir, la aplicación de propiedades mecánicas del material como **E** (Módulo de elasticidad), **G** (Módulo de rigidez) y **v** (Coeficiente de Poisson).

$$\sigma_x = -\frac{E z}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{d^2 w_{(x,y)}}{dx^2} + \nu \frac{d^2 w_{(x,y)}}{dy^2} \right) \quad (2.26)$$

$$\sigma_y = -\frac{E z}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{d^2 w_{(x,y)}}{dy^2} + \nu \frac{d^2 w_{(x,y)}}{dx^2} \right) \quad (2.27)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\frac{E z}{1 + \nu} \frac{d^2 w_{(x,y)}}{dx dy} \quad (2.28)$$

Donde:

$$z = \frac{t}{2} \quad (2.29)$$

Procediendo a derivar la Ecuación (2.25) y reemplazando las condiciones de deflexión máxima en el centro de la placa:

$$x = 0$$

$$y = \frac{b}{2} = \frac{210}{2} = 105 [mm]$$

Por facilidad se derivada la Ecuación (2.24) para finalmente reemplazar todos los valores y hallar los esfuerzos:

$$\rightarrow \frac{dw_{xy}}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\left[\frac{P_1}{D \cdot \lambda_1^4} + B_1 \cdot \lambda_1 \cdot x \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x) + C_1 \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x) \right] \sin(\lambda_1 y) \right)$$

$$\frac{dw_{xy}}{dx} = [B_1 \cdot \lambda_1 \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x) + B_1 \cdot \lambda_1^2 \cdot x \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x) + C_1 \cdot \lambda_1 \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x)] \sin(\lambda_1 y)$$

$$\rightarrow \frac{d^2 w_{xy}}{dx^2} = [(2B_1 + C_1) \cdot \lambda_1^2 \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x) + B_1 \cdot \lambda_1^3 \cdot x \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x)] \sin(\lambda_1 y)$$

$$\frac{d^2 w_{xy}}{dx^2} = \left[\left(2 \left(\frac{-4.197}{t^3} \right) + \frac{17.097}{t^3} \right) 0.015^2 \cosh(0.015 (0)) + \left(\frac{-4.19}{t^3} \right) 0.015^3 (0) \sinh(0.015 (0)) \right] \sin(0.015 (105))$$

$$\frac{d^2 w_{xy}}{dx^2} = \frac{1.95 \cdot 10^{-3}}{t^3}$$

$$\rightarrow \frac{dw_{xy}}{dy} = \lambda_1 \cos(\lambda_1 y) \left[\frac{P_1}{D \cdot \lambda_1^4} + B_1 \cdot \lambda_1 \cdot x \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x) + C_1 \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x) \right]$$

$$\rightarrow \frac{d^2 w_{xy}}{dy^2} = -\lambda_1^2 \sin(\lambda_1 y) \left[\frac{P_1}{D \cdot \lambda_1^4} + B_1 \cdot \lambda_1 \cdot x \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x) + C_1 \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x) \right]$$

$$\frac{d^2 w_{xy}}{dy^2} = -0.015^2 \sin(0.015 * 105) \left[-\frac{9060.04}{t^3} + \frac{-4.197}{t^3} \cdot 0.015 \cdot (0) \cdot \sinh(0.015 (0)) + \frac{17.097}{t^3} \cdot \cosh(0.015 (0)) \right]$$

$$\frac{d^2 w_{xy}}{dy^2} = \frac{2.02}{t^3}$$

$$\rightarrow \frac{d^2 w_{xy}}{dx dy} = \lambda_1 \cos(\lambda_1 y) [(B_1 + C_1) \cdot \lambda_1 \cdot \sinh(\lambda_1 \cdot x) + B_1 \cdot \lambda_1^2 \cdot x \cdot \cosh(\lambda_1 \cdot x)]$$

$$\frac{d^2 w_{xy}}{dx dy} = 0.015 \cos(0.015 * 105) \left[\left(\frac{-4.19}{t^3} + \frac{17.1}{t^3} \right) \cdot 0.015 \cdot \sinh(0.015 (0)) \right. \\ \left. + \frac{-4.19}{t^3} \cdot 0.015^2 \cdot (0) \cdot \cosh(0.015 (0)) \right]$$

$$\frac{d^2 w_{xy}}{dx dy} = 0$$

El resultado de los esfuerzos son los siguientes:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{E z}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{d^2 w_{(x,y)}}{dx^2} + \nu \frac{d^2 w_{(x,y)}}{dy^2} \right) \\ \sigma_x &= -\frac{3040 \frac{t}{2}}{(1 - 0.33^2)} \left(\frac{1.95 * 10^{-3}}{t^3} + 0.33 \frac{2.02}{t^3} \right) \\ \sigma_x &= \frac{1.14 * 10^3}{t^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_y &= -\frac{E z}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{d^2 w_{(x,y)}}{dy^2} + \nu \frac{d^2 w_{(x,y)}}{dx^2} \right) \\ \sigma_y &= -\frac{3040 \frac{t}{2}}{(1 - 0.33^2)} \left(\frac{2.02}{t^3} + 0.33 \frac{1.95 * 10^{-3}}{t^3} \right) \\ \sigma_y &= \frac{3.45 * 10^3}{t^2} \end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

Al ser $\tau_{xy} = 0$, mediante el Círculo de Mohr en el simulador STRESS TRANSFORMATIONS & MOHR'S CIRCLE [53] se puede observar (Figura 2.15) que los esfuerzos encontrados σ_x y σ_y son iguales a los esfuerzos principales σ_A y σ_B respectivamente, por tanto:

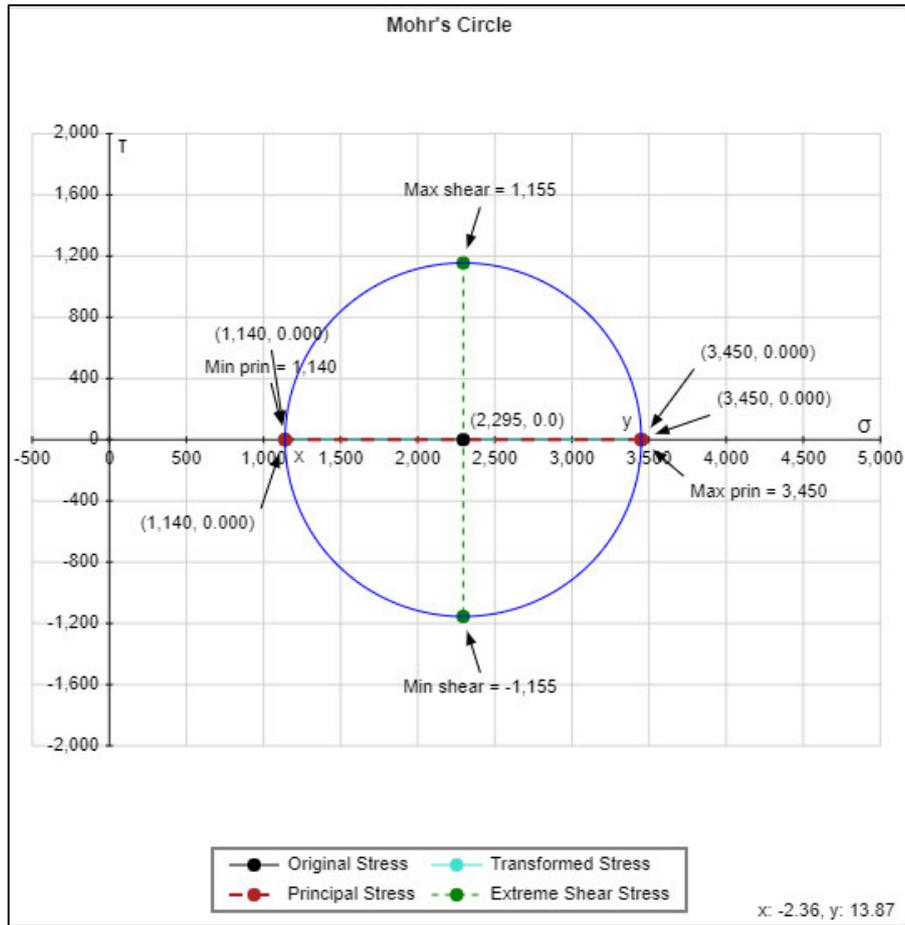


Figura 2.15 Círculo de Mohr

$$\sigma_A = \frac{1.14 * 10^3}{t^2}$$

$$\sigma_B = \frac{3.45 * 10^3}{t^2}$$

Se aplica la Teoría de la energía de la distorsión, misma que no predice falla bajo presión hidrostática y concuerda con todos los datos del comportamiento dúctil. Por consiguiente, es la teoría más empleada para el análisis de materiales dúctiles y se recomienda para los problemas de diseño. [49]

Se asume un caso de tensión simple, por tanto, se considera como un esfuerzo sencillo, equivalente o efectivo del estado general de esfuerzo o también denominado esfuerzo de Von Mises, σ' .

Bajo estas condiciones es aplicable la Teoría de Energía de Distorsión de estado de esfuerzo plano para materiales dúctiles [49], Ecuación (2.30), cuya fórmula representa una

elipse rotada en el plano σ_A, σ_B (Ver Figura 2.16) con el valor del Esfuerzo de Von Mises $\sigma' = S_y$.

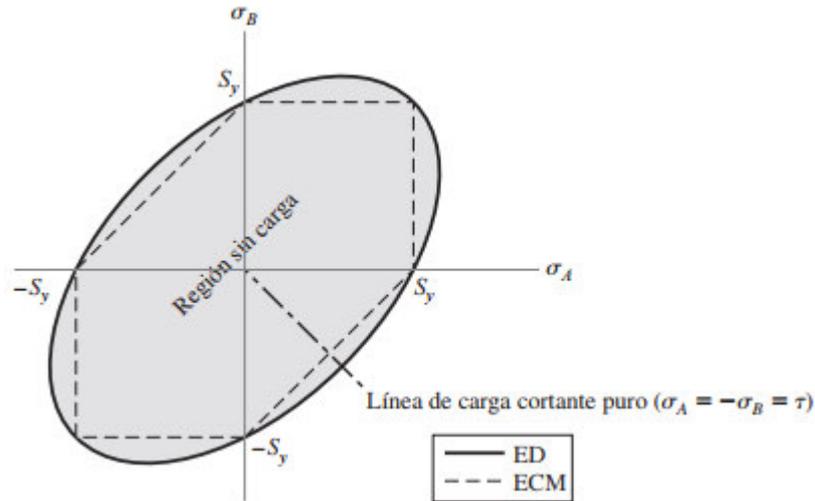


Figura 2.16 Teoría de energía de la distorsión
(Fuente: [49])

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2} \quad (2.30)$$

Donde:

σ' : Esfuerzo de Von Mises

σ_A, σ_B : Esfuerzos principales

Se realiza el cálculo del Esfuerzo de Von Mises:

$$\sigma' = \sqrt{\left(\frac{1.14 * 10^3}{t^2}\right)^2 - \left(\frac{1.14 * 10^3}{t^2}\right)\left(\frac{3.45 * 10^3}{t^2}\right) + \left(\frac{3.45 * 10^3}{t^2}\right)^2}$$

$$\sigma' = \frac{3047.15}{t^2}$$

La placa acrílica es diseñada con 2 agujeros de 1/4 de pulgada, los mismos son concentradores de esfuerzos que son considerados a continuación.

