Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

UNIVERSIDAD DEL BIO-BIO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA EL SELLAMIENTO ESTATICO Y DINAMICO DE LOS EQUIPOS CRITICOS DEL AREA DIGESTOR EN PLANTA CELULOSA ARAUCO.

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor Guía:
Heraldo Bastidas Medel

GERARDO ANDRES MENDEZ ESCALONA

CONCEPCIÓN – CHILE
2015

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Agradecimientos

Finalizada esta etapa académica, agradezco en primer lugar a Dios y mi familia por su apoyo, paciencia, confianza incondicional para lograr los objetivos que me propuse desde un principio.

Agradecer a los docentes y funcionarios de esta casa de estudios por su guía durante estos años, además reconocer a mis amigos y compañeros de carrera por los buenos y malos momentos que supimos llevar y superamos exitosamente.

A todos los funcionarios de Celulosa Arauco Planta Horcones por su valiosa cooperación, en especial a Don Ramiro Peña, jefe mecánico del área Fibra 2 y los mecánicos José Amigo, Jorge Díaz, Carlos Sáez y Rodrigo Carrillo, quienes fueron base sólida de conocimientos en el desarrollo de esta memoria.

En definitiva, a todos quienes fueron parte de este proyecto y aportaron para culminar esta valiosa etapa de mi vida.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Resumen

El área digestor de la Planta de Celulosa Horcones del Complejo Arauco, ha experimentados varios inconvenientes a causa de fallas en sellamientos de sus equipos críticos, por lo tanto establecer metodologías de cálculo y procedimientos técnicos que logren el confinamiento efectivo de los fluidos de trabajo, respaldados por una base teórica sólida que avalen su aplicación, resulta fundamental para optimizar la producción continua del área y evitar las fugas que ponen en riesgo la seguridad del entorno.

Capítulo 1: Presentación del tema, origen del estudio y definición de objetivos.

Capítulo 2: Antecedentes generales de la empresa y específicamente del área digestor de Fibra 2.

Capítulo 3: Estudio de criticidad desarrollado en planta, para identificar la totalidad de los equipos críticos del área fibra 2.

Capítulo 4: Marco teórico respecto al sellamiento especifico de tipo estático y dinámico, sobre escotillas de inspección y empaques prensa estopa respectivamente, definiendo los principales aspectos técnicos y fundamentos de cálculo de las diferentes metodologías establecidas.

Capítulo 5: Evaluación del sellamiento por equipo, aplicando los diferentes criterios de cálculo que definen los parámetros de sellamiento más adecuados, además de establecer los procedimientos técnicos necesarios para lograr el confinamiento adecuado del fluido.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Tabla de contenidos

Agradecimientos 2

Resumen 3

Tabla de datos 4

Capítulo 1: Introducción 8

1.1 Introducción 8

1.2 Origen del tema 9

1.3 Objetivos 9

1.3.1 Objetivo general 9

1.3.2 Objetivos específicos 9

Capítulo 2: Antecedentes de la empresa 10

2.1 Descripción de la empresa 10

2.2 Visión, misión y valores de la empresa 10

2.3 Plan estratégico de la empresa 11

2.4 Proceso productivo general de la planta sector Horcones 11

2.5 Línea Fibra 2 - Área Digestor 13

2.5.1 Descripción del área 13

2.5.2 Fluidos de trabajo en el área 241-Digestor 16

2.5.3 Problemas asociados al sellamiento de equipos del área 241 17

Capítulo 3: Estudio de criticidad 18

3.1 Marco teórico del estudio 18

3.2 Metodología 18

3.3 Índice de impacto operacional (IIO) 19

3.3.1 Taller FA 19

3.3.2 Taller FS 19

3.3.3 Taller FSUT 20

3.3.4 Análisis de resultados y cálculo de IIO 20

3.4 Índice de impacto de seguridad y medio ambiente (IISM) 20

3.4.1 Sub-parámetro IIP 20

3.4.2 Sub-parámetro IITE 21

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

3.5 Cálculo de criticidad según parámetros IIO y IISM. 21
3.6 Criticidad de válvulas manuales del área Fibra 2 22
3.7 Equipos críticos que requieren un estudio de sellamiento 23
3.7.1 Bombas con sellamiento del tipo prensa estopa 24
3.7.2 Estanques y separadores 25
3.7.3 Válvulas manuales 25
3.7.4 Transportadores y equipos únicos 25
Capítulo 4: Sellamiento de fluidos 26
4.1 Emisiones fugitivas 26
4.2 Sellamiento industrial de fluidos 27
4.3 Sellamiento Estático 27
4.3.1 Empaquetaduras planas comprimidas 28
4.3.1.1 Materiales para empaquetaduras comprimidas 29
4.3.1.2 Tipos de empaquetaduras comprimidas 30
4.3.2 Tipos de bridas y disposiciones de la empaquetadura 32
4.3.2.1 Paralelismo y planitud de las superficies de sellado 32
4.3.2.2 Acabado superficial 32
4.3.3 Pernos y esfuerzos asociados 34
4.3.3.1 Esfuerzo axial 34
4.3.3.2 Esfuerzo cortante 35
4.3.3.3 Esfuerzo de torsión 36
4.3.3.4 Relación esfuerzo-deformación 36
4.3.3.5 Resistencias de pernos normalizados 37
4.3.4 Método Analítico: Cargas y deformaciones en unión apernada 38
4.3.4.1 Constante elástica para pernos 39
4.3.4.2 Constante elástica para los elementos a unir 41
4.3.4.3 Precarga del perno 44
4.3.4.3.1 Pernos precargados bajo carga estática 45
4.3.4.3.2 Pernos precargados bajo carga dinámica 49
4.3.5 Estimación del torque de apriete 53
4.3.5.1 Resistencia al movimiento entre tuerca y la brida 54

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3.5.2 Resistencia al movimiento entre hilos de la unión roscada 55
4.3.5.3 Lubricación y coeficiente de torque 56
4.3.6 Método de cálculo ASME 57
4.3.6.1 Condiciones de operación 57
4.3.6.2 Condiciones de asentamiento de la empaquetadura 57
4.3.6.3 Torque mínimo de apriete 58
4.3.6.4 Torque máximo de apriete 58
4.4 Sellamiento dinámico 59
4.4.1 Sistema de sellamiento por prensa estopa 60
4.4.1.1 Caja de sellamiento 61
4.4.1.2 Anillo linterna 61
4.4.1.3 Prensa estopa 62
4.4.1.4 Empaquetadura para prensa estopa 62
4.4.1.4.1 Propiedades 63
4.4.1.4.2 Tipos de fabricación 65
4.4.1.4.3 Materiales de construcción 67
4.4.1.4.4 Lubricantes 67
4.4.2 Consideraciones generales para el sellamiento por prensa estopa 68
Capítulo 5: Calculo y evaluación del sellamiento por equipo 69
5.1 Selección de empaquetaduras 69
5.2 Equipos estáticos y selección de empaquetaduras planas 69
5.2.1 Selección de material de fabricación 69
5.2.2 Selección del tipo de empaquetadura 70
5.2.2.1 Selección de empaquetaduras no metálicas 71
5.2.2.2 Selección de empaquetaduras semi-metálicas 72
5.3 Equipos rotatorios y selección de empaquetaduras 73
5.3.1 Selección del material de fabricación 73
5.3.2 Consideración de presión, temperatura y velocidad superficial 73
5.4 Calculo de precarga y torque para los equipos estáticos 75
5.5 Procedimiento de apertura y cierre de equipos estáticos 76
5.5.1 Equipos y herramientas necesarias 76

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

5.5.2 Descripción de la actividad 77
5.5.3 Principales problemas del sellamiento estático 80
5.6 Procedimiento de retiro e instalación de prensa estopa 81
5.6.1 Equipos y herramientas 81
5.6.2 Descripción de la actividad 82
5.6.3 Principales problemas del sellamiento por prensa estopa 86
5.7 Impacto por fallas de sellamiento en planta 87
5.7.1 Seguridad y medioambiente 87
5.7.2 Perdida de producción 88
Conclusiones 89
Referencias bibliográficas 91
Anexos 92

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

En la última década, la legislación respecto a la reducción de emisiones contaminantes en aplicaciones específicas, se ha intensificado en los países desarrollados, extendiendo estas regulaciones hasta aquellos que están en vías de desarrollo. A nivel nacional, complejos industriales de plantas químicas como es el caso de Celulosa Arauco, aprovecha este impulso para convertirse en líder de producción sustentable que minimice al máximo la emisión de cualquier contaminante; es por ello que en este marco, los responsables del mantenimiento del área digestor se han propuesto lograr el confinamiento adecuado y efectivo de los distintos fluidos de trabajo en los equipos críticos, buscando además optimizar la producción y prolongar la vida útil de los activos.

Los antecedentes de los últimos dos años indican que varios equipos críticos han experimentado fugas de distintos fluidos de trabajo, perjudicando la continuidad del proceso y obligando al cambio reiterado y prematuro de los elementos de sello, por lo tanto, resulta fundamental realizar un estudio que defina una metodología que considere los principales parámetros y factores que definen la efectividad de los sellamientos del tipo estático y dinámico.

Por otro lado, el estudio debe contemplar la definición de los equipos críticos del área, incluyendo aquellos que no han sido evaluados, por lo tanto, el primer paso debe ser completar el análisis de criticidad implementado por planta, para oficializar los equipos dentro del complejo y confirmar la totalidad de activos que serán objeto de análisis.

Este análisis se limitará en los casos estáticos a las uniones que periódicamente son desensambladas, por lo cual son más susceptibles a fugas, como escotillas de inspección (manhole), mientras que los casos dinámicos se restringen a los sellos prensa estopa, ya que su conformación lo hace más propenso a fallar.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

1.2 Origen del tema

El área Digestor registra una serie de incidentes relacionados al sellamiento del tipo estático y dinámico en varios equipos críticos, generando problemas que han forzado detenciones con importantes pérdidas de producción.

Durante los meses de Enero y Febrero del año 2015, se realizó un levantamiento referente al sellamiento de escotillas de inspección de los principales estanques y equipos del área Fibra 2, donde se detectaron varias falencias asociadas a los procedimientos de cierre de las escotillas de inspección e instalación de los sellos tipo prensa estopa de ciertas bombas, por lo tanto resulta muy útil definir procedimientos de instalación de empaquetaduras para el sellamiento de los equipos principales con el fin de controlar el montaje y cierre, asegurando la confinación de los fluidos de trabajo para evitar fugas que pongan en riesgo la seguridad y continuidad del proceso general.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar los procedimientos de sellamiento adecuados para los equipos críticos del área digestor que requieran sellos estáticos y dinámicos del tipo prensa estopa, considerando los principales factores teóricos y prácticos involucrados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Definir los equipos críticos del área digestor que requieran ser incluidos en este estudio.
- Definir marco teórico y estudio técnico del sellamiento estático y dinámico.
- Determinar procedimientos de montaje para empaquetaduras planas y de sección cuadrada (prensa estopa), descartando de esto modo cualquier tipo de falla relacionada a la instalación.
- Justificación económica de la implementación de los procedimientos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Capítulo 2: Antecedentes de la empresa

2.1 Descripción de la empresa

Celulosa Arauco está formado por un conjunto de empresas industriales y forestales, organizadas bajo la propiedad de la sociedad anónima chilena Celulosa Arauco S.A., formada en 1979 por la fusión de las industrias Celulosa Arauco S.A. y Celulosa Constitución S.A., puestas en servicios en diciembre de 1971 y septiembre de 1976 respectivamente.

La empresa posee la mayor masa forestal, cuyo patrimonio es cercano a 1,6 millones de hectáreas, distribuidas en Chile, Argentina, Brasil y Uruguay. En el área de producción nacional de celulosa, hoy en día existen cinco plantas industriales, distribuidas en las regiones del Maule, Biobío y los Ríos, las cuales en su conjunto logran una capacidad productiva de 2.8 ADt/año.

2.2 Visión, misión y valores de la empresa

La empresa es líder del sector forestal de nuestro país, asumiendo un compromiso irrenunciable con la calidad, para ellos su visión es ser también referente a nivel mundial en cuanto al desarrollo sustentable de productos forestales, mediante un sistema industrial en constante mejoramiento.
Como misión la empresa procura que los productos de la empresa tengan permanentemente los más altos niveles de calidad de modo de participar con éxito en sus mercados, de este modo orienta sus esfuerzos a satisfacer plenamente los requerimientos de sus clientes, construyendo relaciones estables y duraderas, además ha establecido como un objetivo básico la preservación del equilibrio ecológico y sus políticas con relación al medio ambiente que se basan en los principios de desarrollo sustentable.

Cada uno de los complejos de la sociedad Arauco, está regido por importantes valores que asientan una cultura empresarial sólida y responsable.

- **Seguridad:** La seguridad de las personas es prioridad en las decisiones que dan origen a todo tipo de labores, solo de esa forma se considera que

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

el trabajo fue satisfactorio. La meta de Arauco es siempre lograr cero accidentes.

- **Compromiso:** Asumir los desafíos con la mejor disposición y el mayor esfuerzo en pos de lograr el objetivo.
- **Excelencia e innovación:** Ser líderes en emprendimiento, manteniendo el desafío a las propias capacidades y una actitud innovadora para lograr alcanzar las metas.
- **Trabajo en equipo:** Respetar y valorar a cada persona, promoviendo el trabajo en equipo, con el cual se logra un mejor y más rápido avance.
- **Buen ciudadano:** El trabajo realizado tiene como fin aportar bienestar social, respeto a la comunidad y al medio ambiente.

2.3 Plan estratégico de la empresa

- Asegurar que la cadena que se inicia con el ingreso de materias primas y termina con el producto en la bodega del cliente, satisfaga los estándares de calidad establecidos.
- Mantener y desarrollar programas de entrenamiento y capacitación del personal de modo que participe del compromiso de calidad asumido por la empresa y pueda hacer un aporte efectivo a éste en su ámbito de trabajo.
- Controlar los procesos de las plantas industriales, con el objetivo de minimizar el impacto sobre el medio ambiente.

2.4 Proceso productivo general de la planta Arauco sector Horcones

Los complejos de celulosa de Arauco instalados en el país basan sus procesos en sistemas productivos similares. Las plantas de los sectores Nueva Aldea y Horcones utilizan dos líneas de trabajo dependiendo del tipo de materia prima (pino o eucaliptus); en el caso Nueva Aldea ambas líneas funcionan con procesos iguales, sin embargo, en la planta del sector Horcones las líneas utilizan sistemas de cocción distintos; línea 1 utiliza digestores discontinuos tipo Batch, mientras que línea 2, utiliza un único digestor de cocción continúa modificada.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

El proceso tiene una secuencia que se describe en la figura 2.1. Este comienza con la preparación de la madera, donde se convierte en astillas, luego esta se distribuye a las respectivas líneas de cocción por medio de los digestores, donde la materia prima se convierte en pulpa que continua hacia las áreas de clasificación, lavado y blanqueo, el cual se divide en varias etapas que terminan por remover la lignina residual, decolorando el remanente. La pulpa blanqueada diluida en agua se transporta al área de secado, donde se procede a formar la hoja de celulosa, la cual se enfría y corta en hojas más pequeñas que se apilan, prensan y enfardan para su despacho. Por otro lado en la etapa de lavado se recupera el licor negro concentrado, el cual se envía a calderas recuperadoras para su combustión, generando vapor de alta presión destinada a turbogeneradores para producir la energía eléctrica que consume la planta y entrega sus excedentes al Sistema Interconectado Central, mientras que las cenizas son transformadas en licor verde que es enviado al área de Caustificación donde se obtiene el licor blanco utilizado en el proceso de cocción, así se produce un proceso cíclico cerrado, que solo requiere reponer pérdidas.

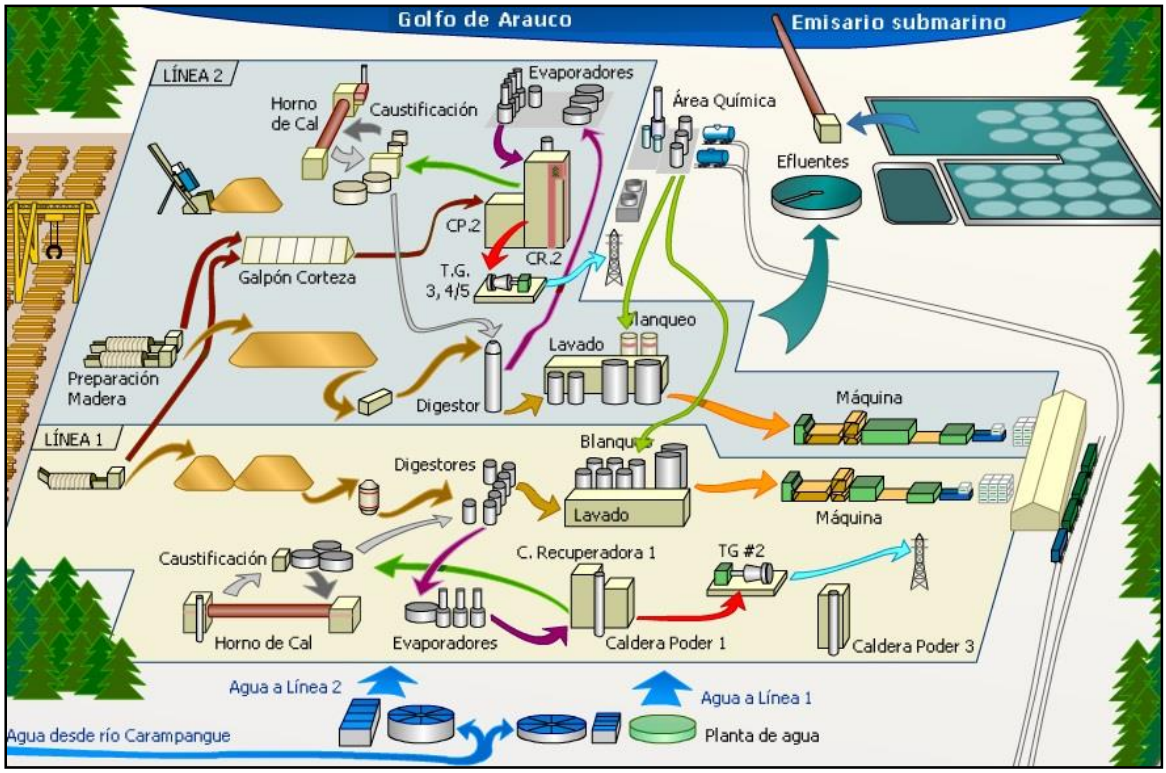


Figura 2.1: Proceso general de planta Celulosa sector Horcones

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.5 Línea Fibra 2 - Área Digestor

La descripción anterior explico a grandes rasgos la división de líneas que se llevan a cabo en la planta del complejo Horcones, sin embargo, el objetivo de estudio y análisis se refiere específicamente de los equipos pertenecientes al área digestor de la Línea 2 de la planta de Celulosa sector Horcones, por lo tanto, comprender a cabalidad esta área resulta fundamental para identificar y describir los equipos críticos y fluidos de trabajo involucrados en cada proceso.

2.5.1 Descripción del área

El área digestor de línea 2 se identifica por el código 241 dentro del sistema de planta. El edificio se ubica junto al edificio de Lavado, harneo y deslignificación, como se observa en la figura 2.2.

El proceso desarrollado en el área digestor tiene como fin principal separar las fibras de celulosa de la lignina, para ello la madera pasa por una serie de etapas que en su conjunto permiten lograr el objetivo del área.

Figura 2.2. Vista sur del edificio del área digestor 241 del complejo Arauco Horcones

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

El sistema comienza con la alimentación de astillas desde la correa transportadora, estas se desplazan por medio de un tornillo hasta un depósito, donde son sometidas al primer proceso de pre-vaporización mediante una mezcla con vapor vivo, continuando su descenso hasta un equipo medidor que controla el flujo de la materia prima que entrega la producción total de la planta, luego se encuentra el alimentador de baja presión, cuya función es llevar las astillas de la presión atmosférica hasta un sistema presurizado. A continuación se encuentra el vaporizador, donde se aplican inyecciones a presión de vapor (vivo y vahos recuperados) con el propósito de extraer el aire, para homogenizar el contenido de humedad, aumentando la temperatura y densidad de las astillas, favoreciendo a la posterior impregnación del licor, luego se descargan a un depósito de paso o chute (figura 2.3), encargado de mezclar y mantener el nivel de licor negro para lograr un abastecimiento constante y suficiente hacia el alimentador de alta presión (figura 2.4), el cual tiene como función traspasar las astillas al impregnador desde una presión intermedia a una alta.

Figuras 2.3 - 2.4: Chute de astillas y alimentador de alta presión, respectivamente.

En la fase de impregnación, se comienza a agregar licor blanco y negro, para luego enviar la materia prima al digestor. Este proceso se ejecuta al interior de un

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

equipo denominado Impregnador (figura 2.5), el cual permite dar el tiempo de residencia necesario para la impregnación adecuada de las astillas con licor. Posteriormente son enviadas a la etapa de cocción en el digestor continuo. Este proceso consiste en liberar las fibras de celulosa contenidas en las astillas, mediante la disolución de la lignina con reactivos alcalinos a valores definidos de presión y temperatura. A medida que avanza la mezcla de astillas y licor por las diferentes secciones del digestor, se añaden y retiran los licores de cocción, transformando lentamente la mezcla en una pasta café, compuesta por fibras de celulosa, lignina y licor de cocción. Una fracción importante de la lignina disuelta se retira, en forma de licor negro, que es la mezcla de licor blanco y lignina disuelta. Finalmente, los principales procesos del área digestor finalizan cuando la pasta café es enviada hacia el difusor atmosférico que forma parte de la siguiente área de lavado, sin embargo, existen otros importantes procesos adicionales dentro del área, como los sistemas de condensados, recuperación de licores y agua, o la generación de subproductos del proceso de cocción como la obtención de trementina, almacenada en un área fuera del edificio digestor (figura 2.6).

Figura 2.5 - 2.6: Deposito de impregnación y estanques de trementina, respectivamente.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

2.5.2 Fluidos de trabajo en el área 241-Digestor

El estudio de sellamiento de equipos requiere identificar los materias y fluidos de trabajo del área que forman parte del proceso y circulan por los diferentes equipos.

- **Astillas:** Las astillas o chips son pequeños trozos de madera, resultantes del proceso de corte y reducción de troncos. El tipo de fibra que poseen las astillas se define según su procedencia: la fibra corta de eucalipto y la fibra larga de pino radiata.
- **Licor negro:** Es un subproducto del proceso de cocción química. Licor utilizado para la cocción (licor blanco, licor negro), más lignina y fibras degradadas por efecto de la digestión.
- **Licor blanco:** Solución álcali utilizada para la cocción de las astillas, compuesto por hidróxido de sodio (NaOH) más sulfuro de sodio (Na2S) y se usa para romper las uniones de lignina, liberando las fibras de celulosa.
- **Vapores:** El vapor vivo proviene de los sistemas de caldera o recuperados de los ciclones de flasheo. Los vapores utilizados en el área Digestor son de media presión (3.5 bar) y alta presión (10.5 bar).
- **Trementina:** Subproducto del proceso de cocción de las astillas. Es un líquido combustible, más liviano que el agua e insoluble en ella, con olor a gases sulfurados y se utiliza principalmente como diluyente de pintura o como materia prima para la fabricación de aerosoles y desinfectantes.
- **Agua caliente y tibia:** Tanto el agua caliente como tibia son fluidos limpios recuperados y reutilizados en los procesos del área. La temperatura del agua caliente es de aproximadamente 75°C y el agua tibia de 50°C.
- **Agua de sello:** Agua de planta utilizada en los sellos de bombas que requieran recirculación de agua para refrigerar y lubricar. El agua de sello posee una temperatura en el rango de los 15 a 18°C.
- **Condensados limpio:** Se genera en los calentadores de licor producto del intercambio de calor indirecto entre vapor y el licor negro, posteriormente el condensado es almacenado y enviado hacia el área de caldera.
- **Condensado sucio:** El condensado sucio se genera en el calentador de lavado donde se intercambia calor indirectamente entre los vahos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

provenientes de la trampa de licor y el licor negro extraído desde la malla de lavado del digestor, luego este condensado es almacenado y utilizado en el sistema de recuperación de trementina.

- **CNCG:** Gases no condensables concentrados, generados principalmente en el sistema de trementina, perteneciente al área digestor.

2.5.3 Problemas asociados al sellamiento de equipos del área 241

- **Fallas y cambio prematuro de empaquetaduras**

  El cambio de empaquetaduras planas en los equipos críticos se realiza generalmente conforme existan aperturas programadas de escotillas por razones de inspección y lógicamente debe considerarse la eventualidad de una falla que obligue al cambio. En cuanto a las empaquetaduras de trenzas utilizadas en los sellos del tipo prensa estopa, se manejan antecedentes de equipos críticos que han sido reempaquetados alrededor de cuatro veces en menos de un año, lo cual resulta totalmente inadecuado.

- **Falta de procedimientos**

  En estos momentos no existe un estándar que controle la instalación de empaquetaduras, por lo tanto, no existen parámetros que regulen la magnitud del torque y su secuencia al momento de sellar una escotilla de inspección o el adecuado asentamiento de los anillos de empaquetadura en una prensa estopa, entre otros factores que forman parte de estos procesos.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Capítulo 3: Estudio de Criticidad

Para identificar los equipos críticos del área es necesario realizar un estudio acabado de sus características y función dentro del proceso. La planta Celulosa Arauco sector Horcones en conjunto a SPM ingenieros S.A. realizaron un estudio de criticidad en el año 2012, con el fin de mejorar el sistema de gestión y planificación.

La evaluación estableció una metodología y parámetros para estimar la criticidad para todos los equipos que correspondieran al nivel 5 del sistema SAP. El nivel de los equipos es una forma de registrar cada activo con una ubicación técnica única que se asocia a la línea productiva, área, sistema, equipo principal, tipo y un número correlativo que completa su identificación, como se describe a continuación:

XXXX	XXX	XXX	XXXXXXX	XX	XXX
Centro Operacional	Área Planta	Sistema	Equipo Principal	Tipo	Correlativo

El estudio del año 2012, dejo fuera algunos equipos como las válvulas manuales, ya que no estaban catalogados en el sistema SAP, para completar el listado de equipos críticos se debe aplicar el mismo análisis del estudio anterior de criticidad.

3.1 Marco teórico del estudio

Este estudio permitió estandarizar criterios de criticidad en las plantas de celulosa, de este modo se puede establecer el desarrollo de una completa estrategia de mantenimiento que contribuya a optimizar recursos. Los parámetros a evaluar fueron definidos respecto al impacto operacional (IIO) y seguridad y medio ambiente (IISM).

3.2 Metodología

La metodología de trabajo se dividió en 4 etapas:

- Levantamiento de la Información o también conocido como “trabajo base”.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- Desarrollo de Diagramas Lógicos de Proceso (DLP).
- Realización de talleres, los cuales consisten en un trabajo con personal de superintendencia, jefaturas, operadores y mantenedores de la planta.
- Análisis, procesamiento y revisión de los resultados de criticidad.

Las primeras dos etapas correspondieron a la definición y coordinación entre las partes que desarrollaron el estudio, mientras que las siguientes se desarrollaron junto al personal para definir y analizar los equipos de las diferentes áreas.

3.3 Índice de impacto operacional (IIO)

Para determinar el parámetro IIO se realizaron una serie de talleres, donde participo personal de gerencia, jefes de área, supervisores de operación y mantención, para determinar el índice de impacto operacional conocido como parámetro IIO de cada equipo definido por su respectiva ubicación técnica, en base a los tiempos de detención que provocaría la paralización del equipo, sistema o área.

3.3.1 Taller FA

En este taller participo la superintendencia de planta y tuvo como objetivo evaluar el impacto sobre la producción que provocan las áreas ante eventuales detenciones.

El análisis se realizó según la matriz contenida en la tabla 3.1 del anexo A, con la cual se definió el efecto que tendría interrupción de sus funciones, de esta manera se pudieron identificar cuáles son las áreas son las áreas vitales, teniendo en cuenta se trata de un análisis por área de trabajo, por lo tanto, no todos los equipos pertenecientes al área son críticos.

3.3.2 Taller FS

El taller FS estuvo dirigido a las jefaturas de cada área, con el fin de identificar los sistemas involucrados en cada área y analizar su incidencia en la producción si se

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

detienen. Esta evaluación también fue apoyada por una matriz que se encuentra en la tabla 3.2 del anexo A, para determinar el impacto en la productividad.

3.3.3 Taller FSUT

En este taller participaron los departamentos de operaciones y mantención, es acá donde operadores y mantenedores contribuyeron con su conocimiento acerca de los equipos de los distintos sistemas de cada área. Al igual que los talleres anteriores se analizó el impacto, mediante una matriz de evaluación (tabla 3.3 del anexo A), pero esta vez respecto a la detención de cada equipo.

3.3.4 Análisis de resultados y cálculo de IIO

La combinación de resultados de cada taller, permiten obtener una codificación de 3 letras para cada equipo y su respectiva ubicación técnica. Cada nomenclatura responde a un índice IIO contenido en la matriz de cálculo (tabla 3.4 del anexo A).