El acrílico es teóricamente tratado como un material dúctil sometido a cargas estáticas, es decir, el material no es susceptible a la falla frágil en el entorno de trabajo. [49] Por consiguiente, se halla el factor geométrico (teórico) de concentración del esfuerzo normal

k_t mediante la Figura 2.17, en donde se muestra los diferentes concentradores de esfuerzos para una placa con un agujero transversal.

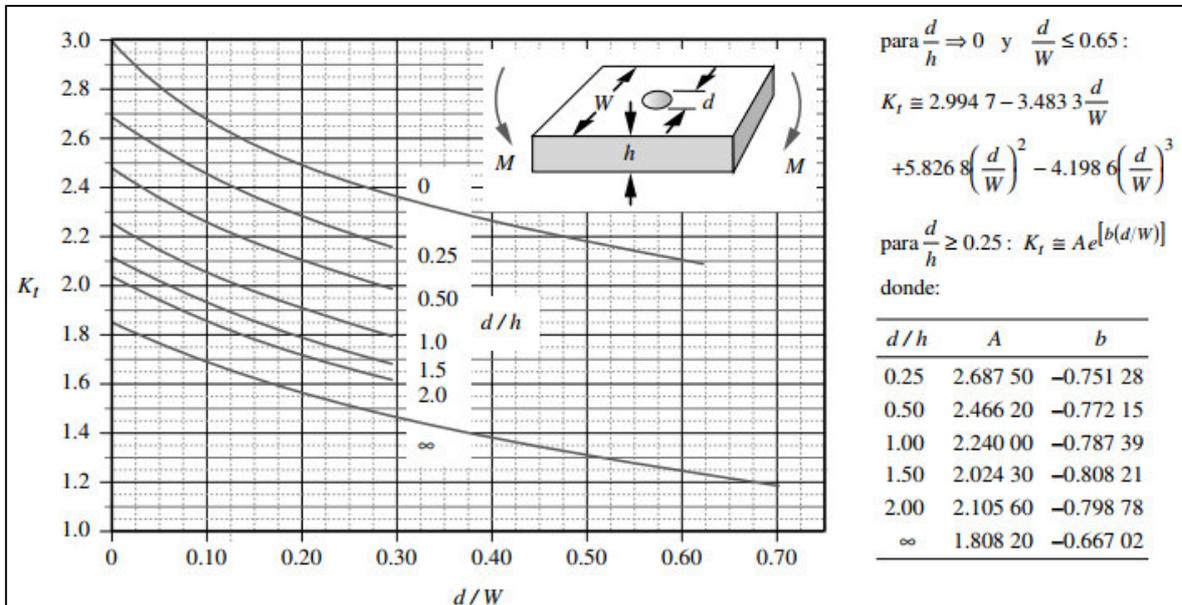


Figura 2.17 Factor geométrico de concentración de esfuerzos k_t para una barra plana con orificio transversal en flexión

(Fuente: [54])

Para hallar el concentrador de esfuerzos se inicia resolviendo la relación $\frac{d}{h}$

$$\frac{d}{h} = \frac{2 * \frac{1}{4} \text{ pulg}}{\frac{1}{2} \text{ pulg}} = 1$$

Donde:

d : diámetro del orificio, en nuestro caso, son 2 orificios por tanto, será $2 * d$

h : espesor de la placa acrílica, $1/2$ pulg

El valor del k_t se puede hallar gráficamente o por medio de la fórmula proporcionada con la relación $\frac{d}{h}$, para resolver mediante el método gráfico se procede a resolver la relación $\frac{d}{W}$

:

$$\frac{d}{W} = \frac{2 * \frac{1}{4} \text{ pulg}}{8.27 \text{ pulg}} = 0.06$$

Donde:

W : ancho de placa acrílica [pulg]

En la Figura 2.18 una vez conocidas las relaciones $\frac{d}{h}$ y $\frac{d}{W}$ se obtiene un valor aproximado de $k_t = 2.6$:

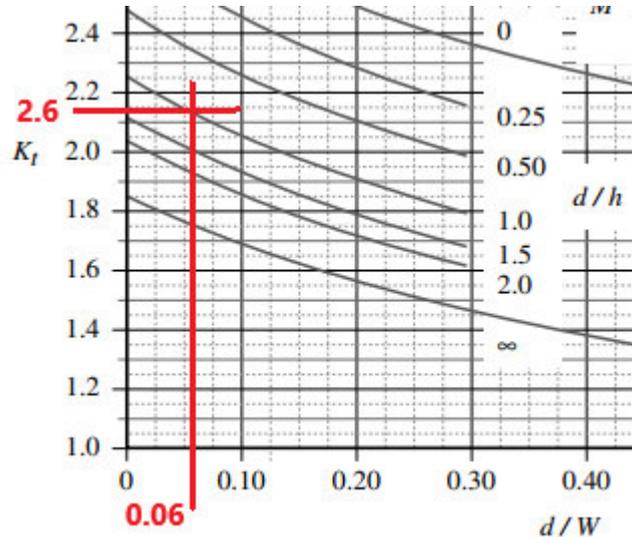


Figura 2.18 Método gráfico para hallar el factor de concentración de esfuerzos k_t

La otra forma para encontrar el k_t es mediante la fórmula que proporciona la relación $\frac{d}{h}$, en donde, para una relación = 1 tenemos la fórmula y valores siguientes:

$$k_t = Ae^{[b(d/W)]} \quad (c.1)$$

Donde:

$$A = 2.24000$$

$$b = -0.78739$$

e : exponencial

d : diámetro, 0.25 [pulg]

W : ancho, 8.27 [pulg]

Se reemplazan los valores y se obtiene el valor de $k_t = 2.23$:

Para este análisis se utiliza el k_t encontrado mediante la fórmula debido a que es un valor mucho más fiable.

$$k_t = 2.13$$

Este valor k_t es multiplicado por el esfuerzo de Von Mises σ' y se obtiene un valor máximo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = k_t \cdot \sigma' \quad (c.2)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 2.13 * \frac{3047.15}{t^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{6642.79}{t^2}$$

Las ecuaciones de la Teoría de la energía de la distorsión indican que una situación de esfuerzo complejo se representa mediante un solo valor llamado Esfuerzo de Von Mises, σ' , el cual se compara con la resistencia a la fluencia del material, S_y . Dicha relación se expresa como una ecuación de diseño llamada ecuación del factor de seguridad Ecuación (2.31):

$$N = \frac{S_y}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (2.31)$$

El valor del factor de seguridad N , es seleccionado en base a la resistencia a la cedencia del material. [55]

- a. $N = 1.25 - 1.5$ para materiales excepcionalmente confiables usados bajo condiciones controladas y sujetos a carga y esfuerzos que pueda determinarse con exactitud. Una consideración importante es que casi siempre se usan para pesos pequeños.
- b. $N = 1.5 - 2$ para materiales bien conocidos, para condiciones de medio ambiente razonablemente contantes y sujetos a carga y esfuerzos que puedan calcularse con facilidad.
- c. $N = 2 - 2.5$ para materiales promedio que trabajen en condiciones de medio ambiente ordinarias y sujetos a carga y esfuerzos que puedan calcularse.
- d. $N = 2.5 - 3$ para materiales poco experimentados o para materiales frágiles en condiciones promedio de medio ambiente, carga y esfuerzo.
- e. $N = 3 - 4$ para materiales no experimentados usados para condiciones promedio de medio ambiente, carga y esfuerzo; aplica también para materiales mejor conocidos que vayan a usarse en condiciones ambientales inciertas o sujetos a esfuerzos inciertos.

- f. Cargas repetidas: son aceptables los factores indicados en los puntos 1 al 5 pero debe aplicarse el límite de ruptura por carga cíclica o esfuerzo de fatiga en lugar del esfuerzo de cedencia del material.
- g. Fuerza de impacto: son aceptables los factores dados en los puntos 3 al 5, pero debe incluirse un factor por impacto.
- h. Materiales frágiles: si se considera a la resistencia última como la máxima teórica, los factores indicados en los puntos 1 al 5 deberán multiplicarse por 2.
- i. Para el caso deseable de tener factores elevados, deberá efectuarse un análisis muy completo del problema antes de decidir su uso.

Es seleccionado el rango de factor de seguridad entre 2 y 3, dicho rango es apto para nuestro caso en donde el material es de limitado uso respecto a la fabricación de cámaras de vacío en nuestro país, también es adecuado para materiales frágiles en condiciones promedio de medio ambiente, carga y esfuerzo.

Para nuestro análisis se usan los factores de seguridad $N_1 = 3$, $N_2 = 2.5$ y $N_3 = 2$ para analizar la varianza del espesor.

Al despejar $\sigma_{m\acute{a}x}$ de la Ecuación (2.31) del factor de seguridad de $N_1 = 3$ expresado en el numeral 4, y posteriormente se obtiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{N}$$

$$\frac{6642.79}{t^2} = \frac{58 \text{ MPa}}{3}$$

Al despejar el espesor se obtiene:

$$t = \sqrt{\frac{3}{58} * 6642.79}$$

$$t_1 = 18.54 \text{ mm}$$

Se realiza el mismo análisis para un factor de seguridad de $N_2 = 2.5$:

$$t = \sqrt{\frac{2.5}{58} * 6642.79}$$

$$t_2 = 16.92 \text{ mm}$$

Se realiza el mismo análisis para un factor de seguridad de $N_3 = 2$

$$t = \sqrt{\frac{2}{58} * 6642.79}$$

$$t_3 = 15.13 \text{ mm}$$

En la Tabla 2.34 se muestran para cada factor de seguridad los valores de espesor en función de la presión cuyas unidades son de depresión (ver Tabla 2.30) donde se considera $P_{atm} = 0$ y $P_{vac} = 101.325 \text{ kPa}$ (30 pulg. Hg).