3.4 Índice de impacto de seguridad y medio ambiente (IISM)

Este parámetro permite identificar el impacto que provocan los equipos en cuanto a la seguridad de las personas y el medio ambiente, si dejaran de cumplir su función principal. Este indicador se define tras analizar dos sub-parámetros, el primero tiene relación con protección de las personas y el medio ambiente, denominado IIP y el otro se basa en las normas establecidas por la Asociación Nacional de Protección contra el fuego (NFPA) y define el impacto asociado a la sustancia que contienen o transporta cada equipo, este último se denomina IITE. El valor mayor entre los sub-parámetros IIP y IITE, será en el parámetro IISM.

3.4.1 Sub-parámetro IIP

Como se mencionó anteriormente, este indicador evalúa la incidencia del equipo en caso de no funcionar, entonces el análisis de este sub-parámetro solo incluirá los equipos que tiene por función principal proteger la integridad de las personas o

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

el medio ambiente, por lo tanto, el resto de los equipos que solo cumplan funciones operacionales serán evaluados con el valor mínimo. La matriz de análisis (tabla 3.5 del anexo A) tiene una escala de gravedad del valor 1 al 5 y se divide de manera independiente dependiendo su relación con: personas, medio ambiente, responsabilidad legal, autoridades, gestión de operaciones y comunidad; finalizado el análisis se determina el IIP, como el valor máximo entre los anteriores.

3.4.2 Sub-parámetro IITE

El sub-parámetro IITE, se obtuvo en conjunto al departamento de prevención y riesgos de la planta y se define según la norma NFPA 704 mediante el rombo o diamante de seguridad (figura 3.1), con el cual se verifica la peligrosidad de los fluidos de trabajo de cada área. El rombo de seguridad posee cuatro áreas de evaluación: salud, inflamabilidad, reactividad y riesgo especifico, estos valores de impacto varían en un rango de 0 a 4. El análisis de criticidad requiere seleccionar el máximo valor entre las áreas de evaluación, al cual luego se le debe sumar 1, de este modo se puede comparar sin inconvenientes con el sub-parámetro IIP.

Figura 3.1: Rombo de seguridad NFPA para cálculo del sub-parámetro IITE

3.5 Cálculo de criticidad según parámetros IIO y IISM.

Para calcular la criticidad final de cada equipo, se debe ingresar a una nueva matriz en función del índice de impacto operacional (IIO) y el impacto de seguridad

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

y medio ambiente (IISM), como describe a continuación la figura 3.2, donde los niveles 5;5 y 1;1 se refieren a los niveles de máxima y mínima criticidad.

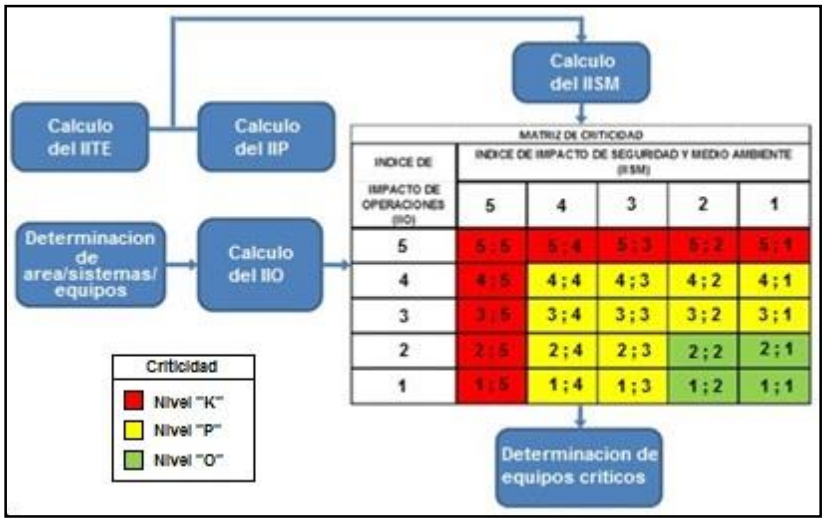


Figura 3.2: Esquema general del cálculo de criticidad

3.6 Criticidad de válvulas manuales del área Fibra 2

Siguiendo esta metodología se determinó la condición crítica de todos los equipos con ubicación técnica definida como nivel 5, sin embargo, el presente estudio requiere como información base solo la criticidad de los equipos del área Digestor perteneciente a la Línea 2, no obstante, las válvulas manuales fueron excluidas del análisis, ya que solo contaban con una identificación básica que no representaba una ubicación técnica.

Para completar la nómina de equipos críticos, fue necesario realizar un levantamiento de las principales válvulas manuales del área, previo trabajo de identificación que se realizó en conjunto a los operadores del área y el departamento de válvulas, además fue aprobado por el jefe de operaciones, supervisor y superintendencia. A diferencia del análisis de criticidad descrito anteriormente que se basa los tiempos de detención de la producción, el criterio de evaluación para las válvulas manuales se determinó en función de su importancia para aislar o poner en servicio equipos críticos del área. Posteriormente se creó la ubicación técnica de nivel 5 que se definió en base a la siguiente información:

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

1. Las válvulas manuales tienen como centro operacional la línea 2 de Celulosa Arauco (CA02).
2. Se relacionan con los sistemas de digestor continuo (HAC) e impregnación (HAC), según corresponda.
3. Todas las válvulas pertenecen al área Digestor continuo de Línea 2 (241).
4. Los equipos principales son el digestor continuo (051055) y el impregnador (051046), mientras que su tipo no estaba claramente establecido, por lo cual se optó por utilizar el código de tipo (73) que estaba definido para las válvulas con ubicación técnica registradas en el sistema.
5. El número correlativo final se mantiene como el digito de tres números correspondiente a su respectiva identificación básica de la válvula.

Concatenando la información anterior, se definieron las UT de las válvulas. Mediante esta identificación oficial, se procede a aplicar el estudio de criticidad descrito anteriormente, tras evaluar los datos y matrices asociadas se concluye que todas las válvulas identificadas y evaluadas corresponden a una criticidad “K”. El listado de las válvulas manuales críticas en el archivo Excel “Criticidad de válvulas manuales_Area 241” y resumida en el anexo C. tabla P0.

3.7 Equipos críticos que requieren un estudio de sellamiento

Una vez determinados los equipos críticos del área se seleccionan los equipos de alta y media criticidad correspondientes a “K” y “P” respectivamente. Posteriormente en conjunto al jefe mecánico de fibra 2, se procede a clasificar los equipos que requieren de un análisis del sellamiento, para ello se recurrió a toda la información técnica disponible, incluyendo planos técnicos, manuales, historial de cada equipo y comprobación mediante inspección visual en terreno. Finalmente, solo se seleccionaron los equipos que requerían un análisis del sellado en las escotillas de inspección, donde se emplean empaquetaduras planas y los sistemas de sello por prensa estopa.

El conjunto de equipos que ameritan un análisis de sus respectivos sellamientos asciende a 70 y puede subdividirse en 6 grandes grupos definidos por el tipo de

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

activo que asigna planta: bombas con sellamiento del tipo prensa estopa, válvulas manuales, equipos únicos, transportadores, separadores y estanques. El listado de los equipos críticos este contenido en la planilla Excel: “Equipos críticos_Sellamiento estático y dinámico”.

Tipo de equipos	Cantidad	Tipo de sello	
		Prensa estopa	Plancha
Válvulas	35	-	X
Bombas	9	X	-
Estanques	13	-	X
Separadores*	3	X (1)	X (2)
Equipos únicos	3	-	X
Transportadores*	7	X (6)	X (1)
Total	70		

Tabla 3.1 Resumen de los equipos críticos y su tipo de sellamiento. (*) Los números entre paréntesis especifican la cantidad de equipos.

En el caso de las válvulas manuales, solo se considerará el sellamiento estático de sus bridas de entrada y salida, ya que el sellamiento dinámico por prensa estopa en el vástago móvil, se define como un conjunto o kit de sellamiento definido de manera independiente por el departamento de válvulas de planta.

3.7.1 Bombas con sellamiento del tipo prensa estopa

El área digestor consta con una batería de bombas centrifugas que se encargan de transportar fluidos de trabajo hacia y desde distintos equipos. Los principales fluidos son licores de cocción del tipo álcali corrosivos capaces de destruir y separar compuestos orgánicos, por lo tanto la mayoría de las bombas están equipadas con sellos mecánicos que proporcionan una aislación del fluido evitando fugas a través del eje, sin embargo en aplicaciones donde el fluido de trabajo se considere de baja peligrosidad ante una eventual fuga, se puede recurrir al sellamiento del tipo prensa estopa, o bien existen otros factores asociados a esta elección como costos, presión y temperatura. En el área existen bombas centrifugas críticas que tienen instalado este tipo de sello y principalmente distribuyen agua a distintas temperaturas en el área.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

3.7.2 Estanques y separadores

Los estanques pueden ser del tipo atmosféricos o presurizados y funcionan como depósitos que almacenan los distintos fluidos de trabajo que se utilizan en el área o bien ser parte de procesos de concentración y separación de fluidos como es el caso de los ciclones de flasheo. Por otro lado, los separadores cumplen la función de evacuar licores desde el impregnador o en el caso de las trampas de vapor dividir la fase liquida de los vapores de alivio.

3.7.3 Válvulas manuales

Como se detalló anteriormente, la mayoría de las válvulas manuales críticas del área están asociados a los calentadores de licor que alimentan los depósitos de impregnación y digestor continúo. Estas válvulas tienen sellamientos del tipo estático y dinámico, correspondiente a empaquetadura plana en sus bridas y prensa estopa para el vástago, sin embargo, este estudio se limitará solo al sellamiento de sus bridas, ya que el vástago es sellado mediante un kit de anillos que depende del tipo de válvula.

3.7.4 Transportadores y equipos únicos

Los transportadores se ubican principalmente en el primer tramo del área, que se encarga de la alimentación de astillas, además de los dispositivos de descarga de los depósitos de impregnación y el digestor. Estos equipos trasladan la materia prima por todo el circuito de alimentación, cumpliendo variadas funciones de paso donde inyectan vapores, vahos y licores, además de mantener los niveles requeridos para obtener la producción adecuada. En cuanto a los equipos denominados como únicos, son activos de gran envergadura que se identifican generalmente como elementos fundamentales de cada sistema.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Capítulo 4: Sellamiento de fluidos.

4.1 Emisiones fugitivas

Las emisiones fugitivas se definen como las emanaciones no controladas de cualquier fluido de trabajo debido a defectos de diseño, desgaste o rotura de sellos. Este tipo de emisiones incluyen todo tipo de escapes o filtraciones que se propagan directa o indirectamente a la atmosfera.

El concepto de fuga cero es relativo a los criterios y métodos de medición que se apliquen, siempre considerando que es imposible contener un fluido totalmente. En algunos equipos las pérdidas máximas pueden ser cuantificadas en gotas y mientras que en otros no más que partículas; todo depende del criterio que se establezca, para ello se deben considerar las características del fluido a sellar como su impacto sobre el medio ambiente, peligro de incendio y explosión entre otros factores relevantes dependiendo la aplicación. Como referencia se ha establecido que en promedio una gota de fluido posee un volumen de 0,05 cm^3 aproximadamente, lo cual se traduce en 20 gotas para acumular 1 cm^3, este es un parámetro útil para calcular pérdidas.

El control de las emisiones fugitivas está directamente relacionado con cuan satisfactorio sea el sellamiento de los equipos responsables de confinar los fluidos de trabajo; para comprobar este hecho se debe mantener un monitoreo constante de las uniones mediante inspecciones visuales rutinarias, las cuales son válidas para verificar los principales problemas puntuales causantes fugas, sin embargo si el objetivo es un dominio total de las emisiones fugitivas se debe incluir la detección de aquellas emanaciones que no pueden ser detectadas fácilmente por medio de inspecciones visuales, sino que se requiere de equipos especiales. Estados Unidos fue el país pionero en establecer un control efectivo de este tipo de emisiones por medio de un trabajo conjunto entre la industria y la Agencia de protección medioambiental (EPA), desarrollando nuevas tecnologías de monitoreo con la creación del método 21; el cual exige utilizar analizadores de gases conocidos como OVA (Organic Vapour Analyzer) que permite medir la concentración de los poluentes volátiles nocivos del aire en volumen de partes por

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

millón (ppm) sobre vástagos de válvulas, bombas, agitadores y todo tipo de uniones que puedan presentar perdidas; este método además estipular que la máxima concentración admisible para bridas debe ser de 500 ppm, sin embargo hoy en día las nuevas políticas medio ambientales exigen que este valor sea limitado a 100 ppm.

En plantas químicas de gran envergadura como es el caso de los complejos de celulosa, donde resultaría ser muy efectivo ya que además de aportar en el ámbito de la seguridad con la notificación efectiva de todo tipo de emanaciones al ambiente, será posible cuantificar realmente las perdidas por fugas y de paso prever con anticipación el estado del sellamiento en prensas y bridas de los equipos críticos.

4.2 Sellamiento industrial de fluidos

A nivel industrial, las filtraciones asociadas al escape del fluido pueden resultar en problemas considerables para los procesos y personal relacionado con el equipo. Es por ello que los diferentes métodos de estanqueidad en los equipos industriales, buscan reducir al máximo cualquier tipo de emisión, utilizando diferentes materiales y formas en la confección de sellos.

El objetivo principal del cierre de un equipo o una línea es contener el fluido de trabajo con el fin de proteger el entorno inmediato de la contaminación o viceversa. El amplio espectro de sellamientos puede dividirse en dos grandes grupos: Estático y Dinámico.

4.3 Sellamiento Estático

Las uniones industriales generalmente se acoplan mediante bridas, el ideal de la fabricación de una brida es generar una superficie totalmente plana y lapeada, de modo que al formar una junta con otra brida de iguales características se mantenga un acoplamiento que genere un sello perfecto, sin embargo, lograr esta calidad superficial implica el consumo recursos técnicos y económicos muy elevados. Para suplir esta necesidad se utilizan las empaquetaduras como

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

elementos de sellado, de modo que al realizar la compresión de las bridas se rellenan todas las imperfecciones entre caras.

En este tipo de sellamiento es habitual utilizar empaquetaduras planas comprimidas, fabricadas a partir de diferentes fibras reforzadas de materiales estables para responder a las condiciones que la aplicación requiera; se aplican principalmente en uniones bridadas, como escotillas de inspección. Por otro lado, los pernos son los elementos roscados que permiten la sujeción que mantiene la unión de la junta, soportando cargas de tensión, cortantes, torsión o la combinación de estas. Los sellamientos de tipo estático, están sometidos a cargas de trabajo que pueden ser de naturaleza estática, pero también dinámica debido a variaciones de temperatura o presión. Para obtener un sellado satisfactorio se deben considerar varios factores que generalmente se desprecian, los más importantes se describen a continuación:

- Selección adecuada de las empaquetaduras planas
- Acabado superficial de las superficies a unir
- Fuerza de sellamiento que mantiene la unión del ensamble

4.3.1 Empaquetaduras planas comprimidas

Las empaquetaduras planas también conocidas como sellos de estanqueidad son los principales elementos de sello que se utilizan en las uniones bridadas para aislar todo tipo de fluidos. La fabricación de los empaques se realiza en base a materiales compresibles o una combinación de elementos que permitan la adaptabilidad de la junta a las superficies estacionarias de sujeción. Una empaquetadura adecuada para una aplicación específica debe ser capaz de soportar las presiones, temperatura y características químicas del medio a sellar, además de resistir las fuerzas que aseguran la unión. Estas fuerzas de compresión generan una combinación de tensiones de contacto, las cuales provocan que la empaquetadura fluya por las imperfecciones de las bridas, evitando de este modo que el fluido confinado escape.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3.1.1 Materiales para empaquetaduras comprimidas

Actualmente existe una amplia variedad de materiales utilizados en la fabricación de empaquetaduras, los cuales pueden ser procesados en su estado puro o bien combinarlos con el fin de modificar y aumentar las características que definen su capacidad de sellamiento conforme a las distintas condiciones de operación requeridas. Para lograr abarcar la gran cantidad de materiales y simplificar su descripción, se dividirá el conjunto en 4 grupos: Metálicos, en base a fibras, elastoméricos y otros sin clasificar. A continuación, se nombran los principales materiales que conforman cada grupo, la descripción de cada uno se encuentra en las tablas 4.1, 2, 3 y 4 del anexo B.

1. **Materiales metálicos:** Los materiales metálicos son utilizados en aplicaciones donde la empaquetadura experimente altas tensiones mecánicas, ya sea como mallas para reforzar láminas comprimidas, espirales metálicas combinadas con otros materiales o bien como anillos de sello totalmente metálicos.
    - Acero al carbono
    - Acero inoxidable 304/304L
    - Acero inoxidable 316/316L
    - Acero inoxidable 410
    - Titanio
    - Cobre
    - Aluminio
    - Aleación 200 o Níquel 200
    - Aleación 400 o Monel 400
    - Aleación 600 o Inconel 600
    - Aleación 800 o Incoloy 800

2. **Materiales en base a fibras:** La elevada resistencia de este tipo de materiales, los hace ideales para cumplir una función estructural en combinación con diferentes elastómeros y otros, para la formación de láminas comprimidas de alta resistencia.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- Fibra de carbono
- Aramida
- Sulfato de bario
- Fibra mineral artificial
- Vidrio

3. **Materiales elastoméricos:** Generalmente este tipo de materiales son la primera opción que se analiza para resolver un problema de estanqueidad que requiera un sello en plancha, pero generalmente actúan en alianza con fibras donde cumple el rol de ligante, aumentando sus características sellantes.
    - Caucho butilo (IRR)
    - Caucho natural (NR)
    - Estireno butadieno (SBR)
    - Etileno propileno (EDPM)
    - Neopreno (CR)
    - Nitrilo (NBR)
    - Polietileno clorosulforado
4. **Otros materiales:** Este tipo de materiales de sellado se han desarrollado como respuesta a necesidad de obtener materiales de sellado más seguros y con propiedades mejoradas.
    - Grafito flexible
    - Politetrafluoretileno (PTFE) o teflón

4.3.1.2 Tipos de empaquetaduras comprimidas

La efectividad, duración y afinidad del sellamiento con el medio y las condiciones de servicio, varían de acuerdo a los materiales de fabricación y del tipo de sello que se selecciona. Generalizando, las empaquetaduras se pueden clasificar en 3 grandes grupos (figura 4.1) que se describen a continuación:

1. **Empaquetaduras no metálicas o blandas:** Se trata empaques comprimidos en láminas, destinadas a una amplia gama de aplicaciones de

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

presión media, donde se requiera resistencia química. Los principales materiales utilizados para su fabricación son las fibras en base a compuestos sintéticos, PTFE y grafito.

2. **Empaquetaduras semi metálicas:** Como su nombre lo indica, están compuestas por materiales metálicos. Poseen características de resistencia y flexibilidad proporcionadas por el metal y son apropiadas para aplicaciones de baja y alta presión. En este caso, los principales tipos son las espirometálicas, empaquetaduras blandas con refuerzo metálico, corrugadas metálicas, entre otros.

3. **Empaquetaduras metálicas sólidas:** Son fabricadas en base a un metal o una combinación de varios, por este motivo para asentar adecuadamente estas juntas se necesita de grandes cargas. Entre este tipo de empaques se destacan las juntas de tipo anillo y soldadas; estas empaquetaduras están destinadas para sistemas que exigen altas presiones y temperaturas.

Figura 4.1. Tipos de empaquetaduras: (De izquierda a derecha) No metálicas, Semi metálicas y Metálicas sólidas.

En general sea cual sea el tipo de empaque, se deben considerar principalmente las condiciones particulares de operación del equipo y que las características de la empaquetadura sean compatibles con la aplicación, para evitar el desgaste prematuro del sello.

En el capítulo 5 se abordará la selección de empaquetaduras, conforme a los requerimientos de cada equipo y la disposición de los principales sellos que ofrece el mercado actual a las plantas de celulosa.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3.2 Tipos de bridas y disposiciones de la empaquetadura

El tipo de bridas que componen la unión determina la geometría y posición de la empaquetadura en el ensamble, definiendo si el sello será de tipo confinado o no confinado, además ciertas características de las bridas como el paralelismo, planitud y acabado superficial, resultan fundamentales para asegurar la estanqueidad del ensamble. En el caso de los equipos críticos del área, los tipos de bridas son variados, sin embargo, tienen como características comunes ser empaquetaduras no confinadas y no consideran la perforación de pernos. Los principales tipos de bridas utilizadas en la industria actual se describen en la tabla 4.5 del anexo B.

4.3.2.1 Paralelismo y planitud de las superficies de sellado

El paralelismo y la planitud son factores importantes para garantizar una unión precisa y proporcionar una estanqueidad adecuada. En caso que la alineación y el paralelismo entre caras de las bridas no sea la adecuada, resultara en una compresión irregular del empaque (esta irregularidad también se produce en casos donde el centrado de la empaquetadura fue incorrecto), lo cual inevitablemente producirá fugas. Se ha estipulado como norma que la suma de las desviaciones de ambas bridas, debe ser menor o igual a 0,4 mm.

En cuanto a la variación de planitud en las superficies de sellado, se pueden manejar desviaciones máximas según el tipo de empaquetadura a utilizar.

$$Desviacion\ maxima \begin{cases} Laminas\ no\ metalicas: 0{,}8\ mm \\ Semi-metalicas: 0{,}4\ mm \\ Metalicas\ solidas: 0{,}1 mm \end{cases}$$

4.3.2.2 Acabado superficial

El acabado superficial de las bridas es un factor que en algunas ocasiones se omite o no se considera como relevante, sin embargo, la selección correcta de la empaquetadura está directamente relacionada con la calidad y rugosidad de la superficie donde se instalara.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Para cada tipo de empaquetadura está definido un tipo de calidad superficial, en términos generales se establece lo siguiente:

- Para empaquetaduras no metálicas, la superficie requiere ser ranurada, ya que estas requieren ser sujetas (mordidas) entre las bridas, para evitar la extrusión o expulsión del sello a causa de la fuerza radial.
- Para las empaquetaduras metálicas sólidas, el acabado debe ser lo más fino posible, ya que si la superficie presenta defectos será muy difícil que el material del empaque se deforme o escurra para suplir las imperfecciones.
- En caso de ser empaques semi-metálicos, como por ejemplo del tipo espirometálicas, se necesita que la superficie tenga una leve aspereza, para evitar el deslizamiento bajo presión.

La tabla 4.6 resume los acabados superficiales recomendados según el tipo de empaquetadura que se requiere asentar.

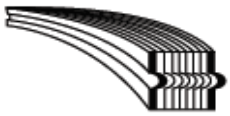
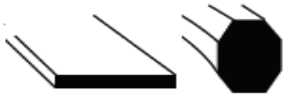
Empaquetadura	**Sección transversal**	**Acabado superficial (Ra)**	
		μm	μpol
Comprimida no-metálica		3.2 a 6.3	125 a 250
Espirometálicas		2.0 a 6.3	80 a 250
Encamisadas metálicas		1.6 a 2.0	63 a 80
Metálicas (Todo tipo)		1.6	63

Tabla 4.6: Principales tipos de acabado superficial según tipo de empaquetadura

A continuación, se establecen algunas consideraciones para relacionar adecuadamente la empaquetadura con el acabado superficial:

- La fuerza mínima de aplastamiento debe ser aplicada, para lograr que la empaquetadura escurra adecuadamente por las irregularidades de la brida.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- Para cualquier tipo de empaquetadura o acabado superficial, es importante que no existan marcas radiales de herramientas en las superficies a sellar.
- Si se requiere de ranurado, se recomienda optar por las ranuras del tipo concéntricas y no fonográficas, ya que son más fáciles de sellar.

4.3.3 Pernos y esfuerzos asociados

Además de efectuar una adecuada selección y montaje de la empaquetadura, el análisis del sellamiento estático se concentra en los elementos de sujeción, los pernos. En el momento en que un perno se une por enroscamiento a una tuerca para unir dos o más elementos, se generan cargas que teóricamente deberían ser compartidas por todos los filetes en contacto, sin embargo, una estimación más apegada a la realidad indica que producto de las variadas imprecisiones en la unión, la mayor parte de la carga sea soportada solo por los primeros filetes. Ambos supuestos son extremos para calcular los esfuerzos en los filetes, por lo tanto, el esfuerzo verdadero resultante debería ubicarse entre estos límites.

Los esfuerzos responden a cargas externas sobre un elemento, en este caso los principales tipos de carga involucradas sobre los componentes de unión son de tracción o compresión (axiales), flexión o cizalle (laterales) y de torsión (torque). El esfuerzo se incrementará conforme aumenten las cargas y el nivel máximo admisible dependerá de la forma, tamaño y naturaleza del elemento.

4.3.3.1 Esfuerzo axial

Un elemento roscado destinado a la sujeción, generalmente solo experimenta cargas de tracción o tensión axial, mientras que la compresión cobra importancia solo en tornillo de potencia. El esfuerzo axial se determina en base a la fuerza aplicada y el área de esfuerzo de tensión propia de cada perno estandarizado, de la siguiente forma:

$$Esfuerzo\ de\ tension\ axial\ = \frac{Fuerza\ aplicada}{Area\ de\ esfuerzo} \Longrightarrow S_t = \frac{F}{A_t} \qquad ec.1$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Para determinar el área de esfuerzo a la tensión, se deben diferenciar los tipos de perfiles de filetes según los estándares existentes. Actualmente, los perfiles de filetes o cuerdas difieren según normas internacionales establecidas. Por un lado, se encuentra el Estándar Nacional Unificado (UNS), fijado por Estados Unidos, Gran Bretaña y Canadá, mientras que la Organización Internacional de Normalización (ISO) también definió un estándar similar al anterior, pero que utiliza dimensiones métricas.

Los datos utilizados para determinar los diámetros y áreas están definidos por la norma ANSI B1.1-1974 y B18.3.1-1978. De lo anterior se tiene deducen las siguientes ecuaciones:

$$Area\ de\ esfuerzo\ por\ tension \implies A_t = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_p + d_r}{2}\right)^2 \qquad ec.2$$

Para filetes o cuerdas de UNS:

$$d_p = d - \frac{0{,}649519}{N} \qquad y \qquad d_r = d - \frac{1{,}299038}{N}$$

Para filetes o cuerdas de ISO:

$$d_p = d - 0{,}649519 \times p \qquad y \qquad d_r = d - 1{,}226869 \times p$$

$$d = Diametro\ exterior, \qquad N = N°\ de\ filetes\ por\ pulgada \quad y \quad p = paso\ en\ mm$$

Las principales dimensiones y áreas de resistencia ya han sido calculadas y tabuladas en tablas, según su estándar, tipo de rosca y filete, como se muestra en las tablas 4.7 y 4.8 del Anexo B.

4.3.3.2 Esfuerzo cortante

En las uniones apernadas, siempre existirá un espacio libre entre perno y agujero que generara esfuerzos del tipo cortante, sin embargo estos no se consideran como principales, ya que los pernos utilizados son generalmente precargados para hacer trabajar las piezas en compresión, de este modo habrá mayor resistencia a las cargas de tensión externa y además se generara fricción para resistir la carga cortante; por lo tanto como esta carga no afecta la tensión final del perno, se

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

omitirá su análisis, con el fin de enfocar el estudio en los efectos de la carga externa sobre los elementos de unión.

4.3.3.3 Esfuerzo de torsión

Al aplicarse una fuerza de apriete a una tuerca sobre un perno, se desarrolla un esfuerzo de torsión en este último. Este torque depende de la fricción que se genera en los puntos de contacto entre el perno y la tuerca. La adecuada lubricación disminuye la transmisión de torque sobre el perno y aumenta entre la tuerca y la superficie a unir. En caso que no haya lubricación y los elementos de sujeción la encuentren oxidados, todo el torque se aplicara sobre el perno, sobre exigiendo su estructura.

4.3.3.4 Relación esfuerzo-deformación

Al entrar un elemento en estado de esfuerzo, también este comienza a experimentar una deformación geométrica como consecuencia de la carga aplicada, puede existir deformaciones del tipo axial, lateral y torsional.

Las deformaciones que sufren los elementos en sus diferentes manifestaciones pueden ser de carácter elástico, permitiendo que el elemento recupere su forma original, después de haber desaparecido la carga que provoco la deformación. En el caso que el elemento no responda a esta condición y persista la distorsión, entonces se la deformación será plástica. Esta situación resulta fundamental al momento de analizar los elementos de sujeción en una unión, ya que el grado de deformación depende de la magnitud de la carga aplicada sobre un elemento de geometría definida.