Tabla 2.34 Tabla de la variación del espesor en función de la presión para cada rendimiento

		N = 2	N = 2,5	N = 3
	P	t	t	t
	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]
Patm	0,1	0,48	0,53	0,58
	10	4,75	5,32	5,82
	20	6,72	7,52	8,24
	30	8,24	9,21	10,09
	40	9,51	10,63	11,65
	50	10,63	11,89	13,02
	60	11,65	13,02	14,26
	70	12,58	14,06	15,41
	80	13,45	15,04	16,47
	90	14,26	15,95	17,47
Pvac	101,33	15,13	16,92	18,54

Para un mejor entendimiento los valores se grafican en la Figura 2.19:

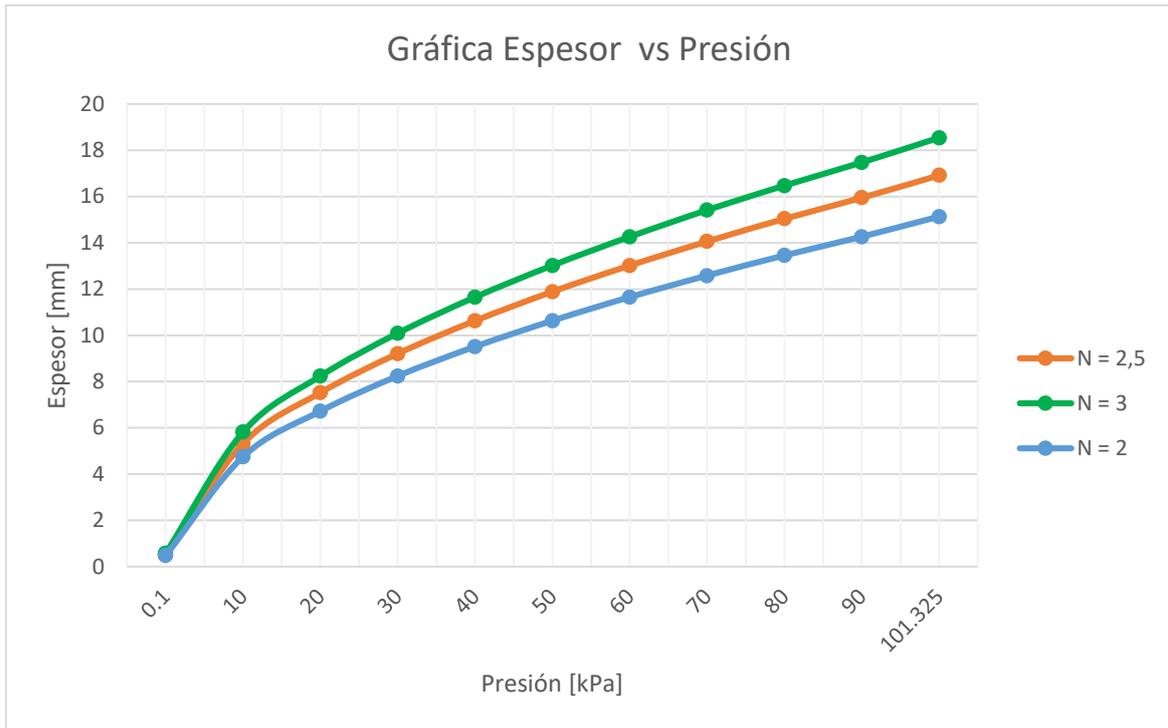


Figura 2.19 Representación gráfica de la variación del espesor en función de la presión

El mercado ofrece láminas acrílicas en espesores de 12mm y 15mm (próximos a los valores calculados), por tanto, se halla la presión que soportan los espesores seleccionados mediante la interpolación lineal que se registran en la

Tabla 2.35 y cuya fórmula es la siguiente:

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (d.1)$$

Donde:

y_0, y, y_1 : representa el valor inicial, medio y final de la presión respectivamente.

x_0, x, x_1 : representa el valor inicial, medio y final del espesor respectivamente.

Tabla 2.35 Interpolación para los espesores de 12mm y 15mm

N = 2		N = 2,5		N = 3	
Interpolación		Interpolación		Interpolación	
P [kPa]	t [mm]	P [kPa]	t [mm]	P [kPa]	t [mm]
60	11,65	50	11,89	40	11,65
63,76	12	50,97	12	42,55	12
70	12,58	60	13,02	50	13,02
90	14,26	70	14,06	60	14,26
99,63	15	79,59	15	66,43	15
101,33	15,13	80	15,04	70	15,41

Se presenta la Tabla 2.36, donde se exponen las presiones de vacío que pueden soportar las placas acrílicas de 12mm y 15mm de espesor con los concentradores de esfuerzos expuestos, cada caso en función principal del factor de seguridad.

Tabla 2.36 Presión de trabajo para los espesores disponibles en el mercado

N = 2		N = 2.5		N = 3	
P [kPa]	t [mm]	P [kPa]	t [mm]	P [kPa]	t [mm]
63.76	12	50.97	12	42,55	12
99.63	15	79.59	15	66,43	15

Para el caso de un factor de seguridad N=2, la ventana acrílica de 12mm de espesor soporta una presión de vacío de 63.76 kPa (18.83pulg. Hg), la ventana acrílica de 15m de espesor soporta una presión de vacío de 99,63 kPa (29.4pulg Hg).

Para el caso de un factor de seguridad N=2.5, la ventana acrílica de 12mm de espesor soporta una presión de vacío de 50.97 kPa (15.05pulg. Hg), la ventana acrílica de 15m de espesor soporta una presión de vacío de 79.59 kPa (23.5pulg Hg).

Para el caso de un factor de seguridad $N=3$, la ventana acrílica de 12mm de espesor soporta una presión de vacío de 42.55 kPa (12.5pulg. Hg), la ventana acrílica de 15mm de espesor soporta una presión de vacío de 66.43 kPa (19.6pulg. Hg).

Una vez analizados los 3 casos es seleccionada la placa de 12mm con un factor de seguridad de $N=2$, bajo estas condiciones la ventana acrílica puede soportar una presión de 63.76 kPa (18.83pulg. Hg) que es próximo al requerimiento por el código API 650 (20pulg. Hg), en vista que la diferencia es mínima, el material no sufrirá daño alguno puesto que el factor de seguridad es alto, el costo también juega un papel importante, la ventana acrílica de 12mm es menos costosa que la ventana de 15mm.

Para la ventana acrílica se halla el valor del esfuerzo de Von Mises para la placa de 12mm y presión establecida:

$$\sigma' = \frac{3047.15}{t^2}$$

$$\sigma' = \frac{3047.15}{12^2}$$

$$\sigma' = 21.16 \text{ MPa}$$

El espesor seleccionado (12mm) es sometido a un paquete computacional CAD donde se demuestra que es correcto mediante un análisis estático bajo las mismas condiciones de presión y espesor ($P_{x,y} = 101.325 \text{ kPa}$ y $t = 12\text{mm}$) y no existe fallo bajo estas condiciones de trabajo.

2.8 Espesores de los empaques

Los empaques son fabricados generalmente en espesores delgados siempre que sea posible, como beneficio de esto se reducen los costos, las emisiones, la pérdida del producto y aumenta la resistencia al reventamiento. Por otro lado, empaques delgados no sellan eficientemente irregularidades de superficies como lo hacen empaques gruesos. [41] Este caso es especial donde la junta no solo debe encargarse de cubrir la permeabilidad sino también debe adaptarse a la superficie a examinar (a la forma del cordón de soldadura sea a tope o a traslape y las imperfecciones que pudieran encontrarse en la superficie) cuyo espesor de placa puede variar desde 6 a 40mm. [9]

Para los empaques no metálicos ASME recomienda tres espesores: 0.8mm (1/32 pulg), 1.6 mm (1/16 pulg), y 3.2mm (1/8 pulg), siguiendo como regla general que el empaque sea

de espesor suficiente para cubrir las irregularidades, para casos que no entran en la regla general se recomienda, en base a aplicaciones prácticas con buenos resultados que el espesor sea igual a cuatro veces la profundidad de las ranuras; la formula e.1 representa este concepto. [56]

Se asume que la ranura es la altura del traslape, en este caso es 12.5mm (1/2 pulg) (Ver Figura 2.20).

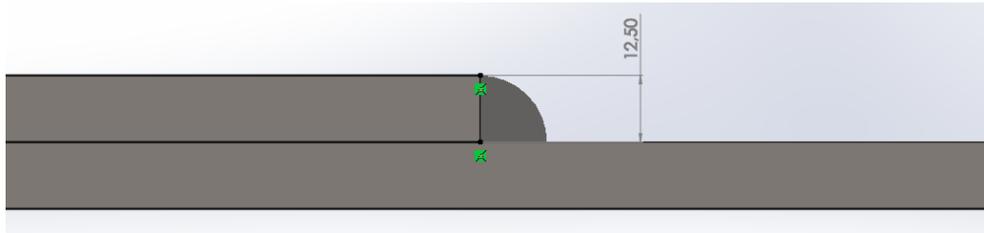


Figura 2.20 Espesor de la placa del piso del tanque

Entonces:

$$t_e = 4 * h_{traslape} \quad e.1$$

$$t_e = 4 * 12.5mm$$

$$t_e = 50mm$$

Siendo:

t_e : espesor del empaque

$h_{traslape}$: altura del traslape

Es conveniente utilizar 2 empaques para suplir un solo espesor grueso por 2 relativamente menores pero equivalentes al mismo valor para evitar la pérdida de elasticidad del mismo, es decir, pierdan su capacidad de deformación.