Generalmente se busca que la carga no exceda la capacidad de deformación elástica, porque así el elemento puede conservar la capacidad de mantener la forma original, lo cual permite predecir teóricamente las capacidades dentro del rango elástico. En la figura 4.2, se observa el grafico esfuerzo-deformación típico que se obtendría de pruebas sobre un material dúctil.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

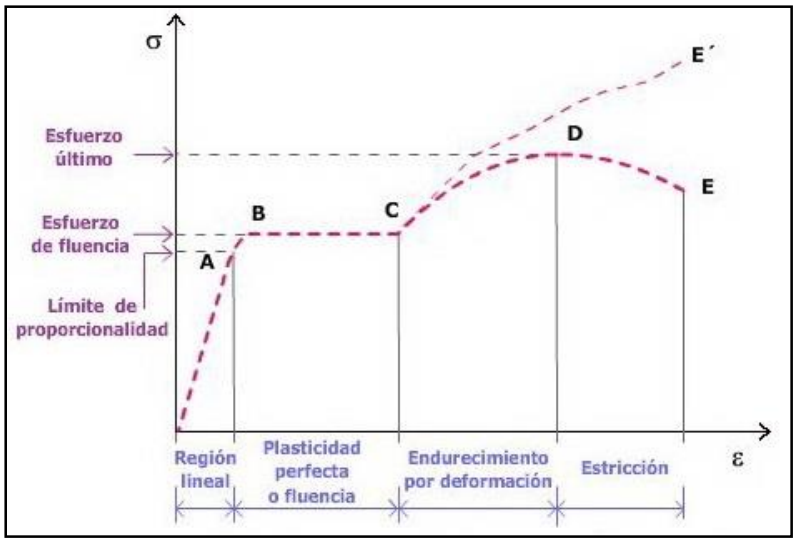


Figura 4.2: Grafico esfuerzo-deformación de un material dúctil

4.3.3.5 Resistencias de pernos normalizados

Las resistencias y características de los materiales de fabricación de los pernos se definen por grados o clases según las diferentes nomas. La información técnica de los aceros comerciales proporciona los valores de la resistencia límite de prueba, resistencia a la fluencia y resistencia última; el detalle de las especificaciones SAE, ASTM y métrica para pernos de acero están contenidas en las tablas 4.9, 4.10 y 4.11 del anexo B. Las clases y grados se distinguen en las cabezas de cada perno mediante marcas y números, como muestra la figura 4.3.

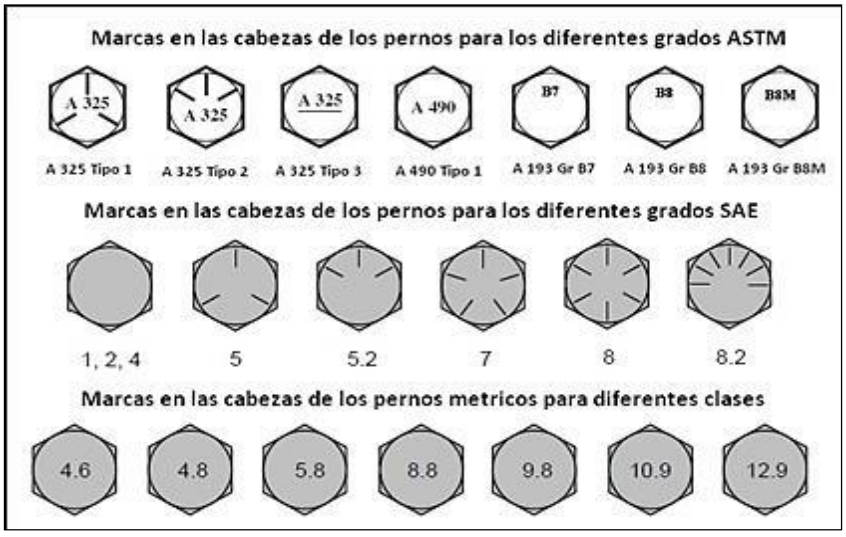


Figura 4.3: Principales marcas de cabeza en diferentes pernos según normas.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

La resistencia de prueba cobra relevancia, ya que es el esfuerzo máximo que el perno puede soportar sin experimentar una distorsión permanente. Para mantener la unión de un ensamble, donde los pernos están sometidos a cargas de tensión, se aplica una precarga con un torque suficiente para crear cargas de tensión cercanas a la resistencia de prueba.

4.3.4 Método Analítico: Cargas y deformaciones en unión apernada

El sellamiento estático requerido en la mayoría de los equipos analizados en este estudio corresponde a escotillas que poseen ensambles de unión mediante bridas y empaquetaduras no confinadas, sujetos por una circunferencia de pernos equidistantes sometidos a cargas axiales con apriete inicial.

La figura 4.5 muestra las principales fuerzas en una unión bridada. La presión interna de los equipos genera una fuerza de separación entre las bridas que se distribuye entre los pernos, esta fuerza se denomina como carga externa (F_t).

$$Carga\ externa\ sobre\ cada\ perno = \frac{Carga\ de\ trabajo\ total}{Numero\ de\ pernos} \Longrightarrow F_t = \frac{F_T}{n_{pernos}}$$

La premisa para validar este cálculo es que la carga externa total se distribuya uniformemente entre todos los pernos, situación que solo podría ser efectiva si los elementos a unir son simétricos axialmente, requisito que cumplen todos los equipos sujetos al análisis, por lo tanto, se asumirá esta condición.

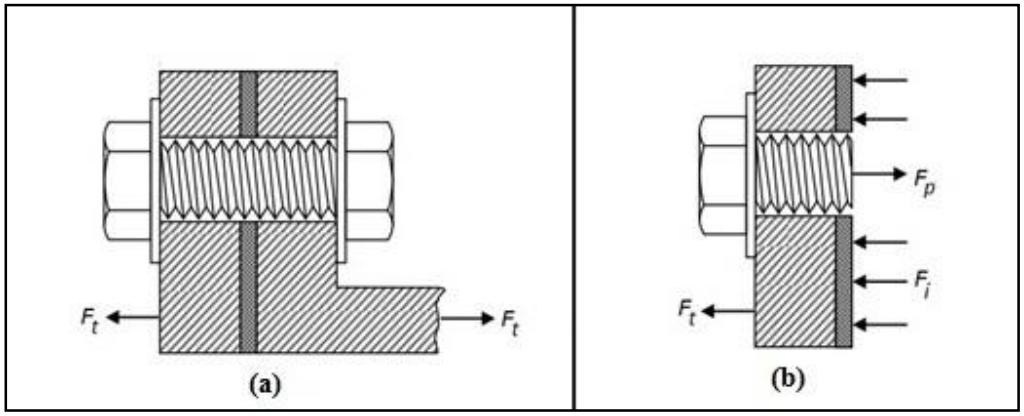


Figura 4.4: Unión mediante bridas y perno (a) y diagrama de cuerpo libre (b).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

El diagrama de cuerpo libre de la figura 4.4 (a), muestra la interacción de fuerza internas que se generan bajo una condición de equilibro. La carga F_t es la fuerza externa de trabajo que relaciona la carga externa total sobre el número de pernos, la carga F_i corresponde a la fuerza de compresión inicial en las partes a unir y la carga F_p representa la fuerza de tracción axial en el perno. De la figura 4.4 (b) se entiende que la carga sobre el perno es igual a:

$$F_p = F_i + F_t \qquad ec.3$$

Por otro lado, como se observa en el gráfico de la figura 4.2 se identifica una primera zona elásticas que forma una recta hasta el punto donde se establece el límite de proporcionalidad, en este tramo las cargas que experimentan los pernos y la empaquetadura son proporcionales a las deformaciones que se generan.

$$S = E \times \varepsilon \quad Donde \begin{cases} S = Esfuerzo\ debido\ a\ una\ carga\ axial \\ E = Modulo\ de\ elasticidad\ longitudinal \\ \varepsilon = Deformacion\ unitaria \end{cases}$$

Como los elementos de fijación están sometidos a carga axial, se entiende que:

$$S = \frac{F}{A} \quad y \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Al vincular la deformación del esfuerzo aplicado se obtiene la constante elástica (k), emulando el comportamiento de un resorte, ya que los materiales del perno y la empaquetadura se mantienen dentro del límite de proporcionalidad.

$$\frac{F}{A} = E\ \frac{\Delta L}{L} \implies F = \Delta L \left(\frac{A\ E}{L}\right) \implies F = \Delta L\ k \quad \therefore k = \frac{A\ E}{L} \qquad ec.4$$

Dónde $A, L\ y\ \Delta L$ corresponden al área, longitud inicial y deformación total respectivamente.

4.3.4.1 Constante elástica para pernos

De lo anterior se deduce la constante elástica para pernos (k_p).

$$k_p = \frac{A_p\ E_p}{L_p} \qquad ec.5$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

En el caso del perno, el área transversal (A_p) se considera dentro de la longitud existente entre arandelas (L_p), para definirla se debe hacer diferencias en caso de ser roscada, sin roscar o parcialmente roscada, como indica a la figura 4.5.

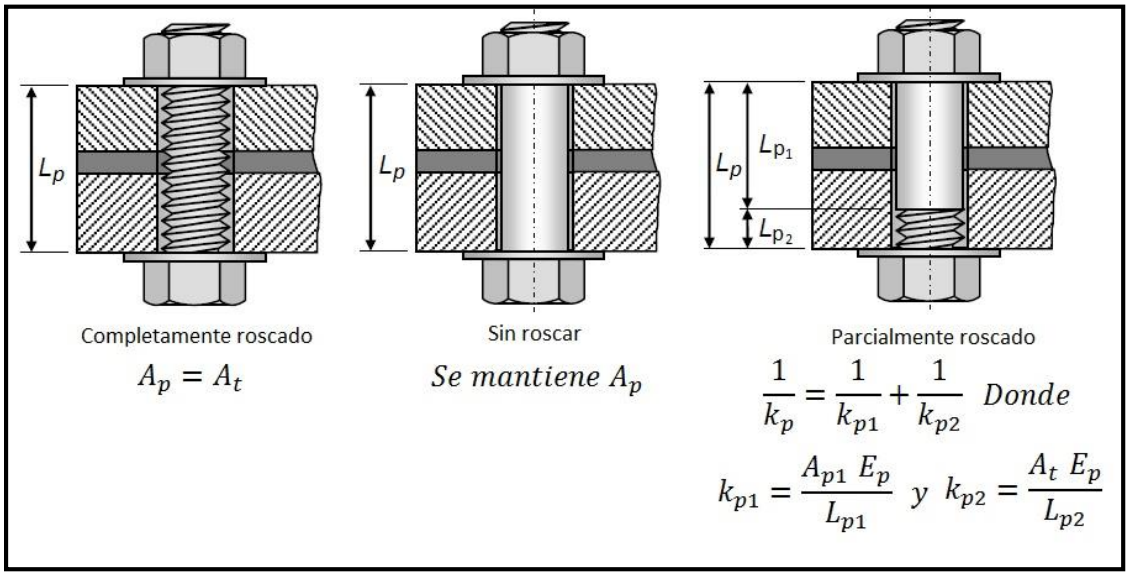


Figura 4.5: Definición de áreas transversales de perno según su roscado.

Las áreas de esfuerzo por tensión (A_t) de los pernos se deducen de la ecuación 2 vista anteriormente, sin embargo, para efectos de cálculo, esta información está también tabulada en las tablas 4.8 y 4.9 del Anexo B.

En caso de no tener certeza del tipo de roscado que poseen los pernos, la constante elástica se puede resolver de la siguiente ecuación:

$$k_p = \frac{A_t\ A_p\ E_p}{A_p\ l_t + A_t l_s} \quad ec.6$$

$$\begin{cases} A_t = Area\ de\ esfuerzo\ por\ tension\ del\ perno \\ A_p = Area\ total\ de\ la\ seccion\ transversal \\ l_p = Longitud\ entre\ arandelas \\ l_c = Longitud\ roscada \\ \quad l_c = \begin{cases} l_c = 2d + \frac{1}{4} \quad para\ \ l_s \leq 6\ in. \\ l_c = 2d + \frac{1}{2} \quad para\ \ l_s > 6\ in. \\ l_c = 2d + 6 \ \ para\ \ l_s \leq 125\ mm \\ l_c = 2d + 12 \ \ para\ 125 < l_s \leq 200\ mm \\ l_c = 2d + 25 \ \ para\ \ l_s > 200\ mm \end{cases} \\ l_o = Longitud\ del\ perno \\ l_s = Longitud\ del\ vastago = l_o - l_c \\ l_t = Longitud\ de\ la\ cuerda\ sujeta = l_p - l_s \\ E_p = Modulo\ de\ elasticidad\ del\ material \end{cases}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3.4.2 Constante elástica para los elementos a unir

Para determinar la constante elástica de los elementos a unir se tiene que considerar que entre las partes a unir existe más de un tipo de material con módulos de elasticidad diferentes, por lo tanto, debe ser calculada como un conjunto de resortes en serie.

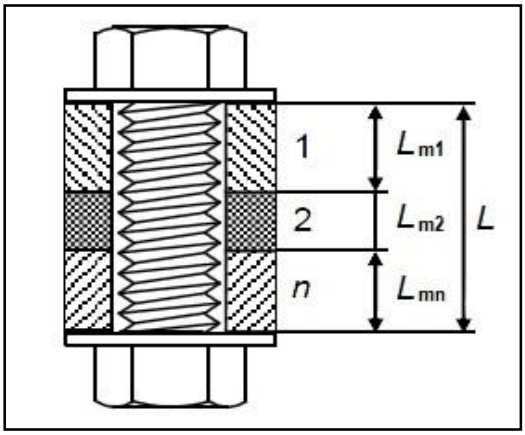


Figura 4.6: Elementos a unir de diferentes materiales

Por lo tanto, se obtiene la constante elástica equivalente de la siguiente forma:

$$\frac{1}{k_{mT}} = \frac{1}{k_{m1}} + \frac{1}{k_{m2}} + \cdots + \frac{1}{k_{mn}} \qquad ec.7$$

$$Donde \quad k_{mi} = \frac{A_{mi}\, E_{mi}}{L_{mi}} \qquad ec.8$$

Sin embargo, la ecuación 8 es solo es aplicable cuando el área de las partes a unir es pequeña y la compresión resulta uniforme (figura 4.6). Si la situación fuese más ajustada a la realidad, el área de las superficies a unir se ampliaría más allá del área de influencia del perno y la zona de compresión sería diferente. La distribución de esfuerzos bajo el perno tiene una forma compleja que ha sido foco de varios análisis de elementos finitos, definiendo que el mayor esfuerzo se ubica lógicamente justo bajo el perno y decrece conforme se aleja de la línea central del perno, formando un perfil con forma de barril (Figura 4.7).

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

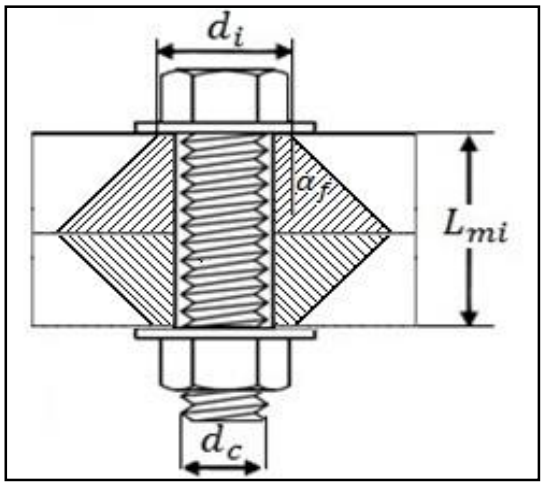


Figura 4.7 Distribución de esfuerzos en los elementos a unir, bajo el perno de sujeción.

Esta configuración fue analizada por Shigley y Mischke, quienes basaron la constante elástica de la junta en las dimensiones del tronco cónico y ángulo del vértice que forma, resultando la siguiente ecuación:

$$k_e = \frac{\pi\, E_i\, d_e\, tan\,(\alpha_f)}{2\ln\left[\frac{\left(L_m\ tan\,(\alpha_f) + d_i - d_e\right)(d_i + d_e)}{\left(L_m\ tan\,(\alpha_f) + d_i + d_e\right)(d_i - d_e)}\right]} \quad Donde \begin{cases} L_m = Long.\ axial\ tronco\ conico \\ d_i = \emptyset\ \ del\ tronco\ conico \\ d_e = \emptyset\ ext.del\ perno \\ \alpha_f = Angulo\ \ del\ vertice \end{cases}$$

En 1991, Wileman en cooperación con otros investigadores, formulo un método más simplificado con el cual obtuvieron una expresión exponencial para determinar la rigidez de las bridas. En la nueva ecuación se ajustaron los resultados de la curva por medio del análisis finito, en el cual se incorporaron una gran variedad de materiales y geometrías asociadas a las constantes adimensionales A_i y B_i tabuladas según el material en la tabla 4.12. Cabe destacar que la longitud L_m corresponde a la distancia de las partes a unir, sin considerar el espesor de la empaquetadura, de esta forma la constante elástica se resuelve de la siguiente forma:

$$k_m = d_e\, E_m\, A_i\, e^{B_i\left(\frac{d_e}{L_m}\right)} \qquad ec.9$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Material	E (MPa)	E (psi)	A_i	B_i
Acero	207000	3.00×10^7	0.7872	0.6287
Aluminio	72000	1.04×10^7	0.7967	0.6382
Cobre	121000	1.75×10^7	0.7957	0.6355
Acero fundido gris	100000	1.45×10^7	0.7787	0.6162

Tabla 4.12 Constantes para la ecuación de Wileman

Para resolver la constante elástica de la empaquetadura, es necesario verificar si esta es del tipo confinada o no; la diferencia entre ambas es que las primeras permiten el contacto entre superficies, por lo tanto, se considera como si no estuviera presente en la unión, mientras que las no confinadas aíslan las superficies y deben incorporarse al cálculo de la constante. Como se especificó anteriormente en la ecuación 7, se considera que el módulo de elasticidad es directamente proporcional a la constante de elasticidad, por lo tanto:

$$k_{em} = \frac{A_{em}\, E_{em}}{L_{em}} \qquad ec.10$$

Donde A_{em} es el área de la empaquetadura afectada por perno, E_{em} es el módulo de elasticidad y L_{em} es el espesor. Para definir el área efectiva de la empaquetadura, tenemos:

$$A_{em} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{\left({D_{eem}}^2 - {D_{iem}}^2\right)}{N_{pernos}} - {d_e}^2\right) \; Donde \begin{cases} D_{eem} = \emptyset \; ext.de\ la\ empaquetadura \\ D_{iem} = \emptyset \; int.de\ la\ empaquetadura \\ d_e = \emptyset \; ext.del\ perno \end{cases}$$

En caso de ser una empaquetadura sin perforar, o sea que ubica al interior de la circunferencia de pernos se mantiene la misma ecuación anterior, pero lógicamente no se considera la sustracción del diámetro nominal de los pernos.

Una vez calculada la constante k_m para las partes a unir y la constante k_{em} de la empaquetadura, se puede obtener mediante la ecuación 6, donde la suma se considera como si fuese una estructura de resortes en serie, por lo tanto, la constante elástica total de los elementos a unir será:

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

$$k_e = \left(\frac{1}{k_{em}} + \frac{1}{k_m}\right)^{-1} \qquad ec.11$$

4.3.4.3 Precarga del perno

Para efectuar un sellamiento efectivo, donde los elementos a unir no se separen cuando las fuerzas del sistema sean aplicadas, debe aplicarse una precarga sobre el perno o también conocida como fuerza inicial de apriete. Los siguientes diagramas demuestran las fuerzas de precarga y deflexiones iniciales que se generan en pernos y empaquetaduras.

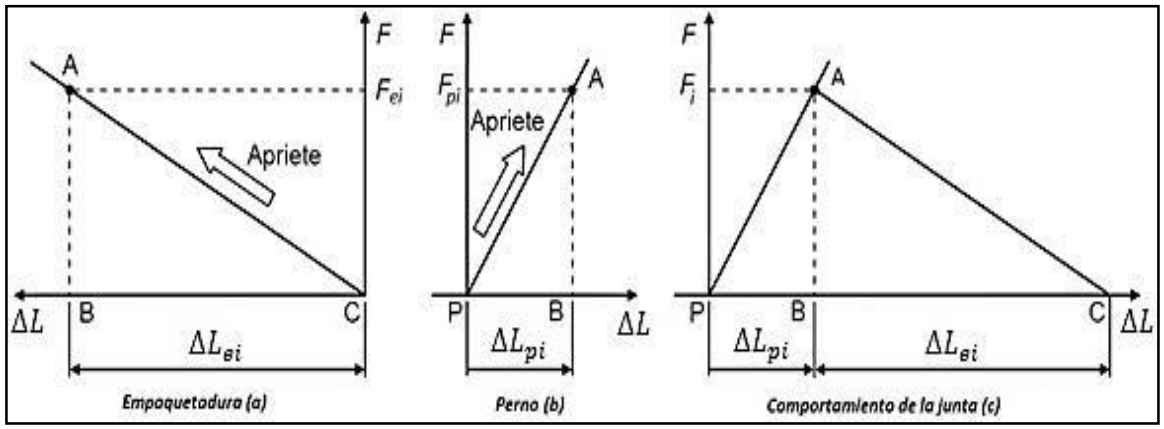


Figura 4.8: Representación gráfica de los efectos de la precarga sobre el ensamble

La figura 4.8, grafica el comportamiento del perno y empaquetadura en un sistema coordenado común, partiendo de una deflexión inicial igual a cero. La fuerza de precarga sobre el perno deforma el perno, incrementando su longitud (ΔL_{pi}) de acuerdo se incrementa la carga (F_{pi}), lo cual queda demostrado en la pendiente positiva de la recta PA del perno. Por otro lado, la pendiente negativa de la recta CA correspondiente a la empaquetadura representa una compresión, disminuyendo su longitud (ΔL_{ei}) conforme aumenta la carga de apriete (F_{ei}).

Una vez terminada la precarga y sin aplicar la fuerza externa de trabajo, se asume que $F_t = 0$ en la ecuación 3, resultando $F_p = F_i = F_{pi} = F_{ei}$, de este modo se demuestra que bajo estas condiciones la carga en el perno y la empaquetadura son iguales. Como la precarga F_i se fija por medio del apriete del perno, las

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

deformaciones son controladas por sus constantes elásticas $(k_p\ y\ k_e)$ hasta alcanzar el punto A en las líneas de rigidez de cada materia de los elementos.

Bajo la condición de apriete inicial la tuerca avanza sobre el perno haciendo que esta sufra un estiramiento y la empaquetadura un aplastamiento de diferentes magnitudes dependiendo de los materiales de cada elemento; finalizada la precarga la tuerca no girara, lo cual implicara que la carga de trabajo externa provoque un alargamiento de los pernos igual a la descompresión de la empaquetadura. Estas deflexiones y distribuciones de la fuerza serán analizadas considerando la naturaleza de la carga que puede ser estática o dinámica.

4.3.4.3.1 Pernos precargados bajo carga estática

Las cargas estáticas se caracterizan por no variar su magnitud y mantenerse como fuerzas constantes sobre la junta y sus componentes. Las cargas involucradas en una unión apernada se completan si se considera la aplicación de la carga externa. A continuación, la figura 4.9 complementa el comportamiento de la empaquetadura de la figura 4.8 (b) tras experimentar el efecto de las cargas totales.

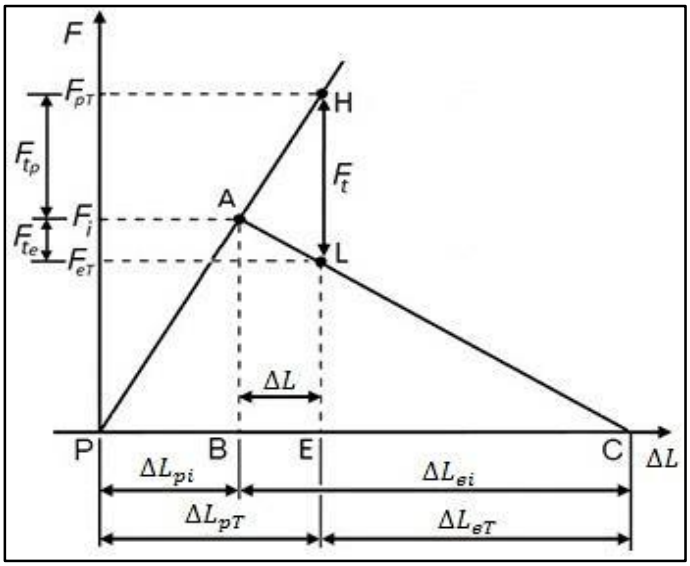


Figura. 4.9: Comportamiento de la junta tras aplicarse la carga estática.

En el nuevo escenario, el aumento de la carga externa genera una nueva deformación en el perno y la empaquetadura, situación representada por los

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

puntos H y L respectivamente, estos puntos se encuentran en la misma vertical ya que la magnitud de sus deformaciones al aplicar la fuerza externa resultan ser iguales, gráficamente representadas por ΔL , con la diferencia que en el perno la fuerza se incrementa y asciende por la línea de rigidez del material desde A hasta H y su alargamiento se prolonga al punto E, mientras que la empaquetadura baja su carga hasta L y se descomprime reduciendo su deformación desde B hasta el punto E.

En la gráfica se observan las fuerzas F_{pT} y F_{eT} , coincidentes con el punto H y L respectivamente. La primera indica la carga total en el perno, mientras que la segunda en las partes a unir.

Además, gráficamente se observa que la carga externa de trabajo (F_t) se distribuye entre el perno (F_{tp}) y las partes a unir (F_{te}), por lo tanto:

La carga externa de trabajo: $F_t = F_{tp} + F_{te}$

La carga de compresión total en las partes a unir: $F_{eT} = F_i - F_{te}$ $\quad ec.12$

La carga de tensión total sobre el perno será: $F_{pT} = F_i + F_{tp}$ $\quad ec.13$

Si se aplica una carga externa superior, donde la carga de tensión total sobre el perno genere elongaciones que traspasen el límite de proporcionalidad del material, lógicamente se perderá el apriete sobre la empaquetadura y en consecuencia se perderá la capacidad de sello. En caso de que F_{eT} resulta ser cero o un valor negativo, significa que el material se encuentra en su límite o no fue capaz de soportar la fuerza de tensión y se separara. La diferencia de deflexión que experimentan los pernos y la empaquetadura (ΔL) producto de la carga externa de trabajo, se relaciona con las constantes elásticas de cada material $(k_p \; y \; k_e)$ de la siguiente forma:

$$\Delta L = \frac{F_{tp}}{k_p} = \frac{F_{te}}{k_e} \Longrightarrow F_{te} = \frac{k_e}{k_p} F_{tp} \quad o\ bien \quad F_{tp} = \frac{k_p}{k_e} F_{te}$$

Reemplazando en la ecuación 10, tenemos:

$$F_t = \frac{k_e}{k_p} F_{tp} + F_{tp} \implies F_t = F_{tp} \left(\frac{k_e + k_p}{k_p} \right) \Longrightarrow \quad F_{tp} = \left(\frac{k_p}{k_e + k_p} \right) F_t \Longrightarrow \quad F_{tp} = C\, F_t$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

La expresión $C = k_p/(k_e + k_p)$, se denomina como constante de rigidez del ensamble y adopta valores menores a 1, ya que determina la fracción de carga a la que estarán sometidos los elementos de la junta. Considerando lo anterior se define la componente F_{te} :

$$F_t = \frac{k_p}{k_e} F_{te} + F_{te} \Longrightarrow F_t = F_{te}\left(\frac{k_p + k_e}{k_e}\right) \Rightarrow F_{te} = \left(\frac{k_e}{k_p + k_e}\right) F_t \Longrightarrow F_{te} = (1 - C)\, F_t$$

La carga total sobre perno y las partes a unir en función de la carga externa de trabajo se obtiene reemplazando F_{te} y F_{tp} en las ecuaciones 12 y 13.

$$F_{eT} = F_i - (1 - C)\, F_t \qquad ec.14 \qquad y \qquad F_{pT} = F_i + C\, F_t \qquad ec.15$$

Si en la ecuación 12, se anula la carga que deben soportar las partes a unir ($F_{eT} = 0$), se tiene:

$$0 = F_i - (1 - C)\, F_t \Longrightarrow F_t = F_t\, max = \frac{F_i}{(1 - C)}$$

A partir de lo anterior se obtiene la fuerza o carga necesaria para lograr la separación del ensamble $(F_t\, max)$, por lo tanto, se puede deducir el factor de seguridad contra la separación de la junta (N_{sep}):

$$N_{sep} = \frac{F_t\, max}{F_t} = \frac{F_i}{F_t(1 - C)} > 1 \qquad ec.16$$

El factor de separación N_{sep} debe mantenerse siempre sobre 1, de manera contraria la fuerza externa sobrepasaría la capacidad de carga del perno.

El esfuerzo de tracción de apriete suele ser cercano a la resistencia de prueba, debido a que, al efectuar una alta precarga, se minimizará la posibilidad de que la carga externa sobrepase el esfuerzo del perno, por lo tanto, de existir cargas variables la fluctuación de este será mínima, sin embargo, siempre se debe considerar un margen adecuado al límite de fluencia. Para obtener el esfuerzo de compresión de precarga (S_i) se recomienda utilizar el criterio establecido por Norton acerca de la naturaleza de la carga, como se indica a continuación.

$$Naturaleza\ de\ la\ carga \Rightarrow S_i = \begin{cases} 0{,}75\, S_p \longrightarrow Cargas\ estaticas \\ 0{,}90\, S_p \longrightarrow Cargas\ dinamicas \end{cases}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Por otro lado, como el esfuerzo es uniaxial se deduce que el esfuerzo principal iguala al esfuerzo de Von Misses, por lo tanto, se puede evaluar el factor de seguridad contra la fluencia de la siguiente forma:

$$N_y = \frac{S_y}{S_{pT}} \quad Donde \begin{cases} S_y = Resistencia\ de\ fluencia\ minima\ a\ la\ tension \\ S_{pT} = \dfrac{F_{pT}}{A_t} = Esfuerzo\ de\ tension\ total\ en\ el\ perno \end{cases}$$

$$\therefore \quad N_y = \frac{S_y\ A_t}{F_{pT}} = \frac{S_y\ A_t}{F_i + C\ F_t} \qquad ec.17$$

Cuanto más alto sea el factor de seguridad contra la separación y la fluencia, más adecuado será el sellamiento se debe considerar que si el objetivo es proteger el sellamiento de posibles sobrepresiones es mejor mantener un nivel de precarga cercano a la resistencia de fluencia, sin embargo, como se mencionó anteriormente es necesario mantener un porcentaje de resguardo, para no sobrepasar este límite, por lo tanto, lo es recomendable obtener un equilibrio que asegure el sellamiento. Si se grafican ambos factores de seguridad $\left(N_y\ y\ N_{sep}\right)$ respecto al porcentaje de precarga relacionado con la resistencia de prueba, sería posible identificar un punto común que permita hallar una precarga equilibrada y suficiente para mantener la adecuada unión del ensamble, sin embargo, es necesario considerar las condiciones del sistema a sellar, los cuales solicitan precargas superiores para proteger la unión de sobrecargas, por ello es necesario utilizar precargas superiores. Para hallar el punto de equilibrio se pueden igualar las ecuaciones 16 y 17, como se muestra a continuación:

$$N_y = N_{sep} \Rightarrow \frac{S_y\ A_t}{F_{pT}} = \frac{F_0}{F_t} \Rightarrow \frac{S_y\ A_t}{F_i + C\ F_t} = \frac{F_i}{F_t(1-C)}$$

$$Despejando\ F_i\ tenemos: {F_i}^2 + F_i\ C\ F_t - \left(S_y\ A_t\ F_t(1-C)\right) = 0 \qquad ec.18$$

Resolviendo la anterior ecuación cuadrática se obtiene directamente la fuerza de precarga de equilibrio $(F_i\, eq)$ y por ende se pueden deducir los porcentajes de la carga de prueba $(\%\, eq)$ y el factor de seguridad (Neq) que equilibran ambos criterios de seguridad. La fuerza de precarga equilibrada se asumirá como un valor mínimo para mantener el ensamble en su posición, ya que es habitual asegurar el

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

sellamiento de la unión incrementando la fuerza de precarga considerando un mayor porcentaje del esfuerzo de carga de prueba, manteniendo un margen apropiado hasta el límite permitido de fluencia del material, ya que en la mayoría de los casos se opta por reutilizar los pernos, lo cual implica que se pierden las características originales.

4.3.4.3.2 Pernos precargados bajo carga dinámica

Las uniones sometidas a cargas dinámicas tienen un efecto mayor de la precarga que para las cargadas estáticamente. Las cargas variables en el tiempo generan valores mínimos y máximos. La figura 4.10 presenta el diagrama de una unión apernada sometida a cargas de trabajo fluctuantes. Cuando la carga externa es igual a cero, el diagrama se mantiene como la gráfica de la figura 4.9, donde solo la precarga estática F_i se mantiene presente en el sistema. En el momento que la carga de trabajo F_t actúa sobre el ensamble se produce una distribución de la carga fluctuante entre perno y empaquetadura.

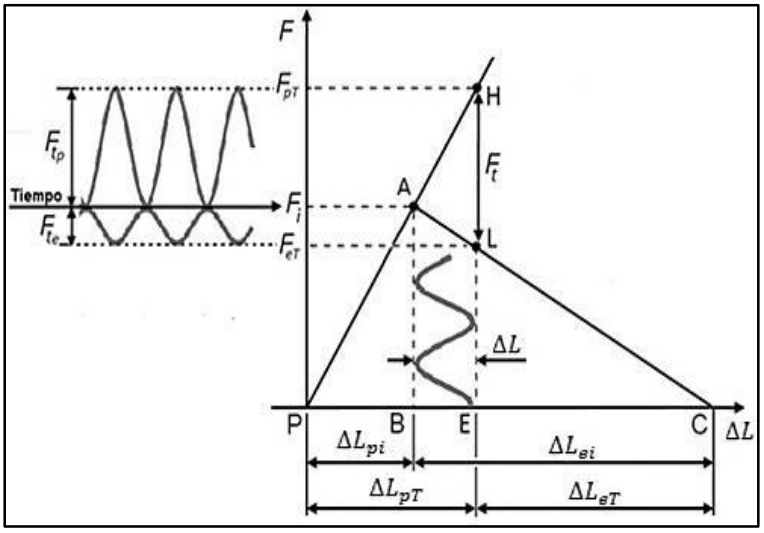


Figura. 4.10 Comportamiento de la junta tras aplicarse la carga dinámica.

En la figura 4.10 la carga de trabajo que se aplica al perno también corresponde a una carga de tensión, pero varía con el tiempo desde la precarga F_i hasta F_{pT}, al mismo tiempo la empaquetadura experimenta una compresión variable en el tiempo desde F_i hasta F_{eT}. Las oscilaciones en ambos elementos muestran que

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

cuando la carga sobre el perno es máxima, la carga sobre la empaquetadura adopta su valor mínimo y viceversa. Al igual que el caso estático, la diferencia de deflexión que se produce en ambos elementos es de igual magnitud, produciéndose en el perno un alargamiento incrementado y en la empaquetadura una contracción que disminuye por descompresión, por lo tanto en un principio el modo de calculo que se utiliza para definir las cargas y factores de seguridad contra la separación y fluencia es idéntico al aplicado bajo cargas estáticas, sin embargo el efecto cíclico genera cargas de fatiga que afectan al perno, por lo cual se debe incorporar un análisis al respecto que permita deducir las nuevas cargas, esfuerzos y parámetros de seguridad contra la fatiga.

De la ecuación 15, si se considera F_t como máxima carga se obtiene F_{pT} y se pueden deducir las fuerzas alternantes y media presente en el perno:

$$F_{p\,alt} = \frac{F_{pT} - F_i}{2} \quad ec.19 \qquad y \qquad F_{p\,med} = \frac{F_{pT} + F_i}{2} \quad ec.20$$

De lo anterior resultan los esfuerzos nominales alternantes y medio:

$$S_{p\,alt\ \ nom} = \frac{F_{p\,alt}}{A_t} \quad ec.21 \qquad y \qquad S_{p\,med\ nom} = \frac{F_{p\,alt}}{A_t} \quad ec.22$$

El factor de concentración de esfuerzos por fatiga (K_f) que experimenta el perno se calcula en base al diámetro nominal de la siguiente forma:

$$K_f = 5{,}7 + 0{,}6812\,d \quad \rightarrow \quad para\ \boldsymbol{d}\ en\ pulgadas$$

$$K_f = 5{,}7 + 0{,}02682\,d \quad \rightarrow \quad para\ \boldsymbol{d}\ en\ milimetros$$

Mediante este factor también se calcula el factor de concentración de esfuerzos medio (K_{fm}):

$$Si\ \ K_f|S_{\max nom}| < S_y \qquad \longrightarrow \qquad entonces:\ K_{fm} = K_f$$

$$Si\ \ K_f|S_{\max nom}| > S_y \quad \longrightarrow \quad entonces:\ K_{fm} = \frac{S_y - K_f\ \ S_{p\,alt\ \ nom}}{|S_{p\,med\ \ nom}|}$$

$$Donde\ S_{\max nom} = \left(S_{p\,alt\ \ nom} + S_{p\,med\ \ nom}\right)$$

Este último factor permite recalcular los esfuerzos locales alternantes y medios, además del esfuerzo que genera la fuerza de precarga.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

$$S_{p\,alt} = K_{fm}\ S_{p\,alt\ nom} \qquad ec.23 \qquad y \qquad S_{p\,med} = K_{fm}\ S_{p\,med\ nom} \qquad ec.24$$

$$S_{Fi} = K_{fm}\frac{F_i}{A_t} \qquad ec.25$$

Los esfuerzos resultantes en los pernos deben compararse con parámetros adecuados relativos a la resistencia del material. Para obtener una evaluación apropiada del límite de resistencia a la fatiga, es necesario calcular la resistencia a la fatiga teórica (S'_f) considerando la resistencia última a la tensión del material (S_{ut}), además de incorporar a la fatiga teórica los factores de corrección que consideran las condiciones de aplicación específicas de los pernos de sujeción. La ecuación 25 describe este cálculo.

$$S_f = C_{carga}\ C_{tamaño}\ C_{sup}\ C_{temp}\ C_{conf}\ S'_f \qquad ec.26$$

La obtención de los factores de corrección que componen esta ecuación se detalla a continuación:

- **Resistencia a la fatiga teórica $(\boldsymbol{S'_f})$:** Datos de resistencia a la fatiga obtenidos de pruebas de ciclo de cargas de flexión o axial invertida, en función de la resistencia ultima a la tensión de cada material.

$$Aceros \begin{cases} S'_f \cong 0{,}5\ S_{ut} & Para\ \ S_{ut} < 200\ ksi\ (1400\ MPa) \\ S'_f \cong 100\ kpsi\ (700\ MPa) & Para\ S_{ut} \geq 200\ ksi\ (1400\ MPa) \end{cases}$$

  Generalizando, se considera como el material de análisis el acero, ya que la gran mayoría de los pernos de sujeción en uniones industriales responde a elementos de acero o aleaciones.

- **Efectos de carga $(\boldsymbol{C_{carga}})$:** Para determinar el efecto de carga se debe considerar si las cargas principales son de flexión o axiales:

$$Flexion \longrightarrow C_{carga} = 1$$

$$Axial \longrightarrow C_{carga} = 0{,}7$$

  Como se determinó en el análisis de esfuerzos las principales cargas que afectan a los pernos de sujeción son de tipo axial.

- **Efectos de tamaño $(\boldsymbol{C_{tamaño}})$:** Se considera que una pieza más grande pueda fallar por fatiga frente a esfuerzos menores, ya que es más probable que existan defectos en un volumen mayor, por lo tanto, es adecuado un

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

factor que limite la resistencia. Para ello se han establecidos los siguientes parámetros, para piezas cilíndricas**:**

$$Para \begin{cases} d \leq 0{,}3\ in\ (8mm) \longrightarrow C_{tamaño} = 1 \\ 0{,}3\ in < d \leq 10\ in \longrightarrow C_{tamaño} = 0{,}869\ d^{-0{,}097} \\ 8\ mm < d \leq 250\ mm \longrightarrow C_{tamaño} = 1{,}189\ d^{-0{,}097} \end{cases}$$

- **Efectos de superficie (C_{sup}):** Este factor se determina en función de los acabados superficiales resultantes de los procesos de fabricación de los elementos de sujeción. Para ello se utiliza la siguiente ecuación exponencial:

$$C_{sup} \cong A(S_{ut})^b$$

Donde, los coeficientes *A* y *b* se obtienen de la tabla 4.13, según el acabado superficial:

Acabado superficial	Para S_{ut} en Mpa		Para S_{ut} en ksi	
	A	***b***	***A***	***b***
Esmerilado	1.58	-0.085	1.34	-0.085
Maquinado o rolado en frío	4.51	-0.265	2.70	-0.265
Rolado en caliente	57.7	-0.718	14.4	-0.718
Forjado	272	-0.995	39.9	-0.996

Tabla 4.13 Coeficientes para el factor de superficie en función del acabado superficial

En caso que $C_{sup} > 1$ se asume $C_{sup} = 1$, además cabe señalar que, para efectos de cálculo, se asumirá el acabado superficial como maquinado o rolado en frío.

- **Efectos de temperatura (C_{temp}):** Se han propuesto varias fórmulas para aproximar este factor a temperaturas relativamente altas. Entre los análisis realizados, Shigley y Mitchell definieron las siguientes expresiones:

$$Para \begin{cases} T \leq 450°C \longrightarrow C_{temp} = 1 \\ 450°C < T \leq 550°C \longrightarrow C_{temp} = 1 - 0{,}0058(T - 450) \end{cases}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- **Efectos de confiabilidad** $\left(\boldsymbol{C_{conf}}\right)$**:** En cuanto a la confiabilidad, el factor de reducción se reduce conforme se opta por una mayor confiabilidad. Los valores de la tabla 4.14 proporcionan factores C_{conf} según el porcentaje de confiabilidad requerida. Los análisis realizados en este informe utilizaran un porcentaje del 99% de confiabilidad.

% de confiabilidad	C_{conf}	% de confiabilidad	C_{conf}
50	1.000	99.9	0.753
90	0.897	99.99	0.702
95	0.868	99.999	0.659
99	0.814	99.9999	0.620

Tabla 4.14 Coeficientes para el factor de confiabilidad

En base a los parámetros anteriormente descritos, se puede deducir un factor de seguridad contra la fatiga:

$$N_f = \frac{S_f(S_{ut} - S_{Fi})}{S_f\left(S_{p\,med} - S_{Fi}\right) + S_{ut}\,S_{p\,alt}} \qquad ec.27$$

En caso de las cargas dinámicas, además del factor de seguridad contra la fatiga, se deben agregar los factores contra la separación y fluencia, los cuales siguen el mismo procedimiento de cálculo descrito anteriormente en el análisis de las uniones sometidas a cargas estáticas.

4.3.5 Estimación del torque de apriete

Uno de los factores más importantes que determinan la calidad de la unión es el grado de apriete inicial dado al perno. Esta fuerza de cierre se logra a través del torque que se aplica sobre la tuerca cuando esta gira en torno al eje del perno, de este modo que al avanzar se bloqueara sobre las bridas a unir, si el giro continuo producirá el estiramiento del perno como si fuera un resorte. El perno en esta condición se mantendrá en un estado de tensión permanente, que aumentara conforme avanza el giro de la tuerca con lo cual se genera la compresión, si en esta acción no existiese fricción al girar la tuerca, la única resistencia seria la deformación elástica, sin embargo esta situación responde a una condición ideal,

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

ya que en las uniones apernadas se generan fuertes fricciones entre la tuerca y la superficie de la brida como también en los hilos de la unión entre perno y tuerca.

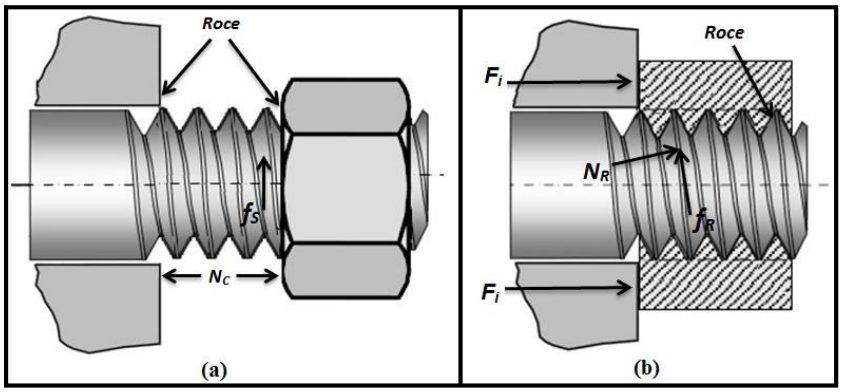


Figura 4.11 Resistencia entre cara de tuerca y brida (a) y resistencia entre perno y tuerca (b)

Las resistencias debido a la fricción son mayores que las resistencias a la deformación elástica que se generan con cada fracción de giro, por lo tanto, resulta importante considerar su implicación y control en el momento de aplicar un torque. Para determinar el valor del torque requerido para lograr el cierre adecuado, se debe realizar un análisis combinado que involucre la resistencia por fricción y la carga axial neta sobre el perno.

4.3.5.1 Resistencia al movimiento entre tuerca y la brida

La figura 4.11(a) muestra las fuerzas involucradas cuando se analiza las resistencias generadas entre la cara de la tuerca y la superficie de la brida. En este caso, el torque a aplicar para que la fuerza normal generada $(N_c = F_i)$ llegue al valor de montaje requerido será entonces:

$$T_S = f_S \left(\frac{d_{mS}}{2}\right) = \mu_S F_i \left(\frac{d_{mS}}{2}\right)$$

En la ecuación 28, se identifica μ_S como el coeficiente de fricción entre las superficies en contacto y d_{mS} es el diámetro medio de la cara de apoyo de la tuerca.

$$\therefore \quad T_S = \mu_S F_i \left(\frac{d_{mS}}{2}\right) \qquad ec.28$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3.5.2 Resistencia al movimiento entre hilos de la unión roscada

El torque por el concepto de fricción existente entre los flancos de los hilos, puede deducirse a partir de la figura 4.11(b), siguiendo el mismo procedimiento descrito en el punto 4.3.6.1, sin embargo, en este caso la presión por unidad de área de contacto entre las superficies es bastante más baja y se distribuye en forma decreciente a partir del primer filete y a lo largo de toda la longitud de contacto. Los valores máximos y mínimos que se alcancen dependen exclusivamente del alto de la tuerca para un cierto paso del hilo dado, por lo tanto, la fuerza de fricción en los flancos también es decreciente a partir del primer filete, pero sumadas las fricciones a resistencia que oponen cada vuelta de la rosca, se tiene lo siguiente:

$$T_R = f_R \left(\frac{d_{mR}}{2}\right) = \mu_R N_R \left(\frac{d_{mR}}{2}\right) \qquad ec.29$$

En la ecuación 29, μ_R es el coeficiente de fricción entre los flancos del hilo (roscado entre el perno y la tuerca), mientras d_{mR} es el diámetro medio de la rosca. Por otro lado, la fuerza normal N_R sobre la superficie de los flancos depende del tipo de rosca, para verificar si su paso es fino o grueso y ángulos respectivos. En términos generales N_R se puede expresar de la siguiente forma:

$$N_R = \frac{F_i}{\cos(\beta/2)\ \cos(\alpha)} \quad Donde \begin{cases} \alpha = Angulo\ de\ avance \\ \beta = Angulo\ de\ flanco \end{cases}$$

$$\therefore\ T_R = \frac{\mu_R F_i}{\cos(\beta/2)\ \cos(\alpha)} \left(\frac{d_{mR}}{2}\right)$$

Combinando ambos torques ($T_S\ y\ T_R$) se obtiene un torque resistente total:

$$T_i = T_S + T_R = \frac{\mu_R F_i}{\cos(\beta/2)\ \cos(\alpha)} \left(\frac{d_{mR}}{2}\right) + \mu_S F_i \left(\frac{d_{mS}}{2}\right)$$

Para efectos de análisis, si se asume que d_{mR} se aproxima al diámetro nominal del perno (d_e) y d_{mS} se deduce como el diámetro promedio del perno y un tamaño de tuerca de 1.5d, se tiene:

$$T_i = \frac{\mu_R F_i}{\cos(\beta/2)\ \cos(\alpha)} \left(\frac{d_e}{2}\right) + \mu_S F_i \left(\frac{(1+1{,}5)d_e}{4}\right)$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Si se resuelve y factoriza por F_i y d, resulta la siguiente expresión:

$$T_i = F_i\, d_e \left(\frac{0{,}5\, \mu_R}{\cos(\beta/2)\, \cos(\alpha)} + 0{,}625\, \mu_S \right) = F_i\, d_e\, K_i$$

De la expresión anterior se desprende el coeficiente de torque "K_i". Este valor se analizará en el siguiente punto referente a la lubricación y su incidencia en el torque.

$$\therefore T_i = F_i\, d_e\, K_i \qquad ec.30$$

4.3.5.3 Lubricación y coeficiente de torque

La fricción es determinante cuando el par de apriete es utilizado como una forma de controlar la tensión aplicada en una unión apernada. Se estima que, en ausencia de un lubricante adecuado, se puede perder hasta el 50% del torque aplicado intentando vencer la fricción, por lo tanto, entre más alta sea la fricción, menor será la conversión del torque en precarga.

Si se analizan el efecto de la lubricación sobre la cara de la tuerca, este resulta prácticamente anulado por la alta presión de contacto presente, generando un roce metálico directo entre las superficies, de tal modo que la real disminución de la resistencia por fricción se encuentra efectivamente en la zona del contacto entre hilos. Si se asume un coeficiente de fricción igual para el roce tuerca-brida y perno-tuerca y se calculan los coeficientes de torque para pernos estándar de distintos diámetros y tipos de hilo; los resultados varían muy poco, obteniendo 0.2 como valor medio de referencia. Sin embargo, esta magnitud puede variar considerablemente si se analiza la condición del sistema, el cual puede incrementarse hasta 0.3 en caso de ser un sistema sin lubricar o reducirse a 0.16 cuando se usan lubricantes con bajo coeficiente de fricción. En base a lo anterior, el torque de apriete puede definirse de la siguiente forma para diferentes condiciones de lubricación.

$$T = \begin{cases} 0.16\ F_i\ d_e & \Longrightarrow\ Sistema\ lubricado \\ 0.2\ F_i\ d_e & \Longrightarrow\ Sistema\ lubricado\ (estandar) \\ 0.3\ F_i\ d_e & \Longrightarrow\ Sistema\ sin\ lubricar \end{cases}$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.3.6 Método de cálculo ASME

En el código ASME se describen ciertos criterios de cálculo utilizados para lograr un sellamiento estático satisfactorio en uniones industriales. Este procedimiento de cálculo no es obligatorio, ni absoluto, pero si constituyen una alternativa válida para estimar por medio de factores definidos en base a ensayos y aplicaciones prácticas, la fuerza de sellado y aplastamiento inicial que permiten determinar si la empaquetadura será capaz de compensar los defectos superficiales presentes en las bridas, sin ser destruida por un apriete excesivo.

El código ASME en el apéndice II del capítulo 8, solicita el cálculo de la unión bridada para dos condiciones diferentes: operación y asentamiento de la empaquetadura.

4.3.6.1 Condiciones de operación

Mediante esta condición se determina la carga mínima requerida por los pernos para mantener la unión durante la operación, considerando la presión de prueba a los cuales el equipo podría estar sometido y el diámetro de los puntos donde se aplica la resultante de la fuerza de reacción sobre la empaquetadura, además del ancho efectivo y el factor “m” de la empaquetadura definido según la norma ASME, contenidos en la tabla 4.15 del Anexo B. La ecuación 31 establece que la carga en los pernos debe ser adecuada para mantener una presión residual sobre la empaquetadura, que siempre se encuentre por sobre la presión interna del fluido.

$$W_{m1} = \left(\frac{\pi\, G^2\, P}{4}\right) + 2\, b\, \pi\, m\, P \quad \begin{cases} G = Diametro\ de\ las\ reacciones\ del\ empaque \\ P = Presion\ de\ prueba \\ b = Ancho\ efectivo\ de\ la\ empaquetadura \\ m = Factor\ de\ la\ empaquetadura \end{cases} \qquad ec.31$$

4.3.6.2 Condiciones de asentamiento de la empaquetadura

Esta condición define la carga mínima requerida para lograr un correcto asentamiento y compresión de la empaquetadura (W_{m2}), sin considerar la presión

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

de trabajo y utilizando el factor “y” que determina la presión mínima de aplastamiento definido por cada tipo de empaquetadura, contenidos en la tabla 4.15 del Anexo B.

$$W_{m2} = \pi\, b\, G\, y \quad \begin{cases} b = Ancho\ efectivo\ de\ la\ empaquetadura \\ G = Diametro\ de\ las\ reacciones\ del\ empaque \\ y = Presion\ minima\ de\ aplastamiento \end{cases} \qquad ec.32$$

Para ambas condiciones es necesario calcular el área efectiva de la empaquetadura, para ello se utiliza el siguiente criterio:

$$b \begin{cases} b_0 & si\ b_0 \leq 6{,}4\ mm\ (1/4") \\ 0{,}5\ (b_0)^{0{,}5} & si\ b_0 > 6{,}4\ mm\ (1/4") \end{cases} \qquad ec.33$$

La dimensión b_0 se identifica como el ancho básico del aplastamiento y es definido por la geometría de la unión bridada. Las diferentes configuraciones de los perfiles de las superficies de sellado que permiten obtener b_0 se encuentran definidos en la tabla 4.16 del anexo B.

4.3.6.3 Torque mínimo de apriete

La carga mayor entre W_{m1} y W_{m2}, se denomina W_m y es la que predomina sobre el ensamble, por lo tanto, se debe considerar como válida para calcular el torque adecuado, reemplazando en la ecuación 30 la carga F_i por $W_m{}'$ que correspondería a W_m dividida en por el número de pernos (np), para obtener la carga distribuida en cada perno, de este modo resultaría la siguiente expresión:

$$\therefore\ T_{min} = K_i\, W_m'\, d_e = K_i\, \frac{W_m}{np}\, d_e \qquad ec.34$$

4.3.6.4 Torque máximo de apriete

El torque máximo recomendado por ASME, se basa en la capacidad resistiva del perno, utilizando el esfuerzo admisible a la tensión para obtener la carga máxima. En el caso de los pernos, se asume que este esfuerzo debe considerarse entre un 50 a 80% de la resistencia de la resistencia a la fluencia, lo cual corresponde a un

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

factor de seguridad de 1.25 a 2 sobre esta, para efectos de cálculo del presente estudio se asumirá un factor de seguridad de 1.5.

$$S_{adm} = \frac{Sy}{fs} \qquad ec.35 \quad Donde\ fs = factor\ de\ seguridad$$

La máxima fuerza de precarga sobre el perno (W_m'') se obtiene del producto entre el esfuerzo admisible y el área de esfuerzo del perno, mientras que el torque máximo se deduce reemplazando nuevamente en la ecuación 30 los nuevos valores calculados.

$$W_m'' = S_{adm}\ A_t$$

$$T_{max} = K_i\ W_m''\ d_e \qquad ec.36$$

4.4 Sellamiento dinámico

A nivel industrial existen variados equipos que basan su funcionamiento en sistemas rotativos que activan sus mecanismos; algunos además requieren confinar total o parcialmente fluidos de trabajo del medio ambiente, como es el caso de bombas, agitadores, molinos, válvulas, entre otros. El sellamiento de este tipo de equipos se conoce como sellamiento dinámico y su objetivo es evitar la pérdida del fluido a través de los orificios donde se sitúan los ejes rotativos que cumplen la función de transmitir movimiento.

Lograr un adecuado sellamiento de este tipo es especialmente complejo, debido a la dinámica rotatoria constante generada en el eje, sin embargo, se han creado diversas soluciones para lograr un sello efectivo. Tradicionalmente se han utilizado sellos del tipo radial mediante el sistema prensa estopa, retenes, sellos mecánicos, entre otros. Cada uno de estos sellos posee características únicas que deben ser coherentes a las condiciones de operación del equipo.

Este estudio limita el análisis de los sellos dinámicos a los equipos críticos que estén equipados solo con dispositivos prensa estopa, principalmente se trata de bombas utilizadas para el transporte de agua a diferentes temperaturas, además de alimentadores de licores y materia prima.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.4.1 Sistema de sellamiento por prensa estopa

El sistema de sellamiento prensa estopa basa su funcionamiento en el principio de fugas controladas, por lo tanto, su objetivo no es suprimir totalmente las fugas, sino que generar un escurrimiento o goteo controlado. El sello se compone básicamente de un sello radial compuesto de anillos de empaquetadura de sección cuadrada dispuestos dentro de la caja de sellado y comprimidos por una brida de apriete que puede ajustarse en dirección axial, situándose entre una presión mecánica desde el exterior y una presión hidráulica del fluido de trabajo desde el interior del equipo, de este modo la estructura genera un espacio entre el diámetro interno de la empaquetadura y el eje o la camisa de este, el cual se llena mediante recirculación con el mismo fluido de trabajo o bien con un producto externo que cumpla las funciones de lubricar y refrigerar la zona de empaque.

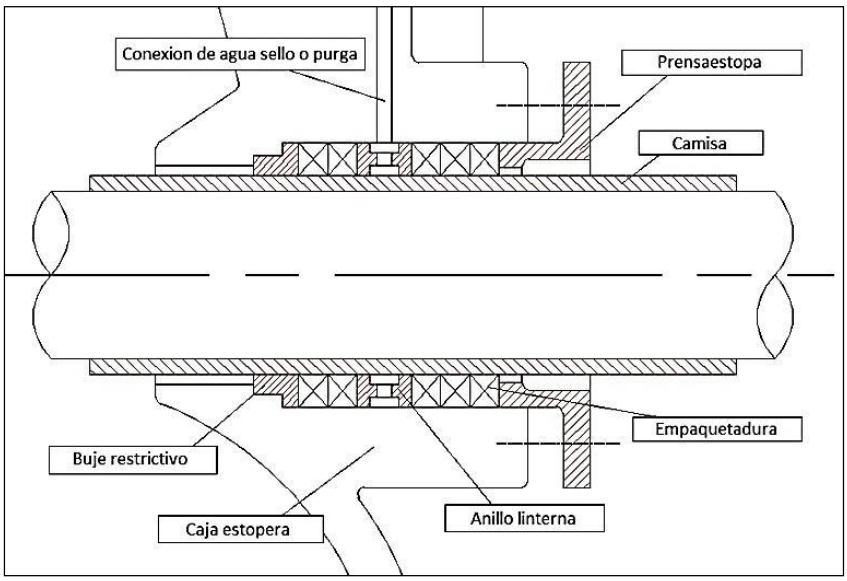


Figura 4.12: Estructura general de sellamiento por prensa estopa

La estructura básica de la prensa estopa se representa en la figura 4.12 y está compuesta por la caja de sellamiento o estopera, anillo de cierre hidráulico o linterna, prensa estopa de ajuste y empaquetadura. En los siguientes puntos se describe cada uno de estos componentes.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.4.1.1 Caja de sellamiento

En general una caja de sellamiento convencional o estopero posee una forma cilíndrica para alojar los anillos de empaque alrededor del eje o camisa. En este compartimiento ocurre la transición del eje desde el interior al exterior del equipo, por lo tanto, representa la sección donde se ubica el sistema de sello. Si el equipo opera bajo una condición de succión sobre el fluido, la presión al interior del extremo de la caja se mantendrá por debajo de la presión atmosférica o vacío, en este caso la función de la caja y los componentes alojados en ella, será prevenir el ingreso de aire al sistema, mientras que, si la presión es superior a la atmosférica, la función será evitar cualquier fuga del fluido hacia el exterior.