El primer empaque (Ver Figura 2.21) hecho de caucho esponjoso; se deforma verticalmente por acción de la presión de vacío y la fuerza generada por el técnico inspector sobre la ventana acrílica hacia el piso, de manera que se comprime y adopta en un 75% la superficie inspeccionada, el ancho del empaque garantiza que la deformación horizontal sea mínima por la presión en el interior de la cámara. El empaque posee un espesor de 25 mm, adecuado para este tipo de cámara. El empaque se diseña con la cara superior plana y la cara inferior posee un desnivel de 7 mm para cubrir el cambio de geometría generada por la soldadura a traslape. (Ver Figura 2.22)

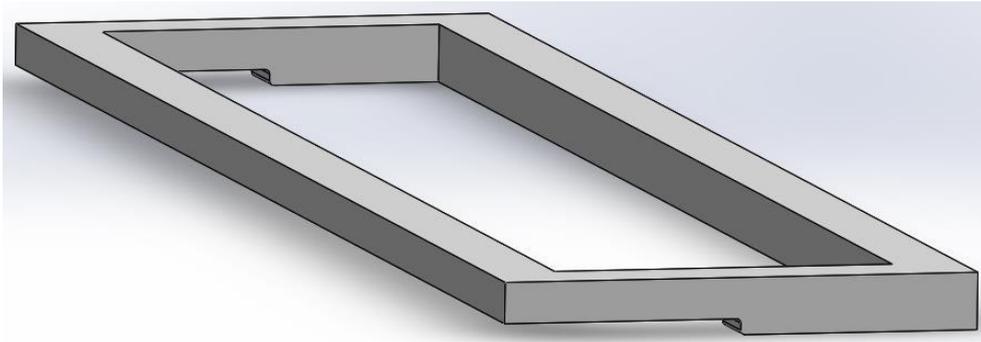


Figura 2.21 Vista isométrica del empaque de caucho esponja

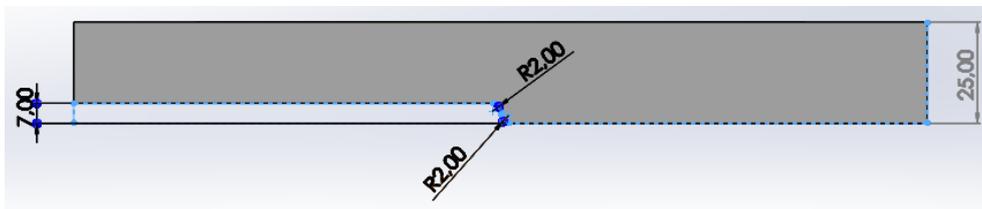


Figura 2.22 Espesor del empaque esponjoso

El segundo empaque (Ver Figura 2.23) hecho del material esponja de alta densidad; se encarga de cubrir el 25% de la deformación restante, refiriéndose a los cambios bruscos de geometría de las planchas y el cordón que las une y, además, las pequeñas imperfecciones de la superficie. Este empaque tiene un espesor de 25 mm, suficiente para cubrir imperfecciones de la superficie a inspeccionar. Es diseñado con un cambio de geometría en la cara superior de manera que se acople a la cara inferior del primer empaque; la cara inferior del segundo empaque posee igualmente un cambio de geometría de 7 mm de manera que cubre pequeños espacios que el primer empaque no llena (Figura 2.24).

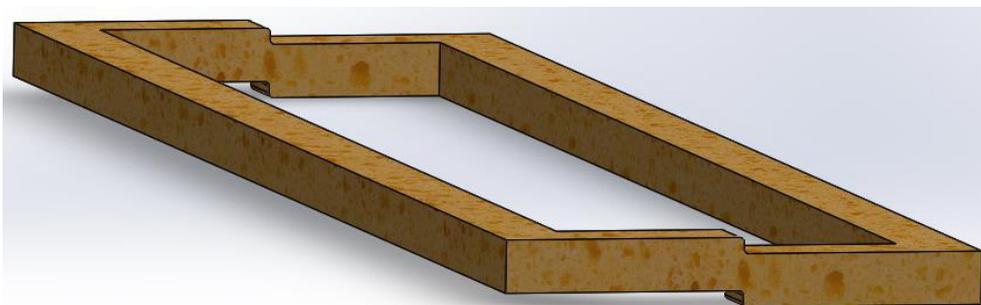


Figura 2.23 Vista isométrica del empaque de espuma de alta densidad

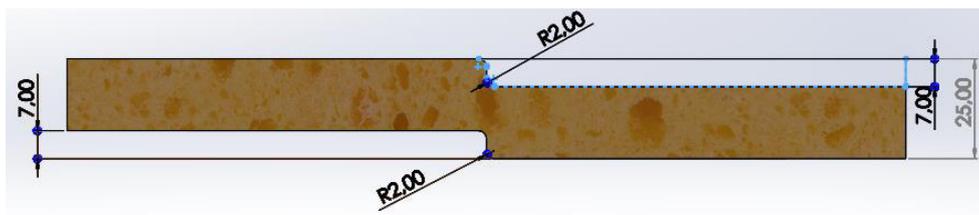


Figura 2.24 Espesor del empaque de espuma de alta densidad

2.9 Estimación de costos

El costo total de la cámara de vacío es representado a través del costo de construcción, se procede a efectuar el desglosamiento de todos los costos generados como son: adquisición de materias primas, mano de obra empleada, maquinado, accesorios y equipo de vacío. En la Tabla 2.37 se detallan los parámetros de cada grupo establecido para efectuar la estimación correspondiente de la cámara de vacío, accesorios y equipo necesario para inspeccionar juntas soldadas de tanques:

Tabla 2.37 Detalle de materiales usados

MATERIALES
Plancha laminada de acrílico transparente
Plancha caucho esponja
Plancha esponja de alta densidad
EQUIPOS Y ACCESORIOS
Unión macho
Niple hembra
Eyector Venturi
Válvulas de control
Vacuómetro
Acople de aire
Manguera
Compresor
USO DE MAQUINARIA / EQUIPO
Corte del acrílico transparente
Corte del caucho esponja
Corte de espuma de alta densidad
OTROS VALORES
Pegamento para sellado
Mano de obra construcción
Otros

En el apartado 3.2 se detallan los valores, dimensiones, proveedores y el uso de cada ítem enumerado.

3. Resultados y Discusión

3.1 Cumplimiento del diseño de la campana de vacío para la inspección de tanques de almacenamiento

La aplicación del Método de criterios ponderados selecciona la cámara de vacío VBT CO. con un peso ponderado de 0.23, claramente demostrado en el apartado 2.4.4, por tanto, la mencionada cámara sirve de matriz guía para crear una cámara con un diseño simple y acorde a las necesidades propias del medio en cuanto a inspección no destructiva de tanques de almacenamiento se refiere.

Mediante la Tabla 3.1 se compara los requerimientos del código API 650 con los datos propuestos y hallados (dimensiones y presión respectivamente) de la cámara de vacío re-diseñada, recalcando que el código solo pide el cumplimiento del área de inspección y la presión de trabajo con respecto a la cámara, adicional un vacuómetro certificado y calibrado, y más bien se enfoca a un lineamiento para efectuar una prueba de burbuja óptima.

Tabla 3.1 Detalle de materiales usados

	API 650	CÁMARA VBT CO.	CÁMARA RE-DISEÑADA
Área de inspección recomendada	Ancho: 150 mm Largo: 750 mm	Ancho: 190 mm Largo: 762 mm	Ancho: 150 mm Largo: 750 mm
Presión de prueba 1	6 – 10 pulg Hg	Máx. 22 pulg Hg	Máx. 18.83 pulg Hg
Presión de prueba 2	16 – 20 pulg Hg		

Se comprueba que la cámara de vacío re-diseñada cumple con el requerimiento del Área de inspección y la presión de prueba que debe soportar en los valores establecidos por el código API 650. La estructura de la cámara de vacío (ventana acrílica y empaques) fue sometida de manera individual a un estudio con condiciones de área de inspección y presión según el código, de manera que los espesores hallados son los óptimos para una prueba de burbuja. En la placa acrílica se simula las condiciones de trabajo siguientes:

- a) Es aplicada la condición de geometría fija en los bordes inferiores de manera que, asemeje el contacto entre placa y empaque (Ver Figura 3.1).

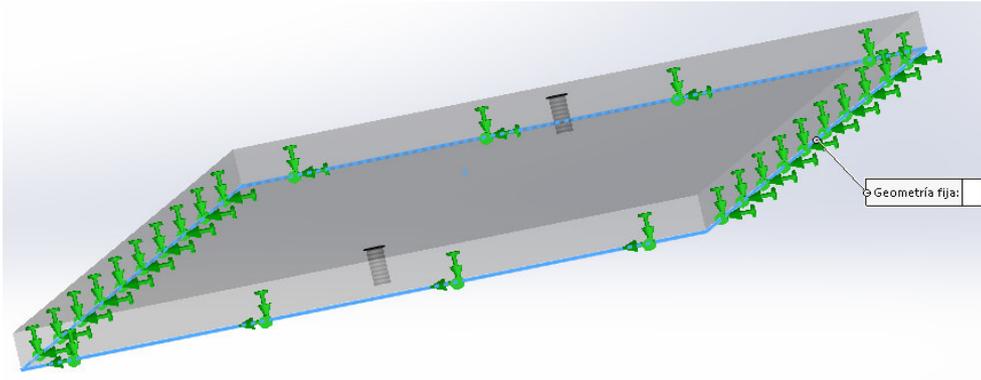


Figura 3.1 Geometría fija del borde inferior de la placa acrílica

b) Se establece una presión de 20 pulg. Hg (67727.8 Pa) en la parte inferior, asemejando la succión producida en el interior de la cámara (Ver Figura 3.2).

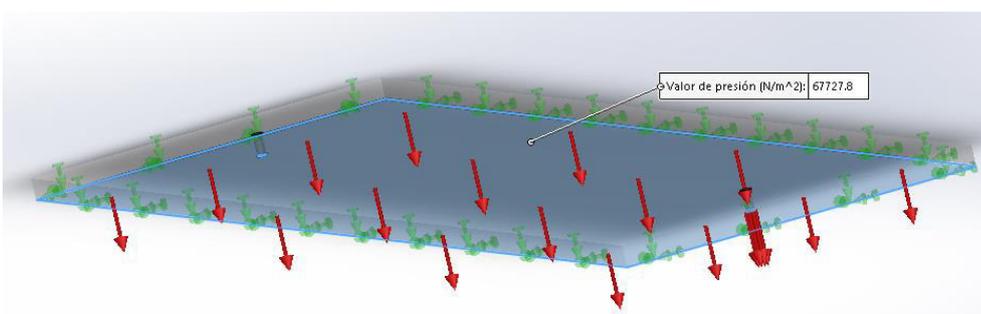


Figura 3.2 Presión en la parte inferior de la placa acrílica.

c) La presión que ejerce el peso de una persona de 67Kg sobre la placa acrílica de la cámara: (Ver Figura 3.3).

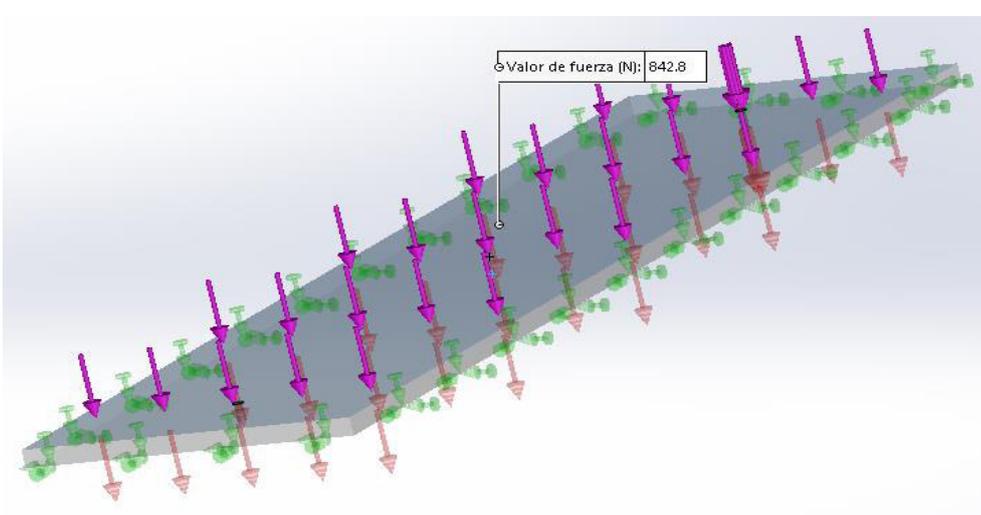


Figura 3.3 Geometría fija del borde inferior de la placa acrílica

- d) Se genera una malla fina con una densidad del 75%, de esta manera se aseguran datos con mayor grado de precisión y exactitud. (Ver Figura 3.4)

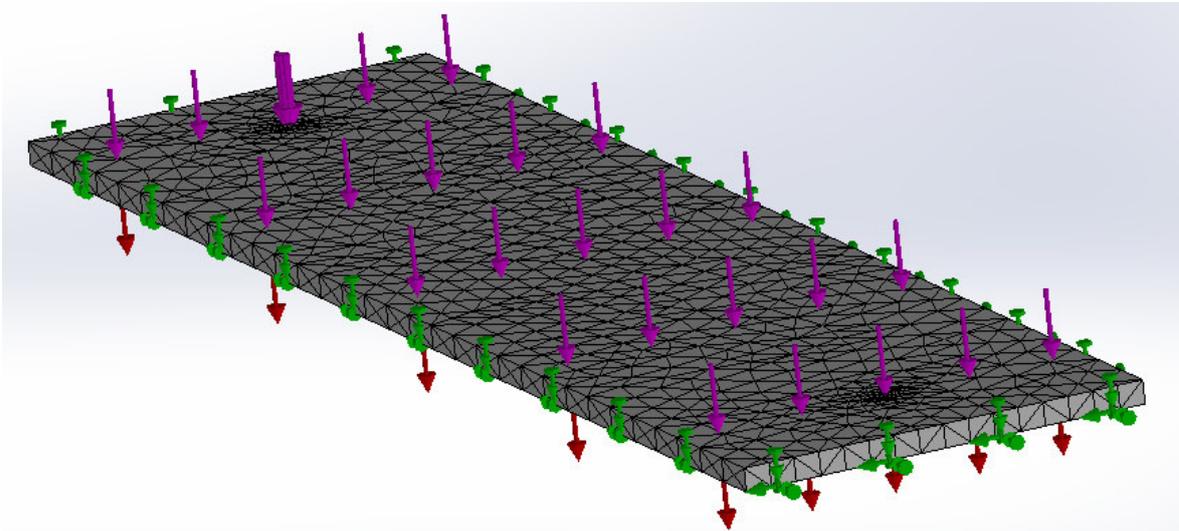


Figura 3.4 Geometría fija del borde inferior de la placa acrílica

El valor del esfuerzo de Von Mises simulado es 23.39 MPa (Figura 3.5).

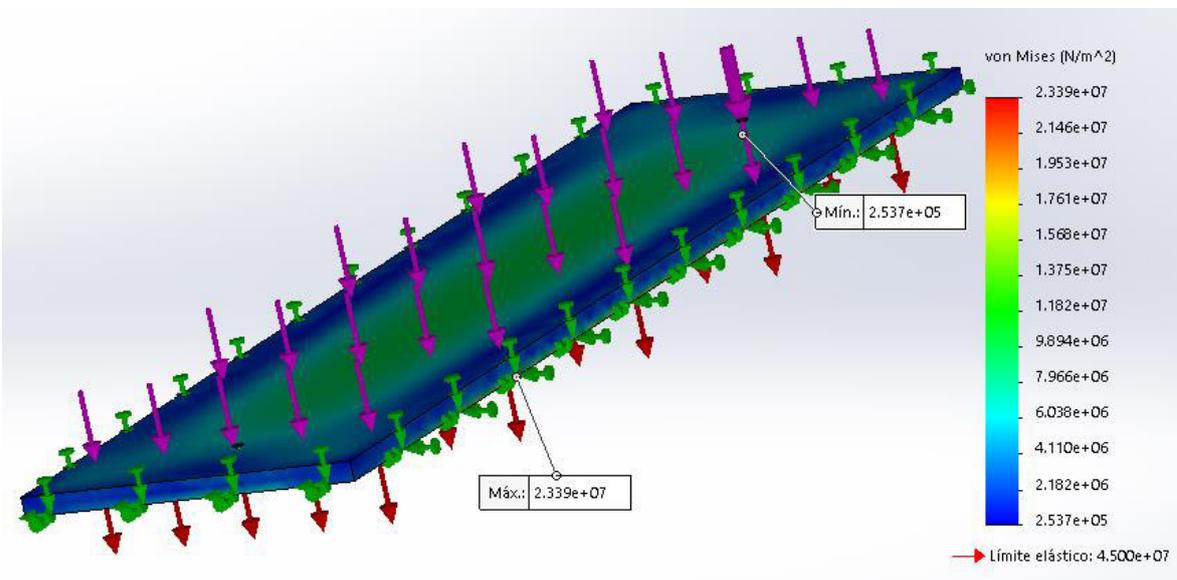


Figura 3.5 Esfuerzo de Von Mises mediante simulación

En vista que el valor calculado (21.16 MPa) es próximo al valor hallado mediante simulación (23.39 MPa), entonces se comprueba que el espesor de placa acrílica de 12mm soporta las condiciones establecidas de la prueba de vacío. Posteriormente los espesores de los empaques se hallan en base al estudio efectuado por ASME para empaques no metálicos [56], por tanto, los valores hallados son comprobados.

Un par de cambios importantes se realizan en los empaques, el reemplazar un empaque grueso por 2 empaques de menor espesor, pero equivalente al primer empaque genera facilidad de montaje cámara de vacío – piso del tanque, y también el diseño con cambio de geometría de 7mm en vez de un empaque plano, facilita el montaje la cámara sobre la junta sea a traslape o a tope. Al variar de esta manera los empaques de la cámara de vacío se está generando un sellado verdaderamente eficiente, ya que, se cubren los espacios pequeños y difíciles con una presión menor sobre la cámara por parte del técnico inspector.

Con respecto a los accesorios, instrumentación y equipo de vacío que complementan la cámara de vacío re-diseñada, también pasaron por un estudio de presión acorde al valor establecido en API 650, por tanto, todo este conjunto se encuentra enlistado en la Tabla 3.2 es necesario para efectuar la prueba de vacío. El ensamble del conjunto y la estructura de la cámara debe ser minuciosa y aunque según ASME [20] no se requiere de personal especializado para el ensamble, deber ser un técnico con conocimientos básicos de ensamblado.

3.2 Análisis de costos de construcción

En la Tabla 3.2 se detallan los costos que involucran el construir y montar la cámara de vacío re-diseñada para efectuar una inspección de juntas soldadas:

Tabla 3.2 Detalles de costos de construcción

MATERIALES							
Item	Descripción	Unidades	Dimensiones [m]	Proveedor	Referencia	Costo x Unid.	Costo Total
1	Plancha laminada de acrílico transparente	1	0,6X1,20 X0,012	D. BOSTON	Ventana Transparente	\$199,62	\$199,62
2	Plancha caucho esponja	1	0,9x1x0,025	Consucauchos NC.	Empaque No.1	\$32,26	\$32,26
3	Plancha esponja de alta densidad	1	1x2x0,03	Casa de la esponja	Empaque No. 2	\$18,00	\$18,00
EQUIPOS Y ACCESORIOS							
Item	Descripción	Unidades	Dimensiones	Proveedor	Referencia	Costo x Unid.	Costo Total
1	Unión macho	3	1/4"	Ferrisariato	Sujeto al acrílico	\$0,25	\$0,75
2	Niple hembra	2	1/4"	Ferrisariato	Conexión a unión	\$0,25	\$0,50
3	Eyector venturi	1	1/4"	Ozonec Ecuador	Producir vacío	\$36,00	\$36,00
4	Válvula de control	1	1/4"	Ferrisariato	Regulador de vacío	\$6,70	\$6,70
5	Válvula de control	1	3/4"	Ferrisariato	Regulador de entrada	\$6,70	\$6,70
6	Vacuómetro	1	1/4"	Tecnimetro	Medidor de presión	\$99,68	\$99,68
7	Acople de aire	1	3/4"	Ferrisariato	Conexión manguera	\$1,25	\$1,25
8	Manguera	1	3/4"	Ferrisariato	Conexión compresor	\$52,37	\$52,37
9	Compresor	1	2HP	Mega Kiwi	Fuente de vacío	\$79,91	\$79,91
USO DE MAQUINARIA / EQUIPO							
Item	Descripción	Unidades	Dimensiones [m]	Proveedor	Referencia	Costo x Unid.	Costo Total
1	Corte del acrílico transparente	1	0,81 x 0,21	D. BOSTON	Ventana Transparente	\$10,71	\$10,71
2	Corte del caucho esponja	1	0,81 x 0,21	Consucauchos NC.	Empaque No.1	\$15,00	\$15,00
3	Corte de espuma de alta densidad	1	0,81 x 0,21	Casa de la esponja	Empaque No. 2	\$10,00	\$10,00
OTROS VALORES							

Item	Descripción	Unidades	Dimensiones [m]	Proveedor	Referencia	Costo x Unid.	Costo Total
1	Pegamento para el sellado	1	-	D. BOSTON	Sello de la cámara	\$4,78	\$4,78
2	Mano de obra construcción	1	-	-	Armado	\$50,00	\$50,00
3	Otros	1	-	-	-	\$50,00	\$50,00
TOTAL							\$674,23

Se efectúa una tabla resumen donde se detalla el valor por cada parámetro de construcción establecido en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Detalles de costos por parámetro.