4.4.1.2 Anillo linterna

El anillo linterna es un sello de cierre hidráulico confeccionado generalmente a partir de acero inoxidable u otros materiales resistentes a la corrosión. Este elemento funciona como una jaula de sellado que permite el ingreso de algún fluido de sello a una presión específica que siempre debe mantenerse 1 o 2 bar sobre la presión de la caja de sello o estopero, generando un flujo barrido en dirección axial que lubrica y refrigera el eje y las empaquetaduras.

Los anillos linterna son seccionados para facilitar su ensamble y pueden ser dispuestos en varias posiciones dependiendo de las características del equipo y fluido de trabajo, por ejemplo si este último es agua relativamente limpia y a temperatura ambiente, se puede recurrir a una conexión directa entre la descarga del equipo y la caja de sellamiento, sin embargo cuando el fluido de trabajo está operando a temperaturas superiores o se trata de sustancias que pueden degradar la empaquetadura, se debe optar necesariamente por un suministro de fluido de sello independiente. Por otro lado la posición del anillo linterna cobra gran relevancia si se analiza las características del fluido de trabajo, para servicios donde el medio contiene sustancias abrasivas, la localización del anillo debería ser en el extremo interno de la caja de sellamiento, o sea lo más cercana posible al fluido confinado, ya que así se lograra desviar una gran parte del fluido de sello

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

hacia el interior del equipo, impidiendo la acción de las partículas dentro de la caja, en caso contrario si el requerimiento es impedir el ingreso de sustancias extrañas al interior del equipo o bien reducir la disolución del fluido de trabajo por efecto del fluido de sello, se debe ubicar el anillo linterna en la sección externa de la caja.

Figura 4.13 – 14: Anillos linterna fabricados a partir de diferentes materiales

4.4.1.3 Prensa estopa

La prensa estopa es la pieza que comprime axialmente los anillos de empaquetadura dentro de la caja de sellamiento, por medio de un sistema de pernos que ajustan esta pieza. Esta prensa puede tener varias formas, pero básicamente se puede clasificar en dos grupos: prensa sólida y seccionada.

Las prensas solidas se incorporan al equipo durante la secuencia de armado y solo pueden retirarse axialmente en un espacio limitado entre caja y cojinete, mientras que las prensas seccionadas, permiten ser retiradas del eje sin necesidad de desmantelar el equipo, proporcionando así más espacio para trabajar cuando se requiere reempacar la caja.

4.4.1.4 Empaquetadura para prensa estopa

Los anillos de empaque son introducidos en los espacios anulares que se forman entre la superficie interna de la caja de sellamiento y el miembro rotativo. Los anillos en conjunto funcionan como un dispositivo reductor de presión, que se activa al apretar la prensa estopa transmitiendo la presión al juego de anillos, los cuales se expanden radialmente, produciendo de esa forma un sello estático

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

contra la caja y un sello dinámico contra la superficie del eje, además la compresión disminuye el tamaño de los poros interestructurales de la empaquetadura, reduciendo la filtración de fluido a través del empaque. Este tipo de empaquetadura es de sección cuadrada con propiedades plásticas para que durante la compresión axial pueda ajustarse adecuadamente y absorber energía de fricción, mermando el deterioro sobre el eje o camisa. El material con que se construye este tipo de empaquetaduras resulta fundamental, ya que define directamente la vida, desempeño y mantenimiento del sello.

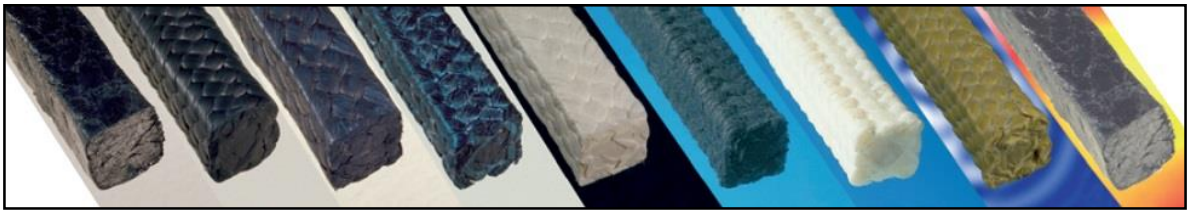


Figura 4. 15: Diferentes tipos de empaquetaduras de sección cuadrada

4.4.1.4.1 Propiedades

Para el adecuado funcionamiento de la empaquetadura de compresión, se deben considerar ciertas propiedades básicas, como elasticidad, resistencia química, tenacidad, densidad, resistencia mecánica, entre otras características dependientes fundamentalmente de su composición y construcción.

- **Elasticidad:** Esta propiedad le proporciona a la empaquetadura la capacidad de introducirla dentro de la caja de sellamiento y ser ligeramente deformada, de manera que adquiera la forma de las superficies que deben sellarse, además la elasticidad asegura que el empaque pueda recobrar la compresión radial como resultado de la deflexión del eje.
- **Resistencia química:** Esta propiedad tiene como objetivo evitar que la empaquetadura será atacada químicamente por el fluido que está siendo sellado, esta resistencia debe extenderse también al lubricante, ya que la perdida de lubricante debido al ataque químico reduce la vida útil de la empaquetadura comprimida, generando más abrasión y por ende más calor debido al aumento de la fricción sobre eje o vástago.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- **Resistencia mecánica:** Protege a la empaquetadura contra la destrucción mecánica particularmente por la rotación excéntrica que pueda experimentar el eje, presiones internas altas o por cualquier acción mecánica creada por el fluido. Un ejemplo de lo último será la cristalización y congelamiento de fluidos lo que crearía el desgaste mecánico o par de torsión excesivo sobre la empaquetadura.

El ideal de una empaquetadura conserve su volumen físico y perderlo lentamente, así la empaquetadura se mantendrá densa, pero al mismo tiempo compresible.

4.4.1.4.2 Tipos de fabricación

Las empaquetaduras a compresión se confeccionan en base a diversos materiales y mediante diversas técnicas de fabricación. La forma constructiva más utilizada es la trenzada o tejida, a pesar que se han generado empaques enrollados en espiral o por medio de extrusión. A continuación, se describen brevemente las principales técnicas de elaboración:

- **Empaquetaduras trenzadas:** Los estilos trenzados más utilizados son entretejidas en secciones cuadradas, intertrenzado, trenzado sobre trenzado y trenzada sobre núcleo. Estas responden a técnicas diferentes de construcción y cada una está diseñada específicamente para ciertas aplicaciones.
  - **Trenzado cuadrado:** Son empaquetaduras suaves, blandas y absorbentes, ideal para equipos nuevos o ligeramente desgastados. En este diseño cada hebra actúa de manera independiente, debido a que no pasan por la sección transversal de la empaquetadura. Cabe señalar que no están destinadas a válvulas de vapor u otros equipos donde altas presiones internas puedan causar la extracción del empaque.
  - **Intertrenzado:** Este diseño utiliza una forma de trenzado tridimensional, donde cada hebra pasa completamente a través de la sección transversal en un ángulo de 45°, de este modo cada nueva hebra es asegurada por la siguiente para formar una estructura integra y sólida que no se desgarrará

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

ni romperá durante el servicio. La estructura de este tipo de trenza posee una distribución más uniforme en densidad y tiene potencial para conservar lubricantes, generando una empaquetadura relativamente densa, pero a su vez flexible, lo cual asegura un adecuado contacto con el eje y transferencia de carga.

- **Trenzado sobre núcleo:** La formación de empaquetaduras trenza sobre trenza, está compuesta de una o más cubiertas tejidas una sobre otra, cada una es separada con una cubierta más pequeña trenzada alrededor de una hebra central, o bien en torno a un núcleo solido de algún material extruido. Estas empaquetaduras presentan una buena densidad y flexibilidad, además la inclusión de esquineros proporciona una empaquetadura de mayor resistencia. Este tipo de trenzas no son adecuadas para aplicaciones de alta velocidad, ya que el desgaste producto de la fricción destruirá la envoltura exterior, impidiendo su ajuste.

➢ **Empaquetaduras no trenzadas:**

- **Extruidas:** La empaquetadura fabricada mediante extrusión puede ser fabricada en varios materiales que permitan realizar este tipo de operación. Debido a sus características plásticas, los empaques resultantes de esta técnica, se adaptan bajo la carga que ejerce la prensa estopa, provocando una deformación que sella las superficies irregulares, por lo tanto, son excelentes para equipos donde el eje o camisa se encuentren en deteriorados, con la precaución de ser ubicadas junto anillos anti extrusión o empaquetaduras rígidas.
- **Plegadas en espiral:** Este tipo de empaquetaduras son usualmente fabricadas a partir de materiales metálicos enrollándose mediante pliegues en espiral con opción de incorporar un núcleo compresible, formando una estructura suficientemente rígida para soportar el eje. Cada lámina es lubricada con aceite o grafito, de modo que cada espacio entre pliegues quede saturado por el lubricante. Esta técnica provee durabilidad y gran resistencia, sin embargo, carecen de flexibilidad.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.4.1.4.3 Materiales de construcción

Las empaquetaduras de compresión son fabricadas a partir de variados materiales que sean compatibles con la aplicación donde se utilizara. Los materiales que componen una trenza son tan importantes como el proceso por el cual se fabrica, es por ello que las diferentes capacidades técnicas que poseen están determinadas básicamente por la composición de los materiales de fabricación que a su vez deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Resistencia al ataque químico
- Resistencia al calor
- Bajos coeficiente de fricción
- Alta conductividad y capacidad térmica

Como se explicó en el punto anterior, el material utilizado para construir estas empaquetaduras, depende también del proceso por el cual se confeccionan, desde materiales extruibles como teflón o grafito hasta láminas plegables metálicas como cobre, aluminio o bronce, entre otros. En el caso de las fibras comúnmente utilizadas para generar empaquetaduras trenzadas estas pueden ser de origen natural como sintético, descartándose el asbesto como la principal fibra mineral, por su impacto nocivo a la salud. Los principales materiales a base de fibras naturales son: ramio, algodón, lino, entre otros, mientras que las sintéticas que maneja el mercado actual son: vidrio, PTFE (teflón), carbono, grafito, aramídicas, acrílicas, entre otras, las cuales se pueden arreglar en diferentes combinaciones.

4.4.1.4.4 Lubricantes

En aplicaciones dinámicas, las empaquetaduras funcionan por contacto con las unidades rotatorias produciendo una fricción superficial severa, lo cual microscópicamente se traduce en un rompimiento de las crestas de rugosidad entre superficies, lo cual genera calor y partículas de desgaste, por lo tanto, los objetivos de los lubricantes apuntan a la reducción de la fricción, desgaste, calor

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

generado y evitar la herrumbre. Los lubricantes se incorporan en el momento de la fabricación y se dividen en lubricantes de sacrificio y de trabajo.

Los lubricantes de sacrificio tienen como función es proteger contra el excesivo aumento de la temperatura durante el arranque hasta que la empaquetadura logre asentarse, mientras que los lubricantes de trabajo forman parte de los componentes integrales de la empaquetadura y representan una fuente constante de lubricación, además de contribuir a la elasticidad que permite la deformación y recuperación de la empaquetadura bajo ligeras deficiencias mecánica como la flexión. En general ambos lubricantes tienen como función principal controlar la temperatura, previniendo el brusco aumento de la temperatura en la partida y reduciendo el coeficiente de roce y por ende la fricción entre empaque y superficie dinámica, además de sellar el fluido de trabajo, bloqueando el paso del medio bombeado a través de la empaquetadura cerrando los vacíos en las estructuras trenzadas.

La pérdida de lubricante se debe principalmente a la compresión mecánica, derretirse por altas temperaturas o disolverse por contaminación química por incompatibilidad con el fluido de trabajo. La pérdida de volumen de la empaquetadura ocupada por el lubricante puede ser de hasta un 40%, producto de la sucesión de reaprietes.

Los tipos de lubricantes son muy diversos, sin embargo, el grafito es el lubricante más común en empaquetaduras, ya que es inerte a la mayor parte de los productos químicos, su capacidad como lubricante se atribuye a las obleas muy delgadas que se adhieren a las superficies de contacto, pero también genera problemas como facilitar la generación de corrosión galvánica o electrolítica. Otros compuestos como el disulfuro de molibdeno y tungsteno son lubricantes resistentes a la oxidación, pero limitados por la temperatura o bien sin las cualidades lubricantes del grafito. El Politetrafluoretileno (PTFE) o teflón es un lubricante potente con un límite de temperatura de 260°C y prácticamente inerte a todos los productos químicos, es muy utilizado en las áreas de blanqueo en empresas de celulosa y papeleras donde no es posible aplicar grafito.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

4.4.2 Consideraciones generales para el sellamiento por prensa estopa

La primera consideración debe ser siempre la condición del equipo, analizando todas las características operacionales, como velocidades, presión, temperatura, tipo de fluido de trabajo, entre otras. Solo evaluando lo anterior será posible seleccionar una trenza de empaque adecuada.

La aplicación de un sello por empaquetadura tipo prensa estopa, no resulta ser tan sencilla como aparenta ser su instalación, ya que involucra experiencia y un conocimiento técnico adecuado para resolver varios detalles, como la forma de corte de la trenza, posiciones y asentamiento de cada anillo.

En cuanto al lubricante este debe ser lograr una eficiente lubricación entre empaquetadura y el eje para evitar desgastes, ralladuras, generando una bajo coeficiente de fricción, actuar como bloqueador entre las fibras para evitar el escape de fluido entre las costuras del empaque, por otro lado debe ser insoluble, compatible y contaminar el fluido de trabajo que se requiere aislar y además trabajar a la temperatura recomendada conservando sus características originales y ser durable en el tiempo considerando los prolongados tiempos de almacenamiento que puede tener la empaquetadura.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Capítulo 5: Calculo y evaluación del sellamiento por equipo

5.1 Selección de empaquetaduras

Como se analizó anteriormente, los equipos en cuestión requieren empaquetaduras en plancha y también en trenza según el tipo de sellamiento y las características propias de cada activo. En el caso del sellamiento estático las propiedades fundamentales a considerar deben ser la temperatura y la presión que experimentara la unión, mientras que los equipos rotatorios que necesitan sellamiento dinámico dependen principalmente de la velocidad periférica. En ambos casos la resistencia química debe ser el primer punto de análisis, ya que algunos fluidos de trabajo del área de fibra son del tipo alcalino que forman bases fuertes, los cuales aún en bajas concentraciones resultan ser bastante corrosivos.

5.2 Equipos estáticos y selección de empaquetaduras planas

Las opciones para seleccionar una empaquetadura adecuada pueden ser muy diversas para un mismo caso, por esta misma razón es también común encontrar similitudes entre productos. En el caso de los equipos estáticos, se requiere principalmente del sellamiento de las escotillas de inspección en los estanques y la unión de las bridas en el caso de las válvulas. En base a la información recopilada en el capítulo 4, respecto a los materiales y tipos de sello, se definirán las opciones más recomendables para cada unión.

5.2.1 Selección de material de fabricación

El primer paso para evaluar el tipo de empaquetadura más adecuado para sellar un fluido es escoger el material. Esta elección se basa en las características de fluido de trabajo que se debe confinar y considerar el entorno del sistema o equipo, ya que algunos materiales son susceptibles a las condiciones desfavorables que en ocasiones presenta la intemperie. El principal parámetro de análisis es el pH del fluido, ya que es el indicador más relevante para definir la resistencia del material frente al desgaste químico. A continuación, se presentan

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

los fluidos de trabajo presentes en los equipos críticos del área fibra 2 del complejo Arauco y las opciones disponibles de materiales para su sellamiento.

Fluido de trabajo	pH	Materiales disponibles
Licor negro	13	Acero inoxidable 304/316L con relleno de grafito, Fibras de carbón con nitrilo.
Licor blanco	13	Acero inoxidable 304/316L con relleno de grafito, Fibras de carbón con nitrilo.
Vapor de alta presión	7	Acero inoxidable 304/316L con relleno de grafito, PTFE reforzado con sulfato de bario.
Vapor de media y baja presión	7	Acero inoxidable 304/316L con relleno de grafito, PTFE reforzado con sulfato de bario.
Agua caliente y tibia	7	PTFE reforzado con sulfato de bario.
Condensados	9	PTFE reforzado con sulfato de bario.
CNCG	9	Fibra de carbón con nitrilo, PTFE reforzado con sulfato de bario.

Tabla 5.1: Materiales disponibles para empaquetaduras según el fluido de trabajo

5.2.2 Selección del tipo de empaquetadura

Para escoger el tipo de empaquetadura, el complejo Arauco ha establecido un estándar de alternativas a utilizar en base al material más conveniente para sellar los fluidos de trabajo en equipos estáticos. Entre los principales productores de empaques que abastecen a planta, destacan Chesterton y Garlock como empresas certificadas, sin embargo en el mercado actual existen otras opciones que cumplen con el mismo estándar de calidad y pueden resultar alternativas confiables; por lo tanto solo para presentar las especificaciones técnicas de cada empaquetadura se ha optado por estas dos empresas, teniendo en cuenta que entre empresas fabricantes existen diferentes modelos que son equivalentes entre sí, respecto a sus capacidades de sellamiento. La descripción técnica de cada empaquetadura está contenida en los anexos C.1 y C.2.

En cuanto a la elección de la empaquetadura correcta para los equipos estáticos, no solo se debe considerar la resistencia química adecuada del material respecto al fluido de trabajo, sino que además se requiere considerar el tipo de brida, calidad superficial y las principales condiciones de operación (temperatura y presión). Para evaluar la calidad superficial, existen parámetros establecidos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

(capítulo 4.3.2.2) que indican la rugosidad para cada tipo de empaquetadura y el espesor más adecuado, sin embargo, en el presente estudio no es posible medir la rugosidad en las caras de sello ya que los equipos se encuentran en servicio, pero basados en observaciones del personal de planta, se puede asumir que las superficies poseen acabados superficiales aceptables con un desgaste moderado.

Por otro lado, para deducir el módulo de elasticidad se utilizan los porcentajes de compresibilidad de cada empaquetadura resultantes de las pruebas realizadas bajo condiciones controladas del método ASTM-F36, (ver anexo C1 y C2), de donde se obtiene la deformación del material $(\delta = L * \%\, compresibilidad\ mayor)$ sobre un espesor inicial de referencia $(L = 1/8")$ sometido a una presión definida por la prueba $(P = 5000\ psi)$ y considerando la ecuación 4, se tiene:

$$\frac{F}{A} = E\frac{\delta}{L} \Rightarrow E = \frac{F\ L}{A\ \delta} \Rightarrow E = \frac{P\ L}{\delta}$$

5.2.2.1 Selección de empaquetaduras no metálicas

Las empaquetaduras no metálicas, son básicamente láminas planas comprimidas y troquelas, fabricadas generalmente a partir de materiales elastoméricos y fibras con propiedades de resistencia química, temperatura y presión.

Las empaquetaduras seleccionadas se verifican mediante sus respectivas características técnicas, para ello el factor de servicio PxT es un buen indicador que simplifica esta comprobación. Este factor se obtiene del producto entre los valores máximos de presión y temperatura que cada empaquetadura pueda soportar sin perder su capacidad sellante.

La norma ASME B16.5, establece que el límite máximo para optar por un sello no metálico es de 25000 (°C x bar), si este valor es superado se debería utilizar una empaquetadura semi-metálica o metálica. En el caso de los equipos críticos sometidos a análisis, los mayores valores PxT se presenta en las válvulas manuales con 10320 (°C x bar), valor que no sobrepasa el límite máximo que en promedio pueden soportar las empaquetaduras comprimidas no metálicas, sin embargo, las condiciones críticas que experimentan específicamente las válvulas

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

manuales requieren del uso de empaquetaduras del tipo semi-metálicas para sellar sus bridas.

5.2.2.2 Selección de empaquetaduras semi-metálicas

Como se mencionó anteriormente, las empaquetaduras semi-metálicas son seleccionadas para sellar las bridas de válvulas manuales, debido al funcionamiento propio de este tipo de equipos, donde el cierre y apertura repentino origina golpes de ariete que culminan en cambios drásticos de presión y temperatura que deforman las líneas que transportan los licores, generando cargas variables que fatigan los materiales.

Los principales tipos de empaquetaduras semi-metálicas son: Steel Trap, Camprofile y espirometálicas; estos sellos son de alto rendimiento, sin embargo, las primeras dos empaquetaduras están destinadas a aplicaciones específicas, por lo tanto, implican un costo superior, mientras que la tercera opción es habitualmente utilizada con excelentes resultados en el sellamiento de bridas industriales. Las empaquetaduras espirometálicas están fabricadas mediante el enrollado en espiral de una cinta metálica preformada en “V” combinado con un material de relleno, el metal proporciona la solidez y la elasticidad necesarias, mientras que el relleno garantiza la estanqueidad del sello.

Los fluidos de trabajo de las válvulas criticas es licor negro y blanco, por lo tanto, el material metálico a utilizar debe ser acero inoxidable 304/316L, idealmente con relleno de grafito que garantiza la resistencia a altas temperaturas. En base a lo anterior se definen las principales empaquetaduras disponibles.

Materiales	Empaquetaduras		
	Tipo	Modelo de fabrica	
		Chesterton	Garlock
Acero inoxidable 304/316L con grafito	Espirometálica	E-252 CGI	Flexseal RWI
Fibras de carbón con nitrilo	Plancha no metálica	E-457	HTC 9850
PTFE reforzado con sulfato de bario	Plancha no metálica	ECS-W	Gylon 3591

Tabla 5.2: Modelos de empaquetaduras según material y tipo requerido

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

5.3 Equipos rotatorios y selección de empaquetaduras

La selección de empaquetaduras en trenza utilizadas en equipos rotatorios debe considerar el tipo de fabricación y la resistencia y propiedades de los materiales utilizados en esta, además de las condiciones operacionales como presión y velocidad superficial.

5.3.1 Selección del material de fabricación

Al igual que la selección en los equipos estáticos, el principal parámetro es la resistencia química que posee el material de fabricación de la trenza, de este modo se asegura que la empaquetadura será suficientemente fuerte para no sufrir degradaciones prematuras a causa de un posible ataque químico por parte del fluido a confinar.

La tabla 5.3 indica los distintos fluidos de trabajo y las alternativas de materiales que son compatibles su pH; cabe señalar que es muy complejo abarcar la gran variedad de combinaciones de materiales para la formación de las trenzas, por lo tanto, solo se consideraran los principales materiales de las empaquetaduras que se utilizan habitualmente en planta.

Fluido de trabajo a sellar	pH	Materiales disponibles
Licor negro	13	Fibras de carbono y grafito
Licor blanco	13	Fibras de carbono y grafito
Vapor de media y baja presión	7	Fibras de PTFE y grafito
Agua: caliente, tibia y de sello	7	Fibras de PTFE y grafito

Tabla 5.3: Materiales disponibles para empaquetaduras en trenza según fluido

5.3.2 Consideración de presión, temperatura y velocidad superficial.

En listado de equipos que requieren de prensa estopa está contenido en la tabla 2P del anexo C, allí se indican las principales características como temperatura máxima de trabajo, presión de diseño, dimensiones del eje a sellar y la velocidad superficial, este último parámetro se calcula de la siguiente forma:

$$Vs\ (m/s) = \frac{diametro\ eje\ (mm) \times RPM}{18750} \qquad ec.37$$

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Entre los equipos rotatorios hay una notoria diferencia respecto a los parámetros operacionales, la cual divide este grupo en dos facciones. La primera se trata de bombas que solo transportan agua a diferentes temperaturas que no sobrepasan los 80°C y trabajan a presiones máximas de 20 bar, pero con velocidades superficiales de 5 a 6 m/s, mientras que los equipos restantes son principalmente transportadores de fluidos de gran envergadura, que transportan materias primas como mezclas de astillas y distintos licores a temperaturas máximas de 200°C y presiones de diseño de hasta 25 bar, sin embargo como son equipos de gran carga sus velocidades superficiales no superan los 0.5 m/s. En base a esta información y utilizando como referencia a empresas que habitualmente distribuyen este tipo de empaquetaduras en planta, se seleccionan las trenzas que mejor cumplen con los requerimientos solicitados.

Materiales	**Empaquetaduras en trenza**			
	Tipo	**Modelo de fabrica**		
		ICP	**Garlock**	**Sinsef**
Fibras de carbono y grafito	intertrenzada	912	Estilo 98	-
Fibras de PTFE y grafito	intertrenzada	916	-	PG 101 T

Tabla 5.4: Modelos de empaquetaduras en trenza requeridas para sellos prensa estopa

Las especificaciones de las empaquetaduras de la tabla 5.4 están contenidas en el anexo C.3. En cuanto a los perfiles cuadrados de cada trenza, estos se mantienen de acuerdo a las dimensiones de diseño del equipo, sin embargo, el espesor de la empaquetadura puede estimarse de la siguiente forma:

$$Espesor\ de\ la\ trenza = \frac{(\emptyset\ int.del\ estopero) - (\emptyset ext.del\ eje)}{2} \qquad ec.38$$

En caso que el espesor resultante no coincida precisamente con la medida de la empaquetadura, se debe utilizar la siguiente mayor. Por otro lado, el perfil también podría ser aumentado en beneficio del sellamiento por un desgaste excesivo de la caja o la camisa y la imposibilidad de cambiar o reparar las piezas de inmediato.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

5.4 Calculo de precarga y torque para los equipos estáticos

En base a lo visto anteriormente respecto al método analítico se entiende que al asumir un porcentaje de la carga de prueba permitida en el perno se determina la precarga a utilizar, que a su vez definirá los factores de seguridad y torque necesario, los cuales deben mantenerse dentro de ciertos rangos que incluyen los resultados obtenidos del código ASME que se detallan a continuación:

- El porcentaje de carga de prueba del perno no debe exceder el 75% en caso de estar sometidos a cargas estáticas y 90% si son dinámicas.
- La fuerza mínima de precarga se asume como la fuerza de precarga de equilibrio, mientras que la máxima es la obtenida teóricamente por los porcentajes de carga de prueba.
- Los factores de seguridad contra la separación, fluencia y fatiga deben ser siempre mayores a 1, de este modo se mantendrán las razones de cálculo con los porcentajes máximos bajo los limites permitido.
- El torque obtenido debe mantenerse dentro del rango sugerido por el fabricante de la empaquetadura, ya que se trata del elemento de sello más vulnerable dentro de la unión, por lo tanto, es susceptible a sobre apriete o en caso contrario no alcanzar con la presión mínima de asentamiento. Cada fabricante de empaquetaduras maneja sus propios parámetros de torques recomendados, sin embargo, estos se encuentran dentro de ciertos parámetros establecidos, según el tipo de empaquetadura a utilizar. La información respecto a los torques recomendados por el fabricante se describe en las tablas 4.14 y 4.15 del anexo B.
- El torque debe permanecer en los límites obtenidos tras aplicar el método recomendado por el código ASME.

La precarga y torque deben cumplir con todas las condiciones descritas anteriormente, en caso contrario no se puede asegurar la seguridad de sus componentes, ni su capacidad de sellamiento. El desarrollo de la metodología de cálculo que se utilizó para evaluar el sellamiento de las uniones bridadas (escotillas de inspección y válvulas) en equipos sometidos a cargas estáticas y

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

dinámicas, se encuentra contenida en las planillas de cálculo N°1 y N°2 del anexo D, respectivamente; en la primera se detalla a modo de ejemplo el análisis del estanque de agua caliente (241-22100), mientras que la segunda corresponde al estanque flash N°1 (241-23059). Cabe señalar que, en el caso de las válvulas al ser equipos presurizados y expuestos constantemente a cargas dinámicas, se debe utilizar como referencia la planilla de cálculo N°2, considerando el diámetro de la línea unida a la válvula para deducir la superficie sometida a presión, además de suprimir la presión que ejerce la altura de columna del fluido, sin embargo, esto se compensa al asumir la presión de prueba como referencia para desarrollar los cálculos.

Los torques recomendados están tabulados en la tabla 1P del anexo C, mientras que el detalle de la obtención de cada uno de estos se encuentra en la planilla del archivo Excel “Equipos críticos_Sellamiento estático y dinámico”.

5.5 Procedimiento de apertura y cierre de equipos estáticos

Para conseguir un sellado satisfactorio, es necesario que ciertos procedimientos básicos sean seguidos en la instalación. Para cualquier tipo de juntas planas, estos procedimientos son de fundamental importancia para que la apertura, montaje, prueba y operación se lleven a cabo de manera satisfactoria.

5.5.1 Equipos y herramientas necesarias

- Elementos de protección personal (EPP)
- Juego de dados milimétricos y/o pulgadas
- Juego de llaves de impacto
- Llave dinamométrica o de torque
- Pie de metro
- Papel de lija
- Lubricante para pernos compatible con el ambiente.
- Aceites o productos anti-aferramiento

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

5.5.2 Descripción de la actividad

1) Previo inicio de la operación se deben contemplar todas las medidas de seguridad relacionadas con el equipo y la ejecución de la actividad, determinando las características del fluido de trabajo, aislación, drenaje y bloqueos requeridos, además de desarrollar el protocolo de seguridad correspondiente, evaluando el entorno y los riesgos asociados, mediante la documentación de seguridad respectiva utilizada en planta: Pare, Piense y Actué (PPA) y Permiso de Trabajo Critico (PTC).