	COSTO [\$]
MATERIALES	249,88
EQUIPOS Y ACCESORIOS	283,86
USO DE EQUIPOS DE CORTE	35,71
OTROS VALORES	104,78
TOTAL	674,23

En la Figura 3.6 se reflejan los valores porcentuales por cada parámetro.

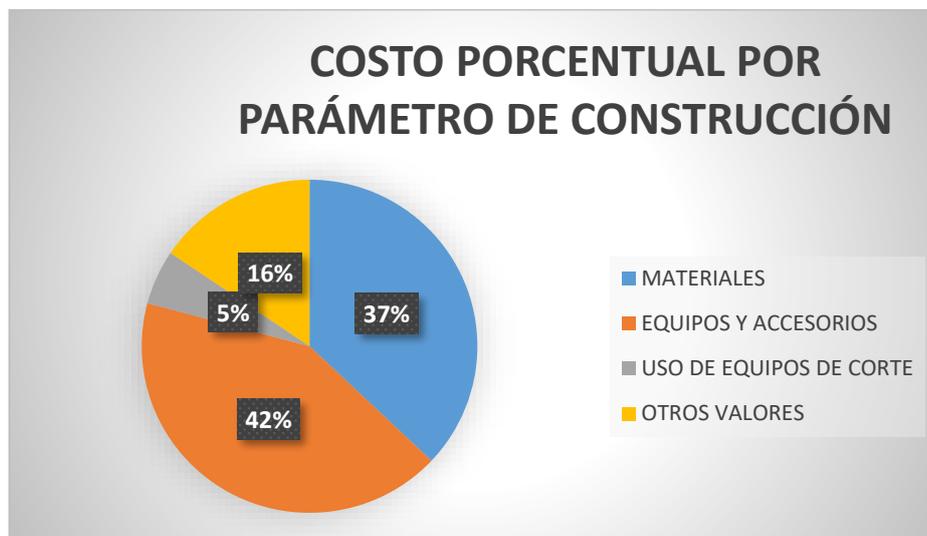


Figura 3.6 Costo porcentual por parámetro de construcción

3.3 Comparación de costos de la cámara de vacío

Todas las cámaras son importadas a excepción de la cámara Leister VB y la cámara rediseñada propiamente, al comparar los costos de las cámaras estudiadas se toma en cuenta dicho valor de logística e importación y cuyo cálculo es en base a una compañía experta en este campo [57], en la Tabla 3.4 se resumen los valores para cada cámara:

Tabla 3.4 Detalle de materiales usados

Item	V750	V600LP	LEISTER VB	VBT CO.	TPS 30FBLJ	RE-DISEÑADA
Costo	\$3.145,00	\$2.500,00	\$1.147,00	\$470,54	\$628,00	\$674,23
Importación	\$1.473,85	\$1.167,76	-	\$221,59	\$281,94	-
TOTAL	\$4.618,85	\$3.667,76	\$1.147,00	\$692,13	\$909,94	\$674,23

Para un mejor entendimiento en la Figura 3.7 se representan los valores totales de cada cámara de vacío.

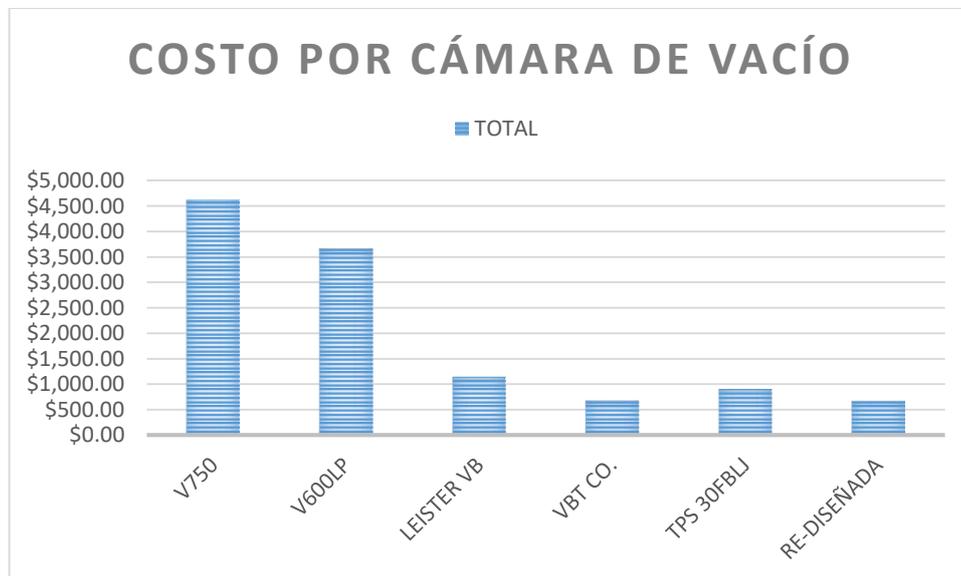


Figura 3.7 Valores totales de las cámaras de vacío analizadas

En la Figura 3.8 se establecen los valores porcentuales que representan cada cámara de vacío analizada.

COSTO PORCENTUAL DE LAS CÁMARAS DE VACÍO

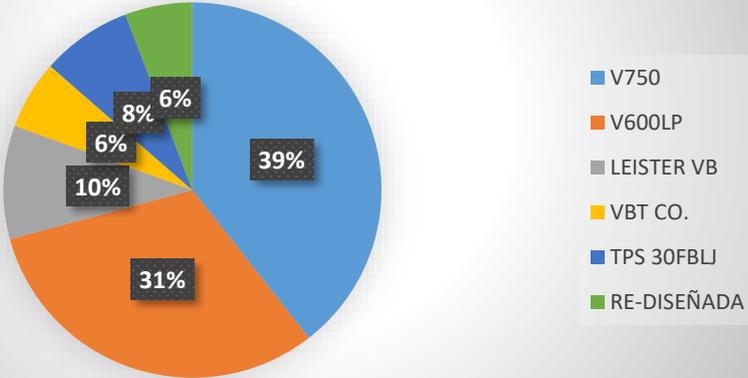


Figura 3.8 Valores porcentuales de las cámaras de vacío

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La ingeniería inversa permitió delinear de forma ordenada y secuencial el proceso de re-diseño de la cámara de vacío de manera cuantitativa.
- Se comprendió los lineamientos que debe cumplir y bajo los cuales será operada la cámara de vacío según el código API 650.
- Se entendió la finalidad de cada componente de la cámara de vacío, y posteriormente, se analizaron varias cámaras de vacío desde su origen de adquisición hasta las condiciones de trabajo de manera que, se seleccionó la adecuada en cumplimiento del método de criterios ponderados.
- Fueron seleccionados los materiales, accesorios, instrumentos y equipo que complementan al diseño propuesto y que cumple los parámetros de operación que rigen en el código API 650 (Área de inspección y presión de prueba).
- Se concluye que la construcción de la cámara de vacío es viable con los materiales propuestos; el valor puede variar por la influencia del covid-19 en el país, que ha provocado una inflación de los productos en un 1.30%.
- Al elegir que la fuente de vacío sea por eyector Venturi y compresor, el costo es 5.4% mayor que si la fuente de vacío fuera por bomba de vacío.
- El costo de la cámara re-diseñada representa el 6% de la sumatoria de los valores de todas las cámaras, dicho valor es menor en comparación a las alternativas propuestas, a excepción de la cámara Leister VB, debe sumarse el valor de importación al resto de alternativas.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda simular el comportamiento de la cámara de vacío bajo las condiciones expuestas, de manera que pueda comprobarse los cálculos efectuados con mayor precisión.
- Se recomienda para futuros estudios de cámaras de vacío para fines similares, buscar la simplicidad de los diseños.
- Es recomendable aprovechar la información que puede proporcionar el personal enfocado en actividades no destructivas de cámaras de vacío, como guía de trabajo.
- Se recomienda que, al buscar proformas, sea tanto en medios físicos como digitales, a causa de la mayoritaria falta de colaboración que existe en el mercado ecuatoriano.

5. Referencias Bibliográficas

- [1] L. Romero, «Elaboración de procedimientos para la inspección técnica, mantenimiento y reparación de tanques a presión para almacenamiento de G.L.P.,» Quito, Ecuador, 2013.
- [2] M. Mateus y D. Vivas, «Mantenimiento de tanques hidrostáticos de techo fijo para la Industria Petrolera,» Quito, Ecuador, 2007.
- [3] A. Canga y C. Beltrán, «Control de calidad en la soldadura de la estructura metálica del terminal de transporte terrestre del cantón Gualaceo de la provincia del Azuay,» Cuenca, Ecuador, 2019.
- [4] A. Fernández y L. Ramírez, «Propuesta de un plan de mejoras, basado en gestión por procesos, para incrementar la productividad en la Empresa Distribuciones A & B,» Pimentel, 2017.
- [5] F. Wallas y D. Zubik, «Ingeniería inversa como facilitador del desarrollo de maquinaria y equipo para la industria local,» Presentado en 2da Jornada de Investigación y Vinculación, Sonora, México, 2020.
- [6] J. Valverde, «Desarrollo de metodologías enfocadas a aplicaciones de ingeniería inversa para reproducir objetos mediante escaneo 3D, sistemas cad/cam y prototipado rápido,» Quito, Ecuador, 2019.
- [7] E. Jiménez, L. Reyes y A. García, «Algunas consideraciones sobre la Ingeniería Inversa, Informe Interno de Investigación, Centro de Tecnología Avanzada de ITESCA,» *Red Alfa Sonora*, vol. 12, nº 5, pp. 970-9895, 2006.
- [8] C. Riba, «Ingeniería Concurrente,» Ediciones UPC, España, 2002.
- [9] API Code 650, Standard 650. Welded steel tanks for oil storage, American Petroleum Institute, 2013.
- [10] E. Villesa, «Tema 2. Ensayos no Destructivos,» Instituto Politécnico Nacional, 2016.
- [11] R. Patricia, «Ensayos No Destructivos,» Quito, 2018.
- [12] L. Mosquera, «Análisis de la variación de las propiedades mecánicas en un acero ASTM A-572 por la presencia de defectos típicos en soldadura bajo la Norma API 1104,» Quito, Ecuador, 2020.
- [13] J. Lema y R. Valdiviezo, «Análisis y obtención de curvas características de elementos y circuitos electrónicos utilizando el software LabVIEW y el VIS por medio de tarjetas MyDAQ,» Riobamba, Ecuador, 2013.

- [14] J. Armas y S. Caviedes, «Diseño y construcción de un prototipo de cámara de presiones bajas para el estudio experimental de reducción de porosidades en las etapas de colado y solidificación de aleaciones de aluminio para el Laboratorio de Fundición de la F.I.M - E.P.N.,» Quito, Ecuador, 2013.
- [15] O. Arcos, «Ensayo de tintas penetrantes fluorescentes y su incidencia en el control de calidad de las juntas soldadas en aceros al carbono,» Ambato, Ecuador, 2011.
- [16] M. Cedeño, «Diseño sismo-resistente de tanques de acero soldados, para almacenamiento atmosférico y a baja presión de líquidos,» Quito, Ecuador, 2009.
- [17] B. Sisa, «Elaboración del procedimiento para la reparación de tanques de almacenamiento de crudo, de techo cónico, de 20000 barriles, según la norma API 653, para la empresa SOLMAQUITRANS S.A.,» Riobamba, Ecuador, 2015.
- [18] P. Ticona, «Aplicación de ensayos no destructivos y control de calidad en la fabricación de tanques de almacenamiento atmosférico empleando acero ASTM-A36 según norma API 650,» 2016.
- [19] INISSA, «Ingeniería e Inspección en Soldadura, S.A. de C.V. Cámara de Vacío,» INISSA, 2017.
- [20] ASME Section V, Subsection A, «Boiler and pressure vessel code,» American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [21] R. Cabezas y W. Núñez, «Diseño y simulación de un tanque de techo fijo para almacenar petróleo de 3.000 BLS de capacidad en la plataforma del pozo Sacha 132, ubicada en la provincia de Orellana,» Quito, Ecuador, 2011.
- [22] NDETECH, «Get premium industrial services for your inspections,» 2018.
- [23] INSPEQ Ingeniería LTDA., «Ficha técnica de Equipos. Bomba para prueba de vacío fondo de tanque,» 2015.
- [24] Tramontina, «Compresor de aire portátil Tramontina para automóviles con 300 psi, 50 W y 12 V,» 2015.
- [25] Sales, «Vacuum Box Testing CO.,» 2018.
- [26] Experimentos Científicos, «Efecto Venturi,» 2018.
- [27] Barnes, «Vacu Lite Self Contained Vacuum Testing Box,» Plastic Welding Equipment, 2015.
- [28] G. Mediavilla, «Curso ONLINE Método Leak Testing,» INCAPSEH, QUITO, 2020.

- [29] ASNT, Práctica recomendada No. SNT-TC-1A, «Calificación y certificación de personal en pruebas no destructivas,» American Society for Nondestructive Testing, 2016.
- [30] G. Mediavilla, «Curso ONLINE Método Leak Testing,» INCAPSEH, Quito, 2020.
- [31] SILVERWING, «Vacuum Box. Bubble leak testing for storage tank weld seams,» SILVERWING, New York, 2018.
- [32] Leister GEO Civil Engineering, «Vacuum Box,» Quito, Ecuador, 2018.
- [33] Teach Service Products (TSP) INC., «Non Destructive Testing Vacuum Boxes,» Model. 30FBLJ, 2018. [En línea]. Available: <http://www.tspndt.com/30fblj.aspx>.
- [34] Hydrosight, «Acrílico vs Policarbonato,» Bayern.
- [35] GRUPO OG, «Vidrio o Acrílico: ¿Cuál es la opción más económica?,» Medellín.
- [36] Grupo OG, «Diferencia entre el Acrílico y el Policarbonato,» Medellín.
- [37] DBOSTON, «Acrílicos,» DBOSTON, Manabí, Ecuador.
- [38] Vical Acrílicos, «Propiedades físicas del acrílico Vical,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.vicalsa.com.ar/propiedades-fisicas.html>.
- [39] Vargort High Tech & Precision, «Cauchos Celulares,» [En línea]. Available: <https://www.vargort.com/fr/cauchos-celulares/>.
- [40] J-FLEX Rubber Products, «Dureza del caucho,» J-FLEX Rubber Products, 26 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.j-flex.com/es/how-is-rubber-hardness-measured-what-does-shore-hardness-mean/>.
- [41] Garlock, «Garlock,» [En línea]. Available: <https://www.garlock.com/es/technical-resources/faqs/what-crush-strength-garlock-gaskets>.
- [42] MISUMI, «Characteristics of Urethane, Rubbers and Sponges,» Woodfield Rd..
- [43] FILSA, «Filtros y Servicios de México,» México, 2019.
- [44] Tecnimetro, «Manómetro,» S/D, Quito, 2021.
- [45] Admitec Proveedores Industriales, «Compras - Admitec Proveedores Industriales,» [En línea]. Available: <https://admittec.co/producto/union-hembra-acero-inoxidable/>.
- [46] Accesorios Coronil, «Accesorios Coronil,» [En línea]. Available: <https://accesorioscoronil.es/racores-conectores/3028-union-doble-rosca-macho-1-4-a-1-4-81218.html>.
- [47] Neumática R, «Slideshare,» 10 Mayo 2016. [En línea]. Available: <https://www.slideshare.net/NeumaticaR/nr-presentacion-vuoto-2012-a>.

- [48] E. Lloré y W. Tello, «Diseño y construcción de una empacadora y selladora al vacío para humitas, con capacidad de 15 humitas por minuto,» Quito, 2010.
- [49] J. Shigley, Diseño en Ingeniería Mecánica, México: Ed. McGraw-Hill, 2006.
- [50] MAZZEI, «Catálogo Rendimiento de Inyectores,» 2016. [En línea]. Available: https://mazzei.net/wp-content/uploads/2021/01/Perf-Table_GAS-SUCTION_Combined-US-Metric-Tables_SPANISH_ONLY-MAZ_2017-08-25.pdf.
- [51] MAZZEI, «Tabla de Rendimiento del Inyector 0784,» 2015. [En línea]. Available: https://mazzei.net/wp-content/uploads/2015/07/0784-Inyector_SP_Perf-Table-Drawing_2016-05-18_SECURED.pdf.
- [52] Ferretería Cano, «Ferretería Cano,» Compresor Thomas Usair AS-06, [En línea]. Available: <https://ferretercano.com/product/compresor-mini-thomas-usair-as-06-1-4hp/>. [Último acceso: 2021].
- [53] MechaniCalc, «Stress Transformations & Mohr's Circle,» [En línea]. Available: <https://mechanicalc.com/calculators/mohrs-circle/>.
- [54] R. Norton, Diseño de máquinas, México: Ed. Pearson Educación, 2011.
- [55] Deutschman, Diseño de máquinas - Teoría y práctica, Ed. Continental S.A., 1975.
- [56] J. C. Veiga, «Juntas Industriales,» Teadit Industria e Comercio Ltda, Rio de Janeiro, 2003.
- [57] Ultrabox, «Ultrabox-Calculadora,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ultrabox.com/ecuador/suite/calculator/>.
- [58] J. Tirenti, «API 650 - Tanques de almacenamiento, parte I: código, materiales, diseño, pared, fondo, placa anular,» arveng training & engineering, 2016.
- [59] P. Guerrero, «Estimación de costos en proyectos metalmecánicos, y su aplicación al área petrolera,» Quito, 2013.
- [60] J. Herrera y E. Trani, «Sistema de Seguridad para un Centro Distribuidor de Hidrocarburos,» México, D.F., 2015.
- [61] M. Valencia, «Diseño y control automático de tanque de almacenamiento de crudo de petróleo para una refinería,» Piura, Perú, 2019.
- [62] R. Tiwari, «Comparison of the ASME, BS and CEN fatigue design rules for pressure vessels,» 2018.
- [63] D. Quinteros, «Desarrollo del proceso de cambio de techo fijo en el tanque TB 1012, del Terminal de Productos Limpios "El Beaterio" EP-PETROECUADOR,» Quito, Ecuador, 2011.

- [64] G. Mediavilla, «Diseño y estandarización de tanque de almacenamiento de cemento para una capacidad de 50 T-M,» Quito, Ecuador, 2014.
- [65] F. Carrión, M. Lomelí, J. Quintana y M. Martínez, «La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes,» Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, México, 2003.
- [66] M. Nuñez y G. Pantoja, «Diseño y construcción de un banco de pruebas para control de vacío,» Riobamba, Ecuador, 2008.
- [67] J. Uriarte, «Características del Aluminio,» Definición y Características, 2019.
- [68] D. Barrera y D. Rojano, «Elaboración de un procedimiento específico de soldadura (WPS) para la construcción de polidúctos en tuberías de acero al carbono instalado bajo la técnica de perforación horizontal dirigida para la empresa Montecz S.A.,» Bogotá, Colombia, 2015.
- [69] Cauchos Vikingos, «Plancha de caucho natural lisa sin lona,» Quito, Ecuador, 2018.
- [70] DISETEC Soluciones Industriales, «Manómetros de refrigeración WIKA tipo: 111.11RF,» Quito, Ecuador, 2019.
- [71] WIKA, «Bourdon Tube Pressure Gauges,» Georgia, 2019.
- [72] Mercado Libre, «Inyector Venturi de PvdF para inyectar ozono purificar agua,» Ambato, Ecuador.
- [73] L. Ramírez, «Corrosión de tanques de almacenamiento,» Universidad de San Buenaventura Cartagena, Cartagena, Colombia, 2017.

6. Anexos

ANEXO I Proforma para la cámara de vacío No. 4

<h1>VACUUM BOX TESTING QUOTE</h1>					
Date: 10/12/2016					
Vacuum Box Testing 190 S. Seguin St. New Braunfels, TX, 78130 830-481-6640			Customer / Shipping Luis Chiguano 2520 Winrock blvd Houston, TX 77057		
PAYMENT METHOD		CHECK NO.		SHIPPING	
Credit Card				UPS - Ground	
QTY	ITEM #	DESCRIPTION	UNIT PRICE	DISCOUNT	LINE TOTAL
1	Vacuum Box	Vacuum Box	\$455.00		\$455.00
Shipping	Shipping				\$15.54
TOTAL DISCOUNT					
				SUBTOTAL	
				SALES TAX	
				TOTAL	\$470.54
Thank you for your business!					