2) Una vez aprobada la actividad en terreno, se procede a aflojar la brida, soltando dos pernos inferiores, de modo que todos los remanentes del fluido contenido sean evacuados de forma completa, luego se prosigue soltando los pernos superiores opuestos a los anteriores de manera cruzada (4 en total), reemplazando cada uno por espárragos que deben ser asegurados con tuercas, para evitar cualquier desprendimiento interno de material remanente empuje repentinamente tapa de la escotilla.
   Cabe señalar que para aflojar los pernos de requiere de un torque mayor que el aplicado durante el apriete, producto de las deformaciones y corrosión las roscas del perno y la tuerca. El torque de aflojamiento o rompimiento no puede calcularse exactamente, pero se estima que sería de 2.5 veces el torque de apriete; por lo tanto, para esta operación se recomienda aplicar productos penetrantes anti-aferramiento.

3) Una vez asegurada la unión, se prosigue a soltar y remover los pernos restantes, para finalizar con la extracción de los cuatro espárragos instalados anteriormente.

4) Retirar la empaquetadura y limpiar la superficie de asentamiento, verificando la existencia de marcas como ralladuras, surcos o puntos de corrosión. Las marcas radiales producto de herramientas son prácticamente imposibles de sellar, por lo tanto, se debe confirmar que el acabado superficial sea el adecuado para el tipo de empaque a usar.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 5.1: Desgaste de superficies, tras la apertura de una escotilla de inspección

5) Verificar si el material de la nueva empaquetadura es el especificado para la aplicación, de existir defectos o daños durante el transporte, se debe cambiar obligatoriamente.

6) Inspeccionar y limpiar los pernos, tuercas y arandelas, confirmando que el estado y la calidad de los elementos de sujeción es la adecuada.

7) Lubricar los hilos de cada perno al igual que las caras de contacto de las tuercas. El montaje no puede ser iniciado sin esta lubricación, ya que de este modo no se desperdicia energía del torque con la fricción provocada durante el apriete y además se facilita el futuro desmontaje.

8) Instalar empaquetadura sobre el calce de asentamiento. En bridas con caras realzadas o planas de instalación vertical, se sugiere colocar inicialmente algunos pernos de la parte inferior para centrar la empaquetadura de mejor manera, luego iniciar inmediatamente la secuencia de apriete correspondiente.

   En el caso de bridas tipo macho-hembra o de lengüeta y ranura, la empaquetadura debe ser centrada en el alojamiento, en caso de bridas verticales es posible utilizar cinta adhesiva para mantenerla en posición correcta hasta cumplir el apriete, siempre procurando que el adhesivo no deteriore la empaquetadura.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

9) Instalar los pernos y ajustar manualmente hasta que topen las superficies, de acuerdo a la secuencia de apriete correspondiente (Anexo C.4), se recomienda marcar y numerar la secuencia para facilitar el seguimiento del orden de apriete.

10) Apretar los pernos hasta aproximadamente el 30% del torque final, siempre siguiendo el orden de apriete, en caso contrario las bridas pueden quedar desalineadas, imposibilitando conseguir el paralelismo necesario para el correcto asentamiento de la empaquetadura.

11) Repetir el paso 10, elevando el torque a un 60% del valor final, en una segunda ronda de apriete.

12) Repetir el paso 10, elevando el torque al valor total recomendado (100%), en una tercera ronda de apriete.

13) Aplicar un apriete final en sentido horario a partir del primer perno, conservando el valor de torque del paso 12, de esta forma se confirma que el torque final ha sido aplicado satisfactoriamente.

14) Todos los tipos de empaquetaduras presentan relajamiento después de su instalación, por lo tanto, es recomendable un reapriete extra, especialmente en equipos sometidos a presiones con ciclos térmicos, altas temperaturas o presiones elevadas, sin embargo, esta práctica no debe aplicarse en empaquetaduras de láminas comprimidas sintéticas.

15) Aplicar el listado de comprobación o checklist, para evitar la omisión de algún punto en el procedimiento de trabajo o una incorrecta ejecución de la aplicación del mismo. El formato y detalle de este chequeo está contenido en el anexo C.5.1.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figuras 5.2 – 5.3: Sellamiento de escotilla de inspección.

5.5.3 Principales problemas del sellamiento estático

El primer paso para evaluar un sellamiento estático empaquetado es realizar una revisión externa completa, ya que es imposible tomar conocimiento de lo que ocurre al interior de sello. La tabla 4.1 describe los principales problemas que pueden ser detectados tras una exhaustiva inspección visual en los sellamientos de las uniones bridadas de los quipos estáticos.

Problema detectado	Posible causa	Solución
Daños mecánicos en la empaquetadura.	Posible defecto debido a un mal calce por incompatibilidad de medidas.	Comprobar con anterioridad las dimensiones del empaque por diseño o en efecto comprobar si existió algún posible rediseño de las bridas en cuestión. Si las dimensiones concuerdan asegurar que la instalación de la empaquetadura debe estar totalmente centrada.
Empaquetadura más delgada en su diámetro exterior que en el interior.	Este es un síntoma que indica una excesiva rotación de la brida.	Una forma de minimizar el momento de flexión en la brida es modificar las dimensiones de la empaquetadura, para que esta se ubique más cerca de los pernos. Otra alternativa es rigidizar la brida, utilizando arandelas extra en cada perno o bien utilizar un material más blando para el empaque y si es posible reducir su área, de este modo se reduce la tensión en el asentamiento.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Empaquetadura extruida	Material de la empaquetadura es inadecuado para la aplicación.	Revisar las propiedades del material de la empaquetadura y de ser necesario reemplazar por un material más denso con mejores propiedades de flujo en frio y capacidad de carga.
Pernos y/o empaquetadura presentan corrosión	Material de los elementos de sujeción o de la empaquetadura son inadecuados para la aplicación.	Revisar las propiedades de los materiales de la empaquetadura y pernos, comprobando si son aptos para el medio de trabajo, en caso de incompatibilidad, sustituir por materiales con mejor resistencia a la corrosión.
Compresión desigual de la empaquetadura	Síntoma de un procedimiento de torque inadecuado.	Asegurar que se cumplan y respeten las secuencias de torque, para mantener un apriete uniforme.

Tabla 5.1. Problemas, causas y soluciones para uniones empaquetadas en equipos estáticos.

5.6 Procedimiento de retiro e instalación de prensa estopa

La aplicación de este tipo de sellamiento no implica el uso de herramientas sofisticadas o técnicas complejas de montaje, sin embargo requiere del cumplimiento estricto de ciertas condiciones técnicas que terminaran por definir la efectividad de la empaquetadura, ignorando si la elección de la trenza fue adecuada, por lo tanto establecer un procedimiento para el retiro e instalación de empaquetaduras del tipo prensa estopa es fundamental, permitiendo controlar efectivamente cada etapa del sellamiento de equipos rotatorios para asegurar el óptimo funcionamiento del equipo.

5.6.1 Equipos y herramientas

- EPP específicos
- Juego de llaves punta corona milimétricas y/o pulgadas
- Extractores flexibles para retiro de empaquetaduras
- Pie de metro
- Barra o eje modelo para corte
- Limpiador disolvente desengrasante

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

- Herramientas de corte para empaquetaduras
- Herramientas de apisonamiento

5.6.2 Descripción de la actividad

La secuencia de este procedimiento es una guía de pasos que deben considerarse para lograr una instalación satisfactoria de la empaquetadura. La metodología se divide en tres fases que comienzan con el protocolo de seguridad, seguido por las consideraciones técnicas para extraer y preparar la empaquetadura y finalmente la instalación del sello.

1) Antes de comenzar con la actividad en terreno se deben cumplir todas las medidas, evaluando las características del fluido a sellar y asegurando la apertura de drenajes y en el caso los equipos rotatorios el bloqueo de los motores asociados al equipo, además de los documentos del protocolo de seguridad, como evaluando entorno, riesgos, PTC y PPA.

2) Una vez asegurado el equipo, se prosigue a retirar la prensa estopa, aflojando las tuercas de los espárragos de sujeción hasta completar su extracción. Luego con la ayuda de un extractor flexible se remueve cada uno de los anillos (trenzas y anillo linterna), cuidando de no rayar el eje o camisa y es muy importante no destruir los anillos de empaquetadura para su posterior análisis, cabe señalar que estos no pueden ser reutilizados bajo ninguna circunstancia.

3) Realizar una limpieza adecuada de la zona de empaque e inspeccionar en presencia de buena iluminación el eje, camisa, sistema refrigeración agua sello o purga (mangueras, abrazaderas, rotámetro) y la caja estopa (utilizar espejo para verificar caras interiores) en búsqueda de ralladuras o desgaste excesivo; por ejemplo si la superficie de la caja es áspera a causa de la corrosión se dificulta sellar el diámetro exterior del anillo, también es frecuente encontrar la camisa del eje con desgaste (Figura 5.2), que impide lograr un sello con el diámetro interior del anillo por lo tanto en el caso de hallarse este tipo de defectos, es necesario rectificar o en si el daño es

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

severo cambiar las piezas, en caso de que los defectos sean mínimos se puede utilizar lija fina para corregir los detalles.

Figura 5.2: Desgaste habitual producido en camisas por efecto de la prensa estopa.

4) Comprobar que la empaquetadura a instalar es del tipo adecuado para la aplicación, considerando las características del fluido (pH, partículas abrasivas, entre otros) y del equipo como presión, temperatura y la velocidad superficial, deducida mediante la ecuación 37.

5) Comprobar el tamaño adecuado, mediante las dimensiones del diámetro exterior del eje e interior de la caja. En caso de instalar un anillo linterna, es necesario medir la profundad de la caja estopera, ya que el anillo debe coincidir con el orificio de entrada de la purga.

6) Verificar las tolerancias entre eje, sello, prensa estopa y caja estopera, ya que una de las principales causas del deterioro prematuro de la empaquetadura es la extrusión de los anillos ubicados en el fondo debido a tolerancias excesivas. En general se estiman que la distancia adecuada entre el eje y la caja estopera o anillo de fondo instalado debe ser de aproximadamente 0.25 mm, sin embargo, hay especialistas que recomiendan estimar la tolerancia del fondo de caja como un 3% de la sección de la empaquetadura.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

7) Tras verificar el estado de los elementos de sello, junto a sus respectivas dimensiones y tolerancias, se realiza el corte de la empaquetadura enrollando la trenza según el número requerido de anillos alrededor de una barra modelo o mandril de diámetro idéntico al eje donde serán instaladas. Luego se ejecuta un corte que puede ser a tope o en diagonal (Figura 5.3) haciendo uso de una herramienta de corte especial para esta labor que proporcione un corte limpio y preciso, asegurando la uniformidad de los anillos y extremos paralelos. Posterior al corte, se extrae cada uno de los anillos deslizándolos fuera del eje, para protegerlos de ciertas compresiones o deformaciones prematuras.

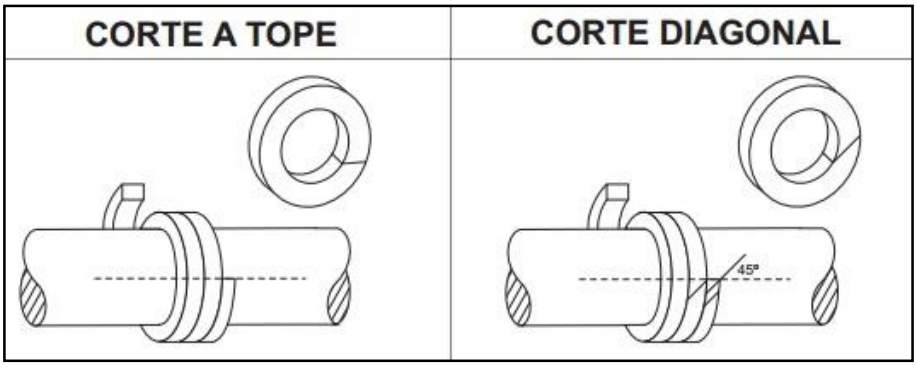


Figura 5.3: Tipos de corte sobre eje modelo

8) De ser necesaria la instalación de un anillo linterna para proporcionar liquido de sello, se deben considerar aspectos como presión y composición del fluido. Generalmente la disposición del anillo linterna separa los anillos de empaque en secciones aproximadamente iguales, sin embargo, si se trata de un fluido con partículas abrasivas que deterioren el sello se puede localizar junto a la porción interna de la bomba, desviando gran parte del líquido sellador hacia la bomba, impidiendo la acción abrasiva del fluido. En caso contrario el anillo linterna se puede ubicar en la porción externa de la bomba, reduciendo la disolución del fluido al contacto con el líquido de sello. La presión de la purga debe ser de aproximadamente 1 a 2 bar por sobre la presión máxima de la caja de estopa.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Figura 5.4: Configuración típica de anillo linterna en la sección media del sello.

9) Mantener el eje y los anillos limpios y libres de polvo u otras sustancias ajenas al sellamiento. Antes del montaje, se recomienda utilizar algún tipo de lubricante para recubrir la cara interna de los anillos, facilitando la colocación y un asentamiento inicial adecuado.

10) Se procede a instalar cada anillo de manera individual torciendo los extremos de cada anillo en sentidos opuestos para lograr una apertura que no afecte la empaquetadura, de este modo se desliza cada anillo ubicando el primero al fondo de la caja estopa, a partir de este se debe situar el corte (unión) de cada anillo alternándose a 90° sucesivamente hasta el último externo, procurando que este quede con su corte hacia abajo, para facilitar el goteo y no provocar salpicadura. Los anillos deben asentarse individualmente utilizando una herramienta de apisonamiento, para lograr una distribución uniforme en el juego total de anillos. Por otro lado, al posicionar el último anillo se debe considerar una distancia libre de un mínimo de 5 mm hacia el exterior que servirá de guía para la prensa estopa.

11) Posterior a la instalación del ultimo anillo se inserta la prensa estopa, la cual es asegurada apretando alternadamente cada tuerca de manera manual hasta encontrar resistencia mecánica, luego aflojar y reapretar con el fin de lograr una compresión uniforme sobre el conjunto de empaquetaduras, siempre teniendo en cuenta que el apriete no debe ser excesivo.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

12) Activar el equipo, permitiendo que la empaquetadura se impregne del fluido durante un tiempo aproximado de 10 a 15 minutos, permitiendo un goteo que permite ajustar los anillos en su nueva condición de servicio.

13) La fuga se restringe ajustando el apriete de las tuercas, con solo una vuelta de la cara de la tuerca a la vez (1/6 cada vez). Este proceso debe repetirse cada 5 minutos hasta lograr un goteo adecuado.
    - Para un eje de 1” de diámetro se consideran 30 gotas por minuto.
    - Para un eje de 1 ½” de diámetro se consideran 45 gotas por minuto.
    - Para un eje de 2” de diámetro se consideran 60 gotas por minuto.

14) Verificar mediante el listado de comprobación o checklist, el cumplimiento de cada paso, para asegurar la correcta ejecución de la actividad. El formato y detalle de este chequeo está contenido en el anexo C.5.2.

5.6.3 Principales problemas del sellamiento por prensa estopa

La tabla 4.2 resume los problemas hallados al extraer y analizar empaquetaduras para prensa estopas en equipos rotatorios.

Problema	Posible causa	Solución
Anillos con área interna carbonizada	Alta temperatura por falla de lubricación, producto de un apriete excesivo.	Aflojar la prensa para disminuir la presión y facilitar el goteo.
	Bloqueo del anillo linterna o fuera de posición.	Verificar la posición del anillo linterna y que su línea de alimentación este despejada y funcionando a la presión adecuada.
	La empaquetadura no es adecuada para resistir la temperatura máxima.	Especificar una nueva empaquetadura con mayor resistencia térmica.
Anillos con área interna desgastada	Desgaste causado por la abrasividad del fluido.	Verificar si las fibras de la trenza son adecuadas para resistir la abrasividad del fluido.
	Rugosidad acentuada en la superficie del eje o camisa.	Cambiar o reparar la camisa o el eje desgastado

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anillos secos, sin impregnantes y lubricante	Incompatibilidad química entre la empaquetadura y el fluido de trabajo.	Especificar la empaquetadura con la resistencia química adecuada para el fluido de trabajo.
Falta de anillo de empaquetadura	Existe tolerancia excesiva entre el eje y el fondo de la caja estopera.	Modificar el ensamble para disminuir la tolerancia, en caso de no ser posible utilizar un anillo a base de un material rígido como primer anillo.
Saliente lateral de uno o más anillos	Corte del anillo fue inadecuado, el anillo resulto muy corto.	Cortar los anillos a la longitud correcta.

Tabla 5.2. Problemas, causas y soluciones para prensas estopa en equipos rotatorios

Un caso especial por fallas frecuentes en este tipo de sello es lo que acontece en el alimentador de alta presión del área digestor (241-26032), el cual presenta fugas reiteradas que obligan constantes reajustes de la prensa. En el anexo D se presentan los detalles respecto al sellamiento de este equipo.

5.7 Impacto por las fallas de sellamiento en planta

Este tema principalmente apunta a demostrar que los recursos invertidos en procesos de sellamiento con metodologías, herramientas y empaquetaduras de calidad, están completamente justificados en los casos donde los equipos son críticos. A continuación, se analiza el impacto de las fallas sobre aspectos importantes de la planta: seguridad, medioambiente y productividad.

5.7.1 Seguridad y medioambiente

La normativa de seguridad en plantas químicas es rígida respecto a las emisiones fugitivas, por lo tanto, la fuga de cualquier tipo de sustancia considerada peligrosa no es admisible, ya que puede derivar en accidentes de distinto grado, desde intoxicaciones leves a quemaduras graves o explosiones que comprometerán toda la seguridad del complejo, por otro lado, el impacto ambiental siempre es significativo y difícil de controlar. Estas circunstancias pueden derivar en multas económicas adicionales a las sanciones y todas las medidas correctivas que tendrán que implementarse a corto y largo plazo, además está asociado un costo

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

social y de imagen respecto a la responsabilidad medioambiental que es aún más difícil de recuperar, por lo tanto el gasto en la contención y recuperación de este tipo de inconvenientes resulta significativamente más alto que la implementación de planes de prevención que involucren metodologías de monitoreo efectivas y un control de los sellamientos en los equipos críticos.

5.7.2 Perdida de producción

La eventualidad de una fuga a cualquier nivel que afecte cualquier equipo en un proceso productivo continúo, se traduce en pérdidas de materia prima que terminara por afectar la producción en menor o mayor grado, sin embargo, esta pérdida no resulta significativa si se compara con el déficit provocado por la detención de algún equipo critico que se vea afectado por una fuga descontrolada. Esto se evidencia en el análisis de criticidad explicado en el capítulo 3, donde uno de los principales parámetros para evaluar los equipos es el impacto en la producción que tiene el alto de las funciones de uno de estos activos. De acuerdo a los criterios utilizados, una falla en la mayoría de los equipos críticos de nivel máximo (K) y medio (P) estaría asociada a una detención instantánea del área o en el mejor de los casos un lapso no superior a 6 horas de funcionamiento normal hasta el cese total de la producción. Si se considera específicamente el caso de fallas en algún sellamiento de los equipos críticos del área digestor que trabajan principalmente con fluidos de alto riesgo como licores alcalinos, los tiempos de reparación y reanudación del activo se incrementan considerablemente, ya que el cambio de un sello involucra siempre la detención total del equipo para drenar los fluidos de trabajo y realizar la actividad sin inconvenientes; casos emblemáticos de esta área, son las fugas reiteradas de la escotilla de inspección del estanque flash N°1 (23-059) y de los sellos de prensa estopa del alimentador de alta presión (26-032), donde las detenciones abarcaron periodos de detención de hasta 12 horas de producción, lo cual se tradujo en pérdidas significativamente más elevadas que la inversión en la aplicación de planes de sellamiento calificados, que consideren un análisis por equipo y no solo la aplicación de un estándar.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Conclusiones

Finalizado el estudio de criticidad, se definió que todas las válvulas manuales del área digestor sometidas a análisis resultaron ser de máxima criticidad (K), lo cual era esperable, ya que estas válvulas cumplen roles fundamentales en la distribución y recirculación de los licores en el impregnador y digestor, equipos vitales en el proceso de producción continua del área. Aplicar este reconocimiento y posterior análisis significó un avance en la evaluación de este tipo de válvulas, las cuales se habían omitido en el estudio realizado anteriormente (año 2013, por lo tanto, es conveniente expandir este tipo de iniciativas a otras áreas y así avanzar en el control total de los activos de las líneas de producción.

La formulación de una metodología de sellamiento debe contemplar el análisis específico de cada equipo y sus características específicas, considerando los principales parámetros para lograr la estanqueidad del equipo a sellar.

En primer lugar, es esencial lograr una correcta selección de los materiales que conforman la empaquetadura, ya sean sellos planos o trenzas para prensa estopa. La combinación de materiales debe ser suficientemente resistente a los esfuerzos generados en la unión y principalmente a las características químicas del fluido a confinar.

Si se analizan específicamente los sellamientos estáticos de uniones bridadas, estos deben ser analizados considerando si las cargas de trabajo que se generan son estáticas o dinámicas. En ambos casos es válido aplicar una metodología de cálculo analítico similar que permite definir la distribución de carga sobre cada elemento del ensamble, sin embargo, en el caso de las cargas fluctuantes se debe además añadir un parámetro que estime un criterio de seguridad contra la fatiga.

Los resultados del análisis estático demostraron que las uniones selladas por medio de empaquetaduras no confinadas presentan una constante de rigidez del ensamble muy alta, lo cual se traduce en que la distribución de la carga se tiende a desnivelar hacia el perno limitando su resistencia para soportar los esfuerzos (80 a 95%, en casos de empaquetaduras planas comprimidas en base a PTFE y del tipo espirometálicas, mientras que las comprimidas en base a carbón entre 50 a

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

60%). Esto se explica por qué los empaques no confinados experimentan efectivamente los esfuerzos generados en la unión a diferencia de los confinados, donde son las bridas las encargadas de esto; además como la empaquetadura tienen un módulo de elasticidad relativamente bajo (comparado con el modulo del material de las bridas) su rigidez también es menor, lo cual disminuye la capacidad del perno principalmente frente a cargas de fatiga. En este caso a pesar de que la totalidad de los sellamientos del área analizados son empaquetaduras no confinadas, fue posible hallar precargas adecuadas que cumplieran con los requerimientos de la unión, lo cual quiere decir que las cargas por fatiga no son el principal motivo de las fallas. Por otro lado, para complementar los métodos de cálculo empleados en este estudio, se optó por utilizar los resultados mediante el código ASME como parámetros límites de evaluación; de la misma forma se utilizaron los rangos de torque impuesto por los fabricantes de la empaquetadura, de este modo los valores de las precargas y torques recomendados deben satisfacer en primer lugar los criterios de seguridad contra la separación, fluencia y fatiga, además de mantenerse dentro de los límites que sugiere la normativa vigente y el fabricante de la empaquetadura.

Respecto al procedimiento de empaque por prensa estopa, este sistema se ha renueva y perfecciona constantemente, sin embargo, la base de su funcionamiento no se ha alterado, manteniendo su principio de sello por compresión y fugas controladas. Para garantizar este tipo de sellamiento, se debe lograr la aplicación satisfactoria de cada paso del procedimiento de extracción e instalación del sello, desde la selección de la empaquetadura adecuada hasta el último ajuste de la prensa que regulara la fuga, controlando que todo el conjunto de fundamentos técnicos se ejecute apropiadamente.

Finalmente destacar que la aplicación efectiva de esta guía, además del control de las emisiones fugitivas mediante planes de monitoreo constante, deben ser considerados como herramientas fundamentales para prevenir fugas que pongan en riesgo la seguridad del entorno y obliguen a detener el equipo, interrumpiendo la producción normal del área.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Referencias bibliográficas

Bibliografía

- Mott, R. (2006). Diseño de elementos de máquinas (4ta Edición en español). México: Editorial Pearson.
- Norton, R. (2011). Diseño de máquinas (4ta Edición en español). México: Editorial Pearson.
- Shigley, J. (2008). Diseño en ingeniería mecánica (8va Edición en español). México: Editorial McGraw-Hill.
- Hamrock, B. (2000). Elementos de maquina (1era Edición en español). México: Editorial McGraw-Hill.
- Veiga, J. (2003). Juntas industriales (1era Edición en español). Brasil: Chesterman industria gráfica.
- Facultad de ingeniería, Udec. Uniones roscadas. Chile: Dirección de investigaciones tecnológicas y asistencia técnica.
- MR Project Ltda. (2013). Manual interactivo Área 241-Digestor L2. Chile: Planta Celulosa Arauco, Horcones.

Linkografía

- Página oficial empresa Sinsef. http://www.sinsef.cl/
- Página oficial empresa Garlock. http://www.garlock.com/es
- Página oficial empresa Chesterton. http://www.chestertoncompany.com
- Página oficial empresa CalvoSealing (ICP). http://www.calvosealing.com
- Página oficial de Fluid Sealing Association: http://www.fluidsealing.com
- Página oficial de European Sealing Association: http://europeansealing.com/

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexos

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexos A. Capítulo 3

Anexo A. Tabla 3.1: Matriz de evaluación para taller FA

FA	Descripción	Impacto (restricciones o detenciones)
A	Área con una velocidad de producción muy baja y sin pulmón (estanque de acumulación o pila).	La detención del área produce una detención total e instantánea o dentro de 2 horas en la producción de la planta (Celulosa o Energía eléctrica).
B	Área con una velocidad de producción baja o con pulmón solo de regulación de proceso (estanque de regulador).	La detención de 2 a 6 horas del área produce una detención de producción de planta.
C	Área con una velocidad de producción media o con pulmón de mediano tamaño (estanque de regulador).	La detención de 6 a 12 horas del área produce una detención de producción de planta.
D	Área con alta velocidad de producción o con un pulmón grande	La detención de 12 a 24 horas del área produce una detención de producción de planta.
E	El área tiene influencia baja en la producción ya que tiene alta velocidad productiva y gran estanque de acumulación.	La detención de más de 24 horas produce una detención, demora o restricción de producción.

Anexo A. Tabla 3.2: Matriz de evaluación para taller FS

FS	Descripción	Impacto
A	Sistema simple sin posibilidad de By-Pass ni acumular producción	La detención del sistema deja el área fuera de forma instantánea y en un 100%
B	Sistema con estanque o pila de acumulación o con respaldo parcial	La detención de 2 a 6 horas del sistema produce una detención de producción del área. La detención del sistema produce una restricción instantánea en la producción del área en al menos 75%.
C	Sistema con estanque o pila de acumulación o con respaldo parcial	La detención de 6 a 12 horas del sistema produce una detención de producción del área. La detención del sistema produce una restricción instantánea en la producción del área en al menos 50%.
D	Sistema con estanque o pila de acumulación o con respaldo parcial	La detención de 12 a 24 horas del sistema produce una detención de producción del área. La detención del sistema produce una restricción instantánea en la producción del área en al menos 25%.
E	Sistema con Respaldo mayor o igual que el 100% de redundancia o con estanque de acumulación que permite gran autonomía	Mantiene la capacidad de producción normal del área.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo A. Tabla 3.3: Matriz de evaluación para taller FSUT

FSUT	Descripción	Impacto
A	Equipo simple sin posibilidad de respaldo ni acumular producción	La detención del Equipo deja el sistema fuera de forma instantánea y en un 100%
B	Equipo con estanque o pila de acumulación o con respaldo parcial	La detención de 2 a 6 horas del Equipo produce una detención de producción del sistema. La detención del Equipo produce una restricción instantánea en la producción del sistema en al menos 75%.
C	Equipo con estanque o pila de acumulación o con respaldo parcial	La detención de 6 a 12 horas del Equipo produce una detención de producción del sistema. La detención del Equipo produce una restricción instantánea en la producción del sistema en al menos 50%.
D	Equipo con estanque o pila de acumulación o con respaldo parcial	La detención de 12 a 24 horas del Equipo produce una detención de producción del sistema. La detención del Equipo produce una restricción instantánea en la producción del sistema en al menos 25%.
E	Equipo con Respaldo mayor o igual que el 100% de redundancia o con estanque de acumulación que permite gran autonomía	Mantiene la capacidad de producción normal del sistema.