ANEXO II Costo del manómetro

R.U.C: 1717441024001
TECNIMETRO
 CUENTA CORRIENTE: 3331268004
 SILVANA F./TECNIMETRO (Banco Pichincha)
 Av. Gala Plaza Lasca N65-95 y Bellavista, Edificio Morit 3er piso
 Sector Parque de los Recuerdos, Quito-Ecuador

Tecnimetro
 Equipos de Precisión

Venta de instrumentos de precisión, calibraciones, entrenamientos, alquiler y soporte técnico.
 WhatsApp: 098 730 8310 / 099 267 5122
 Telf: 02 346 4324 / 8035 811 Ext: 1
 email: ventas@tecnimetro.com.ec

Cliente:	VEATPETROLEUM CIA.LTDA		No. Cliente:	2007
Dirección:	S48F Y E2, Urbanización Bellaterra, HC-7B. Sector Beaterio			
Provincia:	Pichincha	Ciudad:	Quito	
Contacto:	Luis Chiguano		Guardar y exportar	
Email:	luis.chiguano69@gmail.com	Teléfono:	+593 98 643 7154	

Crédito (Solo calificados) días Fecha **2021-06-17** Cotización No. **TM-2021-0269**

COTIZACIÓN DE INSTRUMENTOS Y SERVICIOS							
No.	Código	Descripción	Marca/Status	Cant.	PU	Desc.	Total
1	42-18	Vacuometro 0 a -30 inHg, carátula de acero 2,5", conexión vertical 1/4" bronce	GAUGE	1	\$ 50,00		\$ 50,00
		Con Certificado de calibración	Calibrado bajo SGC ISO/IEC 17025:2017	1	\$ 39,00		\$ 39,00



Tiempo de entrega:	3-5 días	Con certificado de calibración	Sub total	\$ 89,00
Forma de pago:	De contado o anticipo del 50% y 50% contra entrega (Solo Crédito Calificado)		IVA 12%	\$ 10,68
Validez:	Esta oferta es válida por 30 días		Total	\$ 99,68
Observación:	El tiempo de entrega está definido a partir del pago.			

Cuando la orden sea efectiva hacer referencia al número de cotización que consta en la parte superior.
 Los descuentos aplican solo a la totalidad de las compras indicadas en esta oferta.
 Todos los equipos tienen 1 año de garantía sobre defectos de fabricación.

Cotizado por:	Ing. Nelson Paz Forteza	Asesor Comercial	Cell: 0992675122	ventas@tecnimetro.com.ec
---------------	-------------------------	------------------	------------------	--------------------------



Un mundo de
Tecnimetro
 AHORRAR ESTÁ EN TUS MANOS
 Por favor considere el medio ambiente antes de imprimir este documento!

Visite nuestra tienda para conocer más acerca de nuestros productos.



ANEXO V Rendimiento Venturi 0784-Sistema Inglés



Operating Pressure PSIG		AIR SUCTION		Operating Pressure PSIG		AIR SUCTION		
Injector INLET	Injector OUTLET	Native Flow GPM	Air Suction SCFH	Injector INLET	Injector OUTLET	Native Flow GPM	Air Suction SCFH	
5	0	4.3	11.7	60	0	14.9	59.3	
	1		9.8		5		57.4	
	2		4.7		10		49.4	
	3		2.1		15		44.1	
	4		*(4.5)		0.99		20	35.0
10	0	6.1	19.3		30		15.5	
	2		15.6		35		10.4	
	5		5.7		40		8.0	
	7		2.0		45		*(50.0)	4.8
	8		*(9.0)		0.93		0	59.9
15	0	7.5	28.8	5	59.8			
	5		16.5	10	54.7			
	7		8.7	15	49.6			
	10		4.1	20	46.3			
	12		*(13.0)	1.9	30	22.3		
20	0	8.6	33.7	40	13.5			
	5		21.2	45	9.8			
	10		8.0	50	7.5			
	12		4.9	55	*(58.3)	4.2		
	15		*(17.5)	2.4	0	61.0		
25	0	9.6	40.0	5	60.1			
	5		29.1	10	58.0			
	10		14.0	15	54.1			
	15		3.3	20	51.6			
	20		*(22.3)	0	34.1			
30	0	10.6	48.2	40	18.3			
	5		32.5	50	11.7			
	10		20.3	60	6.2			
	15		9.6	65	*(67.0)	3.5		
	20		4.2	0	61.9			
35	0	11.4	46.4	5	62.0			
	5		38.1	10	61.7			
	10		29.7	20	56.2			
	15		15.2	30	48.2			
	20		8.2	40	25.2			
40	25	*(31.0)	4.0	50	16.4			
	0	12.2	52.9	60	11.0			
	5		44.8	70	5.7			
	10		35.8	75	*(76.0)	3.6		
	15		20.4	0	62.0			
20	11.5		5	62.8				
45	25	*(34.0)	7.1	10	61.5			
	0	12.9	3.1	20	58.3			
	5		56.4	30	52.6			
	10		48.1	40	35.7			
	15		38.5	50	20.8			
20	29.0		60	14.5				
50	25	*(38.0)	14.9	70	9.6			
	0	13.6	9.5	80	*(85.0)	4.9		
	5		58.1	0	63.3			
	10		51.9	5	63.5			
	15		43.0	10	63.2			
20	35.7		20	62.6				
50	25	13.6	20.3	30	57.2			
	30		13.6	40	55.0			
	35		9.2	50	34.4			
	35		6.0	60	22.6			
	40		*(42.8)	2.8	70	16.6		
100	0	19.3	58.1	80	11.8			
	5		51.9	90	7.3			
	10		43.0	100	*(102)	0		
	15		35.7	0	62.0			
	20		20.3	5	62.8			
	25		13.6	10	61.5			
	30		9.2	20	58.3			
	35		6.0	30	52.6			
	40		*(42.8)	2.8	40	35.7		
	45		*(42.8)	2.8	50	20.8		
50	*(42.8)	2.8	60	14.5				
55	*(42.8)	2.8	70	9.6				
60	*(42.8)	2.8	80	*(85.0)	4.9			
65	*(42.8)	2.8	90	63.3				
70	*(42.8)	2.8	100	63.5				
75	*(42.8)	2.8	110	63.2				
80	*(42.8)	2.8	120	62.6				
85	*(42.8)	2.8	130	57.2				
90	*(42.8)	2.8	140	55.0				
95	*(42.8)	2.8	150	34.4				
100	*(42.8)	2.8	160	22.6				
105	*(42.8)	2.8	170	16.6				
110	*(42.8)	2.8	180	11.8				
115	*(42.8)	2.8	190	7.3				
120	*(42.8)	2.8	200	0				

Copyright © 2014 REV August 2014
 Mazzei Injector Company, LLC
 500 Rooster Drive, Bakersfield, CA 93307-9555 USA
 TEL 661.363.6500 • FAX 661.363.7500 • www.mazzei.net

*NUMBERS IN PARENTHESES indicate the injector outlet pressure when suction stops (Zero Suction Point).

Air Suction Capacity
 Injector Performance Table
 Model 784

ANEXO VI (Continuación) Rendimiento de Venturi 0784-Sistema Métrico



Operating Pressure kg/cm ²		AIR SUCTION		Operating Pressure kg/cm ²		AIR SUCTION	
Injector INLET	Injector OUTLET	Motive Flow l/min	Air Suction l/min	Injector INLET	Injector OUTLET	Motive Flow l/min	Air Suction l/min
0.35	0.00	16.3	5.5	4.22	0.00	56.6	28.0
	0.07		4.6		0.35		27.1
	0.14		2.2		0.70		23.3
	0.21		1.0		1.05		20.8
	0.28		*(0.32)		1.41		16.5
0.70	0.00	23.1	9.1	4.92	0.00	61.1	7.3
	0.14		7.4		2.11		7.3
	0.35		2.7		2.46		4.9
	0.49		0.94		2.81		3.8
	0.56		*(0.63)		3.16		*(3.52)
1.05	0.00	28.3	13.6	4.92	0.00	61.1	28.3
	0.35		7.8		0.35		28.2
	0.49		4.1		0.70		25.8
	0.70		1.9		1.05		23.4
	0.84		*(0.91)		1.41		21.8
1.41	0.00	32.7	15.9	5.62	0.00	65.3	10.5
	0.35		10.0		2.11		6.3
	0.70		3.8		2.81		4.6
	0.84		2.3		3.16		3.5
	1.05		*(1.23)		3.52		*(4.10)
1.76	0.00	36.5	18.9	5.62	0.00	65.3	28.7
	0.35		13.7		0.35		28.3
	0.70		6.6		0.70		27.3
	1.05		1.5		1.05		25.5
	1.41		*(1.57)		1.41		24.3
2.11	0.00	40.0	22.7	6.33	0.00	69.3	16.1
	0.35		15.3		2.11		8.6
	0.70		9.6		2.81		5.5
	1.05		4.5		3.52		2.9
	1.41		2.0		4.22		*(4.71)
2.46	0.00	43.2	21.9	6.33	0.00	69.3	29.2
	0.35		17.9		0.35		29.2
	0.70		14.0		0.70		29.1
	1.05		7.1		1.05		26.5
	1.41		3.8		1.41		22.7
2.81	0.00	46.2	19.9	7.03	0.00	73.0	11.9
	0.35		14.0		2.11		7.7
	0.70		9.6		2.81		5.2
	1.05		5.4		3.52		5.2
	1.41		3.3		4.22		2.7
3.16	0.00	49.0	25.0	7.03	0.00	73.0	29.2
	0.35		21.1		0.35		29.6
	0.70		16.9		0.70		29.0
	1.05		9.6		1.05		27.5
	1.41		5.4		1.41		24.8
3.52	0.00	51.6	26.6	8.44	0.00	80.0	16.8
	0.35		22.7		2.11		9.8
	0.70		18.2		2.81		6.8
	1.05		13.7		3.52		4.5
	1.41		7.0		4.22		*(5.98)
3.52	0.00	51.6	27.4	8.44	0.00	80.0	29.9
	0.35		24.5		0.35		30.0
	0.70		20.3		0.70		29.8
	1.05		16.8		1.05		29.5
	1.41		9.6		1.41		27.0
3.52	0.00	51.6	24.5	8.44	0.00	80.0	26.0
	0.35		20.3		2.11		16.2
	0.70		16.8		2.81		10.6
	1.05		9.6		3.52		7.8
	1.41		6.4		4.22		5.5
3.52	0.00	51.6	24.5	8.44	0.00	80.0	3.4
	0.35		20.3		2.11		3.4
	0.70		16.8		2.81		3.4
	1.05		9.6		3.52		3.4
	1.41		6.4		4.22		3.4

Copyright © 2014 /REV August 2014
 Mazzei Injector Company, LLC
 500 Rooster Drive, Bakerfield, CA 93307-9555 USA
 TEL 661.363.6500 • FAX 661.363.7500 • www.mazzei.net

*NUMBERS IN PARENTHESIS indicate
 the injector outlet pressure when
 suction stops (Zero Suction Point).

Injector Performance Table
 Air Suction Capacity - METRIC
 Model 784

ORDEN DE EMPASTADO