Anexo A. Tabla 3.4: Matriz de cálculo para determinar IIO

Códigos de Impactos					Valor de IIO				
I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
AAA	AAB	AAC	AAD	AAE	5	5	4	3	1
ABA	ABB	ABC	ABD	ABE	5	4	4	3	1
ACA	ACB	ACC	ACD	ACE	4	4	4	3	1
ADA	ADB	ADC	ADD	ADE	2	2	2	2	1
AEA	AEB	AEC	AED	AEE	1	1	1	1	1
BAA	BAB	BAC	BAD	BAE	5	4	4	3	1
BBA	BBB	BBC	BBD	BBE	4	4	4	3	1
BCA	BCB	BCC	BCD	BCE	4	4	3	3	1
BDA	BDB	BDC	BDD	BDE	3	3	3	2	1
BEA	BEB	BEC	BED	BEE	1	1	1	1	1
CAA	CAB	CAC	CAD	CAE	4	4	3	2	1
CBA	CBB	CBC	CBD	CBE	4	4	3	2	1
CCA	CCB	CCC	CCD	CCE	3	3	2	2	1
CDA	CDB	CDC	CDD	CDE	2	2	2	2	1
CEA	CEB	CEC	CED	CEE	1	1	1	1	1
DAA	DAB	DAC	DAD	DAE	4	3	2	2	1
DBA	DBB	DBC	DBD	DBE	3	3	2	2	1
DCA	DCB	DCC	DCD	DCE	2	2	2	2	1
DDA	DDB	DDC	DDD	DDE	2	2	2	2	1
DEA	DEB	DEC	DED	DEE	1	1	1	1	1
EAA	EAB	EAC	EAD	EAE	1	1	1	1	1
EBA	EBB	EBC	EBD	EBE	1	1	1	1	1
ECA	ECB	ECC	ECD	ECE	1	1	1	1	1
EDA	EDB	EDC	EDD	EDE	1	1	1	1	1
EEA	EEB	EEC	EED	EEE	1	1	1	1	1

Descripción del IIO	
5	Impacto Máximo
4	Impacto Alto
3	Impacto Medio
2	Impacto Bajo
1	Impacto Muy Bajo

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo A. Tabla 3.5: Matriz de evaluación para IIP

NIVEL DE GRAVEDAD REAL O POTENCIAL				
1 Baja	2 Menor	3 Moderado	4 Mayor	5 Extremo
PERSONAS				
No requiere tratamiento médico, Accidente STP	Accidente CTP que requiere más de una jornada para que el trabajador se reintegre al trabajo.	Incapacidad permanente parcial, entre un 15% y un 37,5% y grave según circular 2345 dónde define accidente del trabajo grave como, cualquier accidente que: Obligue a realizar maniobras de reanimación, u Obligue a realizar maniobras de rescate, u Ocurra por caída de altura de más de 2 m, o Provoque en forma inmediata, la amputación o pérdida de cualquier parte del cuerpo, o Involucre un número tal de trabajadores que afecte el desarrollo normal de la faena afectada.	Una fatalidad o incapacidad permanente (> 40%. Por ejemplo: Pérdidas de ambas manos o amputación de ellas en niveles altos, Amputación a través de la articulación del hombro, Anquilosis del hombro como omóplato fijo, Anquilosis del hombro como omóplato libre, Amputación bajo el hombro con muñón a menos con. Desde vértice del acromion, Amputación a nivel de cadera, pérdida del equilibrio, pérdida o deficiencia de la visión, Dermatosis crónica, Neumoconiosis con insuficiencia respiratoria, Asma bronquial crónica)	Múltiples fatalidades o múltiples incapacidades permanentes
MEDIO AMBIENTE				
No se provoca una alteración o daño visible al medio ambiente con respecto a la condición original	Se provoca una alteración que no implica la perdida de funcionalidad del medio ambiente o de alguno de sus componentes.	Se provoca una alteración que implica la pérdida parcial de la funcionalidad del medio ambiente o de uno de sus componentes (alteraciones en la conducta de especies, contaminación local de agua y suelo, etc).	Se provoca una alteración que lleva a la pérdida parcial o total de funcionalidad del medio ambiente o de uno de sus componentes, y puede tener carácter irreversible (mortandad focalizada de especies, perdida de las capacidades naturales de depuración del medio ambiente, perdida del uso de suelos, agua y aire, etc)	Se provoca una alteración que lleva a la pérdida total de funcionalidad del medio ambiente o de uno de sus componentes, y es irreversible (mortandad generalizada de especies, perdida de total de las capacidades naturales de depuración del medio ambiente, etc)
RESPONSABILIDAD LEGAL				
Potenciales implicancias legales de bajo nivel, asociada a gestión defectuosa más que a la excedencia de alguna normativa legal. Improbables amonestaciones	Potenciales implicancias legales menores, asociada a gestión defectuosa más que a la excedencia de alguna normativa legal. Puede generar amonestaciones.	Hay implicancias legales por incumplimientos de normas o compromisos vigentes. Posible multa moderada.	Infracción seria a la ley, con investigación y juicio por parte de la autoridad. Con multa potencialmente mayor.	Infracción mayor a la ley, con investigación y juicio importante por parte de la autoridad. Con posible pérdida total o parcial de la licencia de operación.
PÚBLICO/AUTORIDADES				
Implicancia pública, pero restringida al área local.	Reacción adversa menor y puntual	Interés de los medios en aumento, con reacciones adversas regional e involucramiento de ente gubernamental.	Cobertura y oposición de los medios con opinión pública a nivel nacional con la atención con entes gubernamentales y la ONG.	Seria protestas de la comunidad y/o involucramiento de entes gubernamentales con atención de medios internacionales.
GESTIÓN DE OPERACIONES				
Pérdida ínfima de la producción, sin daños a equipos, propiedad ni defectos en productos. Fácilmente rectificada por una acción correctiva inmediata, (Costo estimado <US$ 5.000).	Pérdidas menores en la producción (Hasta 1 turno) y daños a equipos, propiedad. Fácil recuperación. (Costo estimado desde US$ 5.000) a <US$ 30.000)	Pérdidas moderadas en la producción (Hasta 3 días) y daños a equipos , propiedad. Susceptibles de reparación o reposición. (Costo estimado desde US$ 31.000) a <US$ 100.000)	Pérdidas con paralización en la producción (Hasta 7 días) y daños a equipos , propiedad. Requiere importante acción correctiva. (Costo estimado desde US$ 101.000) a <US$ 200.000)	Pérdidas considerables en la producción (Sobre los 7 días y las operaciones seriamente afectadas). No se puede reanudar sin una inversión mayor. (Costo estimado desde US$ >500.000)
COMUNIDAD				
Daño de carácter inter empresa, sin extrapolarse al exterior	Daño leve, reparable y de baja significación	Genera impacto moderado, la mayor parte del daño es reparable en el mediano plazo	Daños significativos con serias consecuencias con 50 % porcentaje de recuperación. Alteración a la calidad de vida pero que es posible mitigar	Sucesos muy serios con daños irreparables.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexos B: Capítulo 4

Anexo B. Tabla 4.1: Materiales metálicos

Designación	Descripción
Acero al carbono	Acero en plancha forjada o laminado para aplicaciones generales.
304	Acero inoxidable austenitico con 18% de cromo y 8% de níquel. Presenta una excelente resistencia a la corrosión, pero sujeto a corrosión bajo tensión a altas temperaturas.
304L	Es una variación del acero tipo 304, pero con un menor contenido de carbono. La corrosión bajo tensión e intergranular es reducida.
316	Acero inoxidable austenitico con 18% de cromo y 12% de níquel y adición de un 3% de molibdeno. Presenta una excelente resistencia a la corrosión de reactivos químicos y entornos que contienen cloruro.
316L	Es una variación del acero 316, pero con un menor contenido de carbono. La corrosión bajo tensión e intergranular es reducida.
410	Acero inoxidable ferritíco con un 12% de Cr y 9% de Ni. Presenta una buena resistencia a la corrosión a altas temperaturas.
Titanio	Excelente resistencia a la corrosión a altas temperaturas, sobresaliente en medios oxidantes, además de poseer una gran resistencia mecánica.
Cobre	Metal con resistencia general a la corrosión.
Aluminio	Excelente ductilidad y maleabilidad.
Aleación 200	Aleación conocida comercialmente como Nickel 200, concentra un 99.6% de níquel forjado, el cual les provee una alta resistencia a medios reductores.
Aleación 400	Acero aleado conocida comercialmente como Monel 400, compuesta por un 67% de Ni y un 23% de Cu. Es altamente resistente a los ambientes salinos, vapores a alta temperatura y especialmente útil contra el ácido fluorhídrico.
Aleación 600	Su designación comercial es Inconel 600, es una aleación compuesta por un 70% de Ni, 15% de Cr y un 8% de Fe. Presenta una excelente resistencia a la corrosión en ambientes a altas temperaturas.
Aleación 800	Acero aleado compuesto por 32% de Ni, 20% Cr y 46% de Fe, puede resistir de muy buena manera la corrosión a altas temperaturas y su denominación comercial es Incoloy 800.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo B. Tabla 4.2: Materiales en base a fibras

Designación	Descripción
Fibra de carbono	Material con alta conductividad térmica que asegura una rápida disipación del calor, permitiendo el servicio en ambientes sometidos a altas temperaturas, además posee alta resistencia química puede utilizarse desde pH 0 hasta 14, exceptuando ambientes oxidantes.
Aramida	Es un tipo de fibra Aramida aromática que ofrece alta resistencia y estabilidad, es adecuada para utilizarse en condiciones de temperaturas medias.
Amianto o Asbesto (*)	Es un material tradicional en la industria de los empaques de estanqueidad, por su capacidad de sellar adecuadamente en una amplia gama de condiciones de servicio, sin embargo, actualmente es sustituido por productos alternativos, debido a los riesgos que implica su uso contra la salud.
Sulfato de bario	Material también conocido como barita, tiene una excelente resistencia a la temperatura, corrosión, ácidos y álcalis. Es un material estable que habitualmente se utiliza como relleno combinado con otros materiales para sellos.
Fibra mineral artificial	Fibras inorgánicas compuestas de silicatos metálicos, apropiada para aplicaciones donde se requiera resistir temperaturas medias-altas.
Vidrio	El vidrio es un complejo inorgánico de silicatos que posee una moderada resistencia química, pero gran resistencia a la tracción. Es adecuado para temperaturas medias.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo B. Tabla 4.3: Materiales elastoméricos

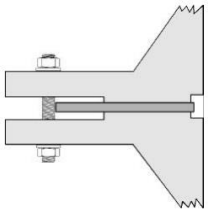
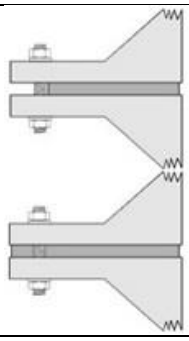
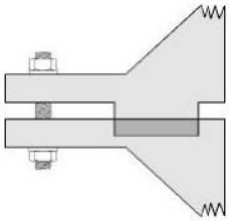
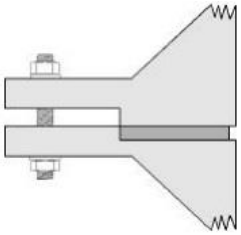
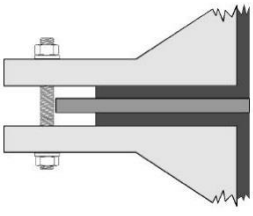
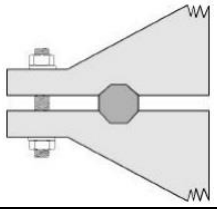
Designación	Descripción
Caucho natural (NR)	Buena resistencia a la mayoría de sales inorgánicas, ácidos suaves y álcalis. No recomendado para intemperies o donde se deban contener aceites o disolventes.
Estireno butadieno (SBR)	Caucho sintético adecuado para resistir ácidos débiles y productos químicos moderados, no es recomendable para hidrocarburos o ácidos fuertes.
Etileno propileno (EPDM)	Elastómero de buena resistencia al vapor, ácidos fuertes y los álcalis, pero ineficaz contra disolventes.
Neopreno (CR)	Excelente resistencia a la intemperie, además de ser una alternativa adecuada para resistir ácidos moderados, álcalis, disolventes y combustibles, sin embargo, pierde su eficacia contra ácidos o hidrocarburos fuertes.
Nitrilo (NBR)	Caucho sintético con alta capacidad contra la temperatura y resistencia química, exceptuando hidrocarburos clorinados, esteres, acetonas y agentes oxidantes.
Polietileno clorosulforado	Elastómero con alta resistencia química contra ácidos o álcalis, además destacan sus propiedades ignifugas.

Anexo B. Tabla 4.4: Otros materiales

Designación	Descripción
Grafito flexible	Este material esencialmente grafito puro, con más de un 95% de carbono elemental. Posee amplia resistencia química, pero no debe ser utilizado en ambientes oxidantes
PTFE	El Politetrafluoretileno (PTFE) es conocido comercialmente con el nombre de teflón, es un material con una resistencia química extremadamente alta, con excelentes propiedades dieléctricas y antiadherentes. La alta compresibilidad del material, le permite adaptarse a irregularidades de las superficies. Es susceptible a degradarse frente a radiaciones de alta energía.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo B. Tabla 4.5: Tipos de uniones mediante bridas

Designación	Descripción	
cara realzada o Raised Face (RF)	Son bridas de construcción robusta y su nombre responde a que poseen un realce al interior del diámetro de pernos correspondiente al área, donde se posicionara la empaquetadura.	
Cara plana o Flat Face (FF)	Las superficies de contacto de ambas bridas son completamente planas, lo permite utilizar empaquetaduras no confinadas perforadas y completas o sin perforar de variadas dimensiones.	
Lengüeta y ranura	Una de las dos bridas tiene una lengüeta y la otra una ranura que encajan mutuamente. Entre ambas se coloca una empaquetadura, la cual queda prisionera, sin embargo, debe considerarse como no confinada, ya que impide el contacto entre caras.	
Macho y hembra	Este tipo de brida es similar al tipo lengüeta y ranura, pero esta puede adoptar varias formas, con la salvedad que la profundidad de la brida hembra debe ser menor a la altura del macho, para impedir el contacto directo entre caras.	
Unión solapada o Lap Joint	Este tipo de brida se utiliza cuando la unión involucra tuberías solapadas sometidas a inspecciones o limpiezas que requieran montajes y desmontajes frecuentes, ya que se facilita la tarea de giro y alineamiento.	
Bridas de juntas tipo anillo o RTJ	Ambas bridas tienen canales donde se aloja la empaquetadura que comúnmente es metálico.	

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo B. Tabla 4.7: Dimensiones de pernos del estándar métrico ISO

Diámetro mayor *d* (mm)	Paso *p* (mm)	Diámetro menor *dr* (mm)	Área de esfuerzo por tensión (mm^2)
3.5	0.60	2.76	6.78
4.0	0.70	3.14	8.78
5.0	0.80	4.02	14.18
6.0	1.00	4.77	20.12
7.0	1.00	5.77	28.86
8.0	1.25	6.47	36.61
10.0	1.50	8.16	57.99
12.0	1.75	9.85	84.27
14.0	2.00	11.55	115.44
16.0	2.00	13.55	156.67
18.0	2.50	14.93	192.47
20.0	2.50	16.93	244.79
22.0	2.50	18.93	303.40
24.0	3.00	20.32	352.50
27.0	3.00	23.32	459.41
30.0	3.50	25.71	560.59
33.0	3.50	28.71	693.55

Anexo B. Tabla 4.8: Dimensiones de pernos del estándar UNS

Diámetro mayor (in)	Cuerdas por pulgada	Paso de la cuerda (in)	Diámetro de paso (in)	Diámetro menor (in)	Área de esfuerzo por tensión (in^2)
0.250	16	0.063	0.219	0.188	0.032
0.313	14	0.071	0.277	0.241	0.053
0.375	12	0.083	0.333	0.292	0.077
0.438	12	0.083	0.396	0.354	0.110
0.500	10	0.100	0.450	0.400	0.142
0.625	8	0.125	0.563	0.500	0.222
0.750	6	0.167	0.667	0.583	0.307
0.875	6	0.167	0.792	0.708	0.442
1.000	5	0.200	0.900	0.800	0.568
1.125	5	0.200	1.025	0.925	0.747
1.250	5	0.200	1.150	1.050	0.950
1.375	4	0.250	1.250	1.125	1.108
1.500	4	0.250	1.375	1.250	1.353
1.750	4	0.250	1.625	1.500	1.918
2.000	4	0.250	1.875	1.750	2.580
2.250	3	0.333	2.083	1.917	3.142
2.500	3	0.333	2.333	2.167	3.976
2.750	3	0.333	2.583	2.417	4.909
3.000	2	0.500	2.750	2.500	5.412

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo B. Tabla 4.9: Resistencias para pernos según norma SAE

Numero de grado	Diámetro ext. (in)	Resistencia de prueba min. (ksi)	Resistencia a la fluencia min. (ksi)	Resistencia a la tensión min. (ksi)
2	0.25 – 0.75	55	57	74
2	0.875 – 1.5	33	36	60
4	0.25 – 1.5	65	100	115
5	0.25 – 1.0	85	92	120
5	1.125 – 1.5	74	81	105
5.2	0.25 – 1.0	85	92	120
7	0.25 – 1.5	105	115	133
8	0.25 – 1.5	120	130	150

Anexo B. Tabla 4.10: Resistencias para pernos según norma ASTM

Numero de grado	Diámetro ext. (in)	Resistencia de prueba min. (ksi)	Resistencia a la fluencia min. (ksi)	Resistencia a la tensión min. (ksi)
A325	>1.0 - 1.5	74	81	105
A449	0.25-1.0	85	92	120
A449	>1.0 - 1.5	74	81	105
A449	>1.5 - 3.0	55	58	90
A193 B7	> 0.25 - 2.5	96	105	125
A193 B7	2.625 - 4.0	86	95	115
A193 B8	0.875 - 1	72	80	115
A193 B8	1.125 - 1.25	58	65	105
A193 B8	1.375 - 1.5	45	50	100
A193 B8M	0.25 - 0.75	86	95	110
A193 B8M	0.875 - 1	72	80	100
A193 B8M	1.125 - 1.25	58	65	95
A193 B8M	1.375 - 1.5	45	50	90

Anexo B. Tabla 4.11: Resistencias para pernos métricos

Numero de clase	Diámetro ext. (mm)	Resistencia de prueba min. (MPa)	Resistencia de fluencia min. (MPa)	Resistencia a la tensión min. (MPa)
4.8	M1.6 - M16	310	340	420
5.8	M5 - M24	380	420	520
8.8	M3 - M36	600	660	830
9.8	M1.6 - M16	650	720	900
10.9	M5 - M36	830	940	1040
12.9	M1.6 - M36	970	1100	1220

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

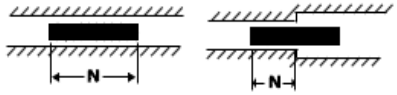
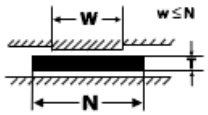
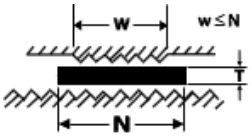
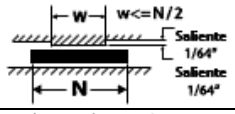
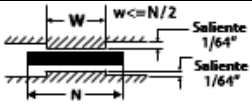
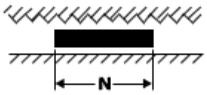
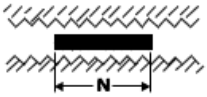
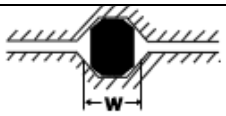
Anexo B. Tabla 4.15: Factor de empaquetadura y presión mínima de aplastamiento.

Material de la empaquetadura		Factor de empaquetadura "m"	Presión mínima de aplastamiento "y" (psi)	Referencias para Anexo B. tabla 4.13	
				Superficie de sellado	Columna b_o
Lamina comprimida	3.2 mm	2.00	1600	1a, 1b, 1c, 1d, 4 ,5	II
	1.6 mm	2.75	3700		
	0.8 mm	3.50	6500		
Espirometálicas con relleno no metálico		3.00	10000	1a, 1b	II
Encamisado corrugado doble con relleno no metálico	Aluminio	2.50	2900	1a, 1b	II
	Cobre o latón	2.75	3700		
	Ac. carbono	3.00	4500		
	Monel	3.25	5500		
	Ac. Inox.	3.50	6500		
Encamisado liso con relleno metálico	Aluminio	3.25	5500	1a, 1b, 1c*, 1d*, 2*	II
	Cobre o latón	2.50	6500		
	Acero blando	3.75	7600		
	Monel	3.50	8000		
	Ac. Inox.	3.75	9000		
Metal solido liso	Aluminio	4.00	8800	1a, 1b, 1c, 1d, 2, 3, 4 ,5	I
	Cobre o latón	4.75	13000		
	Acero blando	5.50	18000		
	Monel	6.00	21800		
	Ac. Inox.	6.50	26000		
RTJ	Acero blando	5.50	18000	6	I
	Monel	6.00	21800		
	Ac. Inox.	6.50	26000		

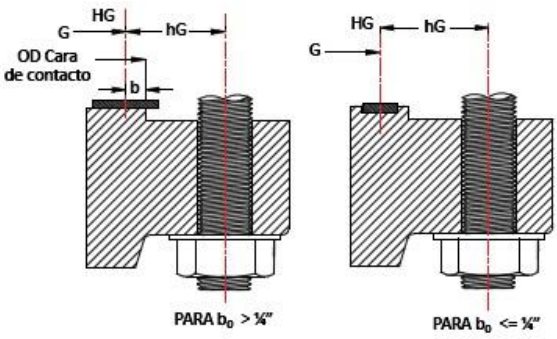
(*) La superficie de la empaquetadura con una vuelta debe estar contra la superficie lisa y no contra el saliente.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo B. Tabla 4.16: Ancho efectivo y diámetro de las reacciones del sello.

Perfil de superficie de sellado		Ancho básico de aplastamiento b_o	
		Columna I	Columna II
1a		$\frac{N}{2}$	$\frac{N}{2}$
1b*		$\frac{N}{2}$	$\frac{N}{2}$
1c		$\frac{w+T}{2}; \left(\frac{w+N}{4}\ \text{max.}\right)$	$\frac{w+T}{2}; \left(\frac{w+N}{4}\ \text{max.}\right)$
1d*		$\frac{w+T}{2}; \left(\frac{w+N}{4}\ \text{max.}\right)$	$\frac{w+T}{2}; \left(\frac{w+N}{4}\ \text{max.}\right)$
2		$\frac{w+N}{4}$	$\frac{w+3N}{8}$
3		$\frac{N}{4}$	$\frac{3N}{8}$
4*		$\frac{3N}{8}$	$\frac{7N}{16}$
5*		$\frac{N}{4}$	$\frac{3N}{8}$
6		$\frac{W}{8}$	

$$\textit{Ancho efectivo}: b = b_o\ , \textit{cuando}\ b_o \leq 1/4"\ ;\ b = 0.5\sqrt{b_o}\ , \textit{cuando}\ b_o > 1/4"$$



*Cuando las estrías no deben exceder 1/64” de profundidad y 1/32” de ancho, se utilizarán los esquemas 1b y 1d.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexos C. Capítulo 5

Anexo C.1: Especificaciones técnicas de láminas comprimidas no metálicas

Garlock HTC-9850

Empaquetadura en plancha troquelada compuesta por fibras de carbono con un aglomerante de nitrilo. Es un material resistente con excelentes propiedades para soportar condiciones severas de calor intenso, alta presión y oxidación. Se utiliza en numerosas aplicaciones para las industrias de tratamiento de tratamiento químico, ideal para medios como vapor, aceites, combustibles, ácidos suaves y álcalis suaves.

Temperatura máxima de trabajo	482°C (900°F)
Presión máxima	138 bar (2000 psi)
Compresibilidad a 5000 psi (ASTM-F36)	7-15%
Capacidad de sellado (ASTM-F37)	0.1 ml/hr
Relajación por fluencia (ASTM-F38)	15% máximo
Recuperación (ASTM-F36)	55% mínimo
Resistencia a la tracción (ASTM-F152)	100 bar (1500 psi)
Factor de servicio PxT	25000 (°C x bar) para 1/16” de esp. 12000 (°C x bar) para 1/8” de esp.

Chesterton E-457

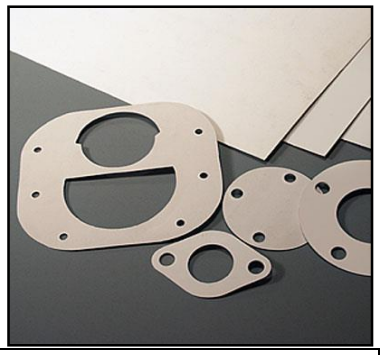
La plancha de fibra de carbón con aglutinante de nitrilo Chesterton 457 es un material para juntas en plancha para altas temperaturas, que no contiene asbesto, formulado para una gran variedad de necesidades de juntas. Se recomienda para uso en una gran variedad de aplicaciones de vapor, agua, aceite e hidrocarburos. No se recomienda el 457 para uso en hidrocarburos clorados, aromáticos y ésteres cetónicos.

Temperatura máxima de trabajo	450°C (840°F)
Presión máxima	100 bar (1470 psi)
Compresibilidad a 5000 psi (ASTM-F36)	5-15%
Capacidad de sellado (ASTM-F37)	0.3 ml/hr
Relajación por fluencia (ASTM-F38)	30% máximo
Recuperación (ASTM-F36)	50% mínimo
Resistencia a la tracción (ASTM-F152)	100 bar (1500 psi)
Factor de servicio PxT	21800 (°C x bar)

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Garlock Gylon 3591

Es una lámina comprimida PTFE con relleno de sulfato de bario que presenta un mejor rendimiento que el PTFE convencional. Su proceso de fabricación reduce los problemas de fluencia en frío que son característicos de las planchas de PTFE expandidas. Es resistente a una amplia gama de productos químicos, como productos altamente cáusticos, ácidos moderados y otros similares.



Temperatura máxima de trabajo	260°C (500°F)
Presión máxima	83 bar (1200 psi)
Compresibilidad a 5000 psi (ASTM-F36)	15-20%
Capacidad de sellado (ASTM-F37B)	0.2 ml/hr
Relajación por fluencia (ASTM-F38)	35%
Recuperación (ASTM-F36)	40%
Resistencia a la tracción (ASTM-F152)	13.8 MPa (2000 psi)
Factor de servicio PxT	12000 (°C x bar) para 1/16” de esp. 8600 (°C x bar) para 1/8” de esp.

Chesterton ECS-W

ECS-W es una junta en planchas de PTFE idónea para servicio general en una gran variedad de fluidos, sustancias cáusticas fuertes, ácidos, cloro, gases, agua, vapor, hidrocarburos, hidrogeno y fluoruro de aluminio. Posee una resistencia química excelente que abarca todo el rango de pH (0-14).

Temperatura máxima de trabajo	260°C (500°F)
Presión máxima	83 bar (1200 psi)
Compresibilidad a 5000 psi (ASTM-F36)	15-20%
Capacidad de sellado (ASTM-F37A)	0.06 ml/hr
Relajación por fluencia (ASTM-F38B)	25%
Recuperación (ASTM-F36)	40%
Resistencia a la tracción (ASTM-F152)	14 MPa (2000 psi)
Factor de servicio PxT	12000 (°C x bar) para 1/16” de esp. 8500 (°C x bar) para 1/8” de esp.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo C.2: Especificaciones técnicas de empaquetaduras semi-metálicas

Chesterton E-252 CGI

Las empaquetaduras enrolladas en espiral son las juntas metálicas más utilizadas para el sellamiento de bridas a nivel industrial. Están fabricadas a partir de acero inoxidable y un relleno de grafito o PTFE, resistentes al calor y la corrosión. El modelo CGI posee un anillo metálico exterior e interior como centradores en la brida y además contienen el espiral en ambos extremos para una compresión y expansión radial controlada.

Materiales	Devanados de acero inoxidable con capas de sello de grafito o PTFE, anillo interno de acero inoxidable, anillo externo de acero al carbono recubierto
Temperatura máxima	Capa de sellado de grafito hasta 550°C Capa de sellado de PTFE hasta 300°C
Presión máxima	350 bar (5075 psi)
Resistencia química (pH)	0-14
Aplicaciones	Bridas de tuberías, estanques y válvulas entre otros.

Garlock Flexseal RWI

Las empaquetaduras Flexseal se elaboran combinando una cinta metálica espiral preformada con un material suave como relleno, obteniendo un sello efectivo al mantenerse comprimida entre las bridas. El anillo central actúa como resorte, dándole mejor resiliencia a la junta bajo diferentes condiciones y ciclos de operación. El tipo RWI incluye anillos externos e internos, para posicionar la empaquetadura y proveer mayor resistencia radial, además el anillo interior reduce la erosión de la brida y protege el elemento sellante.

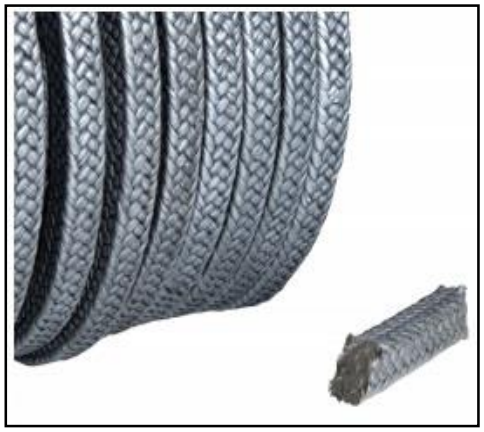
Materiales	Espiral de acero inoxidable con relleno de grafito, anillo interno de acero inoxidable y anillo externo de acero al carbono.
Rango de temperatura	Desde -212°C (-350°F) hasta 455°C (850°F)
Presión máxima	345 bar (5000 psi)
Resistencia química (pH)	0-14
Aplicaciones	Adecuado para cualquier tipo de brida, idealmente de cara plana, cara realzada y macho-hembra.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo C.3: Especificaciones técnicas de empaquetaduras en trenza

ICP 912

Empaquetadura intertrenzada con filamentos de carbono de alta calidad y lubricante especial basado en grafito y PTFE. La adición del lubricante de grafito mejora el efecto de sellado, produciendo una densa matriz no porosa y mejorando las propiedades de fricción. Esta trenza posee una excelente resistencia química y alta conductibilidad térmica de los filamentos de carbono que disipan el calor que se genera dentro de la caja estopera, mejorando su rendimiento.



Temperatura	De -200°C a 650°C
Presión máxima	30 bar (435 psi)
Resistencia química (pH)	0-14
Velocidad superficial	20 m/s
Aplicaciones	Uso en sellamientos estáticos y dinámicos.

Garlock Estilo 98

Empaquetadura fabricada con hilos de fibra discontinua de carbono de excelente calidad (+95% carbono). Cada hilo se reviste y seca individualmente antes del trenzado con un lubricante no derivado del petróleo a alta temperatura y con dispersión de grafito. Presenta un bajo coeficiente de fricción para prolongar la duración de los equipos, además de una alta conductividad térmica que se traduce en mayor duración de la empaquetadura y es resistente a una gran variedad de productos químicos

Temperatura	De -200°C a 454°C
Presión máxima	35 bar (508 psi)
Resistencia química (pH)	0-14
Velocidad superficial	20 m/s
Aplicaciones	Utilizada principalmente en válvulas y bombas

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

ICP 916

Empaquetadura intertrenzada con filamentos de PTFE expandido con grafito y lubricante de rodaje y exenta de silicona. Fibra 100% GFO. Esta empaquetadura puede ser utilizada en una amplia gama de aplicaciones, posee una larga duración, químicamente inerte y no se endurece ni se vuelve quebradiza, por ello minimiza el desgaste del eje. Posee excelente lubricidad y una alta conductividad térmica, manteniendo una baja temperatura incluso después de largos periodos de operación continua.

Temperatura	De -200°C a 288°C
Presión máxima	50 bar (725 psi)
Resistencia química (pH)	0-14
Velocidad superficial	25 m/s
Aplicaciones	Uso en bombas de todo tipo, mezcladores, secadores, refinadoras, entre otros.

Sinsef P-101T

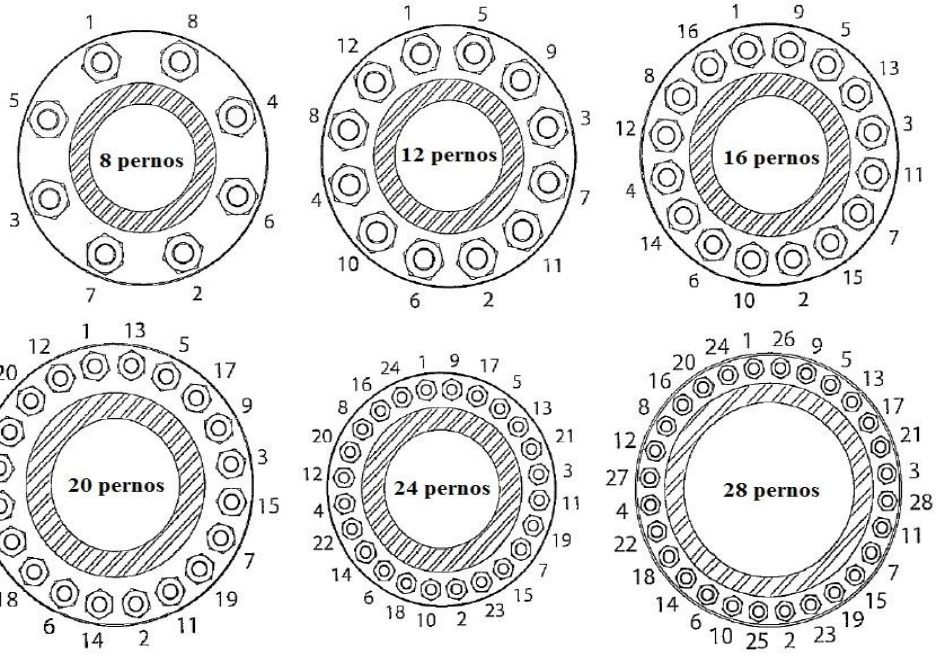
Empaquetadura trenzada a base de filamentos de PTFE, impregnada con grafito y lubricante. Esta trenza posee una excelente resistencia mecánica y química, además de una alta conductividad térmica y un bajo coeficiente de fricción.
Es recomendada para el sellamiento de bombas centrifugas, alternativas, agitadores y cualquier equipo rotatorio.

Temperatura	De -200°C a 280°C
Presión máxima	50 bar (725 psi)
Resistencia química (pH)	0-14
Velocidad superficial	30 m/s
Aplicaciones	Todo tipo de equipos rotatorios

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo C.4: Secuencias de apriete para torque según número de pernos.

Número de tornillos de la brida	SECUENCIA DE NUMERACIÓN (SENTIDO HORARIO)
4	-1-3-2-4
8	-1-5-3-7-2-6-4-8
12	-1-5-9-3-7-11-2-6-10-4-8-12
16	-1-9-5-13-3-11-7-15-2-10-6-14-4-12-8-16
20	-1-13-5-17-9-3-15-7-19-11-2-14-6-18-10-4-16-8-20-12
24	-1-9-17-5-13-21-3-11-19-7-15-23-2-10-18-6-14-22-4-12-20-8-16-24
28	-1-13-25-5-17-9-21-3-15-27-7-19-11-23-2-14-26-6-18-10-22-4-16-28-8-20-12-24
32	-1-17-9-25-5-21-13-29-3-19-11-27-7-23-15-31-2-18-10-26-6-22-14-30-4-20-12-28-8-24-16-32
36	-1-2-3---13-14-15---25-26-27---7-8-9---19-20-21---31-32-33---4-5-6---16-17-18---28-29-30---10-11-12---22-23-24---34-35-36
40	-1-2-3-4---17-18-19-20---33-34-35-36---9-10-11-12---25-26-27-28---5-6-7-8---21-22-23-24---37-38-39-40---13-14-15-16---29-30-31-32
44	-1-2-3-4---17-18-19-20---33-34-35-36---9-10-11-12---25-26-27-28---41-42-43-44---5-6-7-8---21-22-23-24---37-38-39-40---13-14-15-16---29-30-31-32
48	-1-2-3-4---17-18-19-20---33-34-35-36---9-10-11-12---25-26-27-28---41-42-43-44---5-6-7-8---21-22-23-24---37-38-39-40---13-14-15-16---29-30-31-32---45-46-47-48
52	-1-2-3-4---17-18-19-20---45-46-47-48---9-10-11-12---25-26-27-28---33-34-35-36---41-42-43-44---5-6-7-8---21-22-23-24---49-50-51-52---13-14-15-16---29-30-31-32---37-38-39-40
56	-1-2-3-4---49-50-51-52---25-26-27-28---9-10-11-12---41-42-43-44---17-18-19-20---33-34-35-36---5-6-7-8---53-54-55-56---29-30-31-32---13-14-15-16---45-46-47-48---21-22-23-24---37-38-39-40
60	-1-2-3-4---17-18-19-20---33-34-35-36---13-14-15-16---45-46-47-48---25-26-27-28---57-58-59-60---5-6-7-8---37-38-39-40---21-22-23-24---49-50-51-52---9-10-11-12---41-42-43-44---29-30-31-32---53-54-55-56
64	-1-2-3-4---33-34-35-36---17-18-19-20---49-50-51-52---9-10-11-12---41-42-43-44---25-26-27-28---57-58-59-60---5-6-7-8---37-38-39-40---21-22-23-24---53-54-55-56---13-14-15-16---45-46-47-48---29-30-31-32---61-62-63-64
68	-1-2-3-4---45-46-47-48---17-18-19-20---53-54-55-56---33-34-35-36---9-10-11-12---61-62-63-64---25-26-27-28---41-42-43-44---5-6-7-8---49-50-51-52---21-22-23-24---57-58-59-60---13-14-15-16---37-38-39-40---29-30-31-32---65-66-67-68



Anexo C. Tabla P2: Resumen sellamiento dinamico en equipos criticos

			Empaquetadura			Secuencia			Tolerancia de fondo caja recomendado (mm)	Alternativa		Alternativa		Lubricacion
TAG	Equipo	Designacion	Dimension del perfil cuadrado (mm)	Dimension del perfil cuadrado (in)	Material	Interior	Anillo linterna	Exterior		Fabricante	Modelo	Fabricante	Modelo	
241-21064	Bomba	Bomba Nº 1 de alta presión agua sello	12.5	1/2	Fibras de PTFE + grafito	5	N/A	N/A	0.38	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Auto-lubricado
241-21065	Bomba	Bomba Nº 2 de alta presión agua sello	12.5	1/2	Fibras de PTFE + grafito	5	N/A	N/A	0.38	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Auto-lubricado
241-21091	Bomba	Bomba reforzadora agua planta	12.5	1/2	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.38	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-21101	Bomba	Bomba Nº1 de agua caliente al proceso	16	5/8	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.48	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-21102	Bomba	Bomba Nº2 de agua caliente al proceso	16	5/8	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.48	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-21105	Bomba	Bba. Agua caliente a condensador primario	16	5/8	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.48	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-21106	Bomba	Bomba Nº1 agua caliente al proceso	12.5	1/2	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.38	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-21107	Bomba	Bomba agua caliente al lavado de mallas	16	5/8	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.48	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-21108	Bomba	Bomba Nº2 agua tibia al proceso	16	5/8	Fibras de PTFE + grafito	2	20 mm	2	0.48	ICP	916	Sinsef	PG 101 T	Externa - Agua sello
241-57045	Separador	Separador Superior del impregnador	25.4	1	Fibras de carbono + grafito	2	50 mm	3	0.76	ICP	912	Garlock	Estilo 98	Externa - Agua sello
241-26032	Transportador	Alimentador de baja presion	22	7/8	Fibras de carbono + grafito	7	N/A	N/A	0.66	ICP	912	Garlock	Estilo 98	N/A
241-26026	Transportador	Medidor de astillas	19	3/4	Fibras de carbono + grafito	8	N/A	N/A	0.57	ICP	912	Garlock	Estilo 98	N/A
241-26027	Transportador	Alimentador de baja presion	25.4	1	Fibras de carbono + grafito	2	42 mm	2	0.76	ICP	912	Garlock	Estilo 98	Externa - Agua sello
241-26028	Transportador	Vaporizador de astillas	19	3/4	Fibras de carbono + grafito	4	N/A	N/A	0.57	ICP	912	Garlock	Estilo 98	N/A
241-26047	Transportador	Dispositivo de salida del impregnador	22	7/8	Fibras de carbono + grafito	7	N/A	N/A	0.66	ICP	912	Garlock	Estilo 98	N/A
241-26056	Transportador	Dispositivo de descarga del digestor	25.4	1	Fibras de carbono + grafito	7	N/A	N/A	0.76	ICP	912	Garlock	Estilo 98	N/A

(*) Largo de referencia. Debe ser ratificado en terreno, siguiendo el procedimiento adecuado de corte.
(**) Tolerancia de referencia, aplicando el la regla del 3% del perfil de la empaquetadura.
(***) Si la instalacion del anillo linterna no aplica (N/A), entonces se asume que no hay secuencia, por lo tanto solo se considera una unica cantidad de anillos en el interior.

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo C. Tabla P1: Resumen sellamiento estatico en equipos criticos

TAG	Designacion	Fluido	Ubicación de la union	Condicion	Perno			Empaquetadura						Metodo analitico					
					Medida	Calidad	Cant.	Medida	Tipo	Alternativa		Alternativa		% Sp	Nsep	Ny	Nf	T rec (lb-ft)	T rec (N-m)
241-22022	Deposito de astillas	Astillas y vapor	Manhole	Atmosferico	1 x 3.5 in	Gr. 5	20	724 x 615 x 3.2 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3591	45	167.1	2.3	N/A	362	490
241-22100	Estanque de agua caliente	Agua caliente	Manhole	Atmosferico	0.75 x 3 in	Gr. 5	28	724 x 615 x 3.2 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3592	45	108.2	2.3	N/A	146	198
241-22104	Estanque de agua tibia	Agua tibia	Manhole	Atmosferico	0.75 x 3 in	A325	28	724 x 615 x 3.2 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3593	45	115.0	2.3	N/A	146	198
241-22184	Tk. alimentacion de condensado	Cond. contaminado	Manhole	Atmosferico	0.5 x 2.5 in	A193 Gr B8M	20	565 x 513 x 3.2 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3594	43	63.4	2.3	N/A	44	58
241-22170	Tk. de licor negro al filtro	Licor negro	Manhole	Atmosferico	0.75 x 3 in	Gr. 5	28	718 x 615 x 3.2 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-457	Garlock	HTC 9850	45	100.5	2.3	N/A	146	198
241-22175	Tk. reactor licor blanco ox. N°1	Licor blanco	Manhole	Atmosferico	0.75 x 3 in	Gr. 8	28	690 x 615 x 3.2 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-457	Garlock	HTC 9850	34	144.9	3.0	N/A	156	212
241-22186	Tk. reactor licor blanco ox. N°2	Licor Blanco	Manhole	Atmosferico	0.75 x 3.25 in	A193 Gr B8	28	735 x 615 x 3.2 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-457	Garlock	HTC 9850	42	89.8	2.5	N/A	144	196
241-22140	Tk. de condensado contaminado	Cond. Cont. y CNCG	Manhole	Atmosferico	1 x 5 in	Gr. 5	20	700 x 615 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-457	Garlock	HTC 9850	45	68.3	2.4	N/A	362	490
241-51176_1	Columna stripper (inferior)	Cond. Cont. y vahos	Manhole	Atmosferico	0.75 x 2.5 in	A193 Gr B8M	28	635 x 520 x 3.2 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3594	44	232.9	2.4	N/A	144	196
241-51176_2	Columna stripper (superior)	Cond. Cont. y vahos	Manhole	Atmosferico	0.75 x 2.5 in	A193 Gr B8M	28	635 x 520 x 3.2 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3594	44	310.0	2.4	N/A	144	196
241-22160	Tk. de condensado contaminado	Cond. contaminado	Manhole	Atmosferico	1 x 6 in	Gr. 8	20	690 x 615 x 1.6 mm	Plancha PTFE + barita	Chesterton	ECS-W	Garlock	Gylon 3594	34	30.5	3.0	N/A	386	522
241-23036	Estanque de nivel	Licor blanco y negro	Manhole	Presurizado	0.75 x 4 in	Gr. 5	24	640 x 615 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-457	Garlock	HTC 9850	45	14.3	1.9	1.5	146	198
241-23059	Estanque Flash N°1	Licor negro y vahos	Manhole	Presurizado	0.75 x 4.5 in	A193 Gr B7	24	645 x 595 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-458	Garlock	HTC 9851	43	11.4	2.2	1.2	158	214
241-23060	Estanque Flash N°2	Licor negro y vahos	Manhole	Presurizado	0.75 x 4.5 in	Gr. 5	24	645 x 595 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-459	Garlock	HTC 9852	45	10.6	2.0	1.5	146	198
241-23095	Estanque Flash N°3	Licor negro y vahos	Manhole	Presurizado	0.75 x 4.5 in	Gr. 5	24	645 x 595 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-460	Garlock	HTC 9853	45	10.6	2.0	1.5	146	198
241-57077	Trampa de licor N°1	Vapor de alivio (vahos)	Manhole	Presurizado	0.75 x 5 in	Gr. 5	24	645 x 595 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-461	Garlock	HTC 9854	45	12.4	2.1	1.6	146	198
241-57096	Trampa de licor N°2.	Vapor de alivio (vahos)	Manhole	Presurizado	0.75 x 5 in	Gr. 5	24	645 x 595 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-462	Garlock	HTC 9855	45	12.4	2.1	1.6	146	198
241-26031	Chute de astillas al AAP	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	1 x 3 in	Gr. 8	16	635 x 520 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-463	Garlock	HTC 9856	34	42.2	3.1	1.6	386	522
241-51046_8	Deposito de impregnacion (8° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-464	Garlock	HTC 9857	45	7.4	2.0	1.4	366	498
241-51046_6	Deposito de impregnacion (6° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-465	Garlock	HTC 9858	45	7.2	2.0	1.4	366	498
241-51046_3	Deposito de impregnacion (3° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-466	Garlock	HTC 9859	45	6.2	1.9	1.4	366	498
241-51055_8	Digestor Continuo (8° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-467	Garlock	HTC 9860	45	10.2	2.1	1.4	366	498
241-51055_7	Digestor Continuo (7° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-468	Garlock	HTC 9861	45	9.2	2.1	1.4	366	498
241-51055_6	Digestor Continuo (6° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-469	Garlock	HTC 9862	45	8.5	2.1	1.4	366	498
241-51055_2	Digestor Continuo (2° piso)	Astillas y licor	Manhole	Presurizado	M24 x 140 mm	8.8	24	710 x 620 x 1.6 mm	Plancha carbon+ nitrilo	Chesterton	E-470	Garlock	HTC 9863	45	6.9	2.0	1.4	366	498
241-73320	Valvula de succion de bba. 21053	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 8 in	Gr. 5	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	49	33.3	1.7	1.8	582	790
241-73321	Valvula de descarga de bba. 21053	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 7 in	Gr. 5	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	49	33.3	1.7	1.8	582	790
241-73125	Valvula calentador de licor MCC N°1	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 203 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	42.9	2.2	1.2	626	850
241-73322	Valvula calentador de licor MCC N°1 B	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 203 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	42.9	2.2	1.2	626	850
241-73121	Valvula entrada calent. licor MCC N°3	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 190 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	42.9	2.2	1.2	626	850
241-73323	Valvula salida calent. licor MCC N°3	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 190 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	42.9	2.2	1.2	626	850
241-73126	Valvula calentador de licor MCC N°2 A	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 203 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	42.9	2.2	1.2	626	850
241-73127	Valvula calentador de licor MCC N°2 B	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 165 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	42.9	2.2	1.2	626	850
241-73324	Valvula calentador de licor MCC N°2 C	Licor negro	Brida	Presurizado	M30 x 203 mm	8.8	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	38	48.5	2.0	1.4	708	962
241-73325	Valvula by-pass calent. cambio sentido	Licor negro	Brida	Presurizado	0.875 x 6 in	Gr. 5	12	10.38 x 9.19 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	48	30.2	1.7	1.7	262	356
241-73123	Valvula by-pass calentadores flujo	Licor negro	Brida	Presurizado	M24 x 152 mm	8.8	16	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	50	52.7	1.7	1.6	408	554
241-73358	Valvula entrada circulacion digestor	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6.5 in	Gr. 5	12	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	50	27.2	1.6	2.1	402	544
241-73328	Valvula entrada calentador licor lavado	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 6.5 in	Gr. 5	12	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	49	21.3	1.6	2.2	582	790
241-73247	Valvula salida calentandor licor lavado	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 7.5 in	Gr. 5	12	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	49	21.3	1.6	2.2	582	790
241-73189	Valvula entrada digestor retrolavado	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 5.5 in	Gr. 5	16	16 x 14.63 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	71	19.6	1.1	5.0	570	774
241-73329	Valvula salida digestor retrolavado	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 5.5 in	Gr. 5	16	16 x 14.63 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	71	19.6	1.1	5.0	570	774
241-73330	Valvula manual de FIC 069	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6 in	Gr. 5	16	10.38 x 9.19 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	48	45.2	1.7	1.7	386	522
241-73326	Valvula MCC superior	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 7.5 in	Gr. 5	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	49	36.7	1.6	1.8	582	790
241-73327	Valvula MCC inferior	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 7.5 in	Gr. 5	16	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	49	40.9	1.7	1.8	582	790
241-73331	Valvula extraccion a ciclones	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6.5 in	Gr. 5	12	10.38 x 9.19 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	34	34.5	2.4	1.2	274	370
241-73332	Valvula malla de ajuste B	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6.5 in	Gr. 5	12	10.38 x 9.19 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	34	34.5	2.4	1.2	274	370
241-73197	Valvula entrada digestor circulacion lavado	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 6 in	Gr. 5	12	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	36	29.6	2.2	1.4	428	580
241-73199	Valvula malla de lavado	Licor negro	Brida	Presurizado	1.125 x 6 in	Gr. 5	12	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	36	29.6	2.2	1.4	428	580
241-73224	Valvula drenaje descarga digestor	Licor negro	Brida	Presurizado	0.875 x 5 in	Gr 5	8	14.75 x 13.38 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	48	14.1	1.6	2.4	262	356
241-73333	Valvula boquillas horizontales digestor	Licor negro	Brida	Presurizado	0.625 x 3.5 in	Gr. 5	8	3.38 x 2.75 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	47	473.2	2.2	2.4	92	124
241-73216	Valvula boquillas verticales digestor A	Licor negro	Brida	Presurizado	0.625 x 4 in	Gr 5	4	3.38 x 2.75 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	47	122.6	2.0	1.7	92	124
241-73220	Valvula boquillas verticales digestor B	Licor negro	Brida	Presurizado	0.625 x 4 in	Gr 5	4	3.38 x 2.75 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	47	122.6	2.0	1.7	92	124
241-73334	Valvula boquillas horizontales impregnador	Licor negro	Brida	Presurizado	0.625 x 4 in	Gr. 5	8	3.38 x 2.75 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	47	473.2	2.2	2.4	92	124
241-73335	Valvula descarga bba. 21066	Licor negro	Brida	Presurizado	0.75 x 4 in	Gr. 5	8	5.88 x 5 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	50	84.3	1.9	1.7	162	220
241-73336	Valvula manual de FIC 078	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6 in	Gr. 5	16	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	50	47.1	1.7	1.7	402	544
241-73337	Valvula manual de HI 079	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 7 in	Gr. 5	16	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	50	42.2	1.7	1.7	402	544
241-73229	Valvula rastra digestor	Licor negro	Brida	Presurizado	0.75 x 4.5 in	Gr. 5	8	5.88 x 5 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	51	86.0	1.8	1.7	166	224
241-73319	Valvula succion bba. 21098	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6.5 in	Gr. 5	12	12.5 x 11.31 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	50	24.4	1.6	2.0	402	544
241-73300	Valvula malla superior impregnador	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6 in	Gr. 5	12	10.38 x 9.19 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	34	34.5	2.4	1.2	274	370
241-73338	Valvula malla inferior impregnador	Licor negro	Brida	Presurizado	1 x 6 in	Gr. 5	12	10.38 x 9.19 x 0.125 in	Espirometalica	Chesterton	E-252 CGI	Garlock	Flexseal RWI	34	34.5	2.4	1.2	274	370

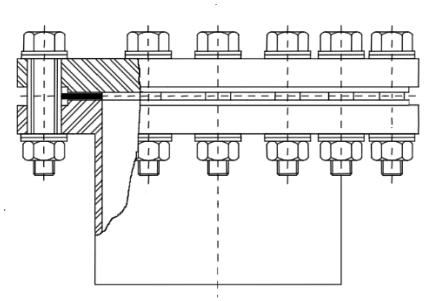
Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo C.5.1

Lista de chequeo para apertura y cierre de estanques o uniones bridadas

Fecha : _____
Orden mantenimiento : _____
Equipo / TAG : _____

Esquema del montaje


Ítem	Descripción	Chequeo	Observaciones
1	Inventario de riesgos – PPA – PTC – Evaluación de Entorno – EPP específicos.		
2	Comprobar drenaje del equipo.		
3	Verificar herramientas y materiales necesarios, juego de dados, llaves de impacto, llave dinamométrica, Htas. de medición y limpieza.		
5	Aflojar y remover 2 pernos inferiores, luego proseguir con sus opuestos (4 en total).		
6	Asegurar la unión de instalando 4 espárragos de seguridad con sus respectivas tuercas en lugar de los pernos.		
7	Remover el resto de los pernos, espárragos al final.		
8	Remover la empaquetadura y limpiar la superficie de asentamiento, pernos y tuercas.		
9	Lubricar la el roscado de cada perno y las superficies de contacto.		
10	Instalar la empaquetadura e instalar pernos de acuerdo a la secuencia de apriete.		
11	Cumplir con las rondas de torque y sus respectivas magnitudes (30%-60%-100%-100%)		
12	Si las condiciones lo permiten, realizar reapriete en caliente.		

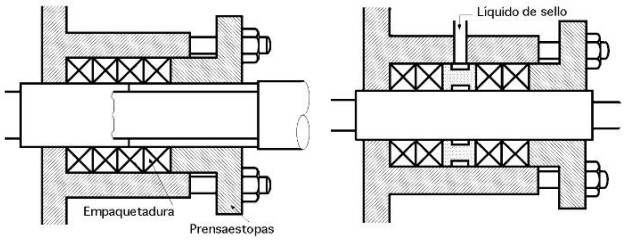
Nombre y firma Jefe / Supervisor / Líder

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile

Anexo C.5.2

Lista de chequeo para retiro e instalación de empaquetaduras para prensa estopa

Fecha : _____
Orden mantenimiento : _____
Equipo / TAG : _____

Esquema del montaje


Ítem	Descripción	Chequeo	Observaciones
1	Inventario de riesgos – PPA – PTC – Evaluación de Entorno – EPP específicos.		
2	Verificar calidad de la empaquetadura y esquema de sellamiento.		
3	Herramientas adecuadas de corte, apisonamiento, extractores flexibles, llaves, pie de metro, feeller de medición, limpiador desengrasante, entre otros.		
5	Extracción de empaquetaduras y anillo linterna (conservar empaquetaduras usadas)		
6	Limpieza de la zona de empaque, prensa estopa, espárragos y tuercas.		
7	Inspección zona de empaque, sistema de refrigeración y registros.		
8	Corte adecuado de nueva empaquetadura		
9	Lubricación de nueva empaquetadura		
10	Instalación de anillos (desfase de 90°) y anillo linterna (verificar posición)		
11	Asentamiento de anillos de empaquetadura		
12	Verificar presión del agua de sello.		
13	Apriete inicial manual de tuercas para asegurar la prensa estopa.		
14	Apretar tuercas de la prensa (1/6 cada 5 min) verificando la salida de fluido en servicio, hasta lograr el ajuste adecuado.		

Nombre y firma Jefe / Supervisor / Líder

Anexo C. Tabla P0: Resumen analisis de criticidad de valvulas manuales del area 241

Ubicación tecnica	Descripcion	FA	FS	FSUT	Codigo de impacto	IIO	IITE	IIP	IIP (Personas)	IIP (Medio ambiente)	IIP (Resp. Legal)	IIP (Publico)	IIP (Gestion)	IIP (Comunidad)	IISM	Matriz criticidad	Criticidad
CA02-241-HAB-051046-73300	VÁLVULA MALLA SUPERIOR IMPREGNADOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAB-051046-73330	VÁLVULA MANUAL DE FIC 069	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAB-051046-73334	VÁLVULA BOQUILLAS HORIZ. IMPREGNADOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAB-051046-73336	VÁLVULA MANUAL DE FIC 078	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAB-051046-73337	VÁLVULA MANUAL DE HI 079	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAB-051046-73338	VÁLVULA MALLA INFERIOR IMPREGNADOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73121	VÁLVULA ENTRADA CALENT. DE LICOR MCC N°3	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73123	VÁLVULA BY-PASS CALENTADORES FLUJO	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73125	VÁLVULA CALENTADOR DE LICOR MCC N°1	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73126	VÁLVULA CALENTADOR DE LICOR MCC N°2 A	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73127	VÁLVULA CALENTADOR DE LICOR MCC N°2 B	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73189	VÁLVULA ENTRADA DIGESTOR RETROLAVADO	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73197	VÁLVULA ENTR. DIGEST. CIRCULACION LAVAD	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73199	VÁLVULA MALLA DE LAVADO	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73216	VÁLVULA BOQUILLAS VERTICALES DIGESTOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73220	VÁLVULA BOQUILLAS VERTICALES DIGESTOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73224	VÁLVULA DRENAJE DESCARGA DIGESTOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73229	VÁLVULA RASTRA DIGESTOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73247	VÁLVULA SALIDA CALENT. LICOR LAVADO	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73319	VÁLVULA SUCCION BOMBA 241-21098	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73320	VÁLVULA SUCCION BOMBA 241-21053	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73321	VÁLVULA DESCARGA BOMBA 241-21053	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73322	VÁLVULA CALENTADOR DE LICOR MCC N°1	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73323	VÁLVULA SALIDA CALENT. DE LICOR MCC N°3	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73324	VÁLVULA CALENTADOR DE LICOR MCC N°2 C	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73325	VÁLVULA BY-PASS CALENT. CAMBIO SENTIDO	A	B	A	ABA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73326	VÁLVULA MCC SUPERIOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73327	VÁLVULA MCC INFERIOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73328	VÁLVULA ENTRADA CALENTADOR DE LICOR DE L	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73329	VÁLVULA SALIDA DIGESTOR RETROLAVADO	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73331	VÁLVULA EXTRACCION A CICLONES	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73332	VÁLVULA MALLA DE AJUSTE B	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73333	VÁLVULA BOQUILLAS HORIZONTALES DIGESTOR	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73335	VÁLVULA DESCARGA BOMBA 241-21066	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K
CA02-241-HAC-051055-73358	VÁLVULA ENTR. DIGESTOR DE CIRCULACION MC	A	A	A	AAA	5	4	3	2	3	1	1	2	1	4	5;4	K

Universidad del Bío-Bío. Sistema de Bibliotecas - Chile