

**DISEÑO DE CABEZA DE INYECCIÓN DE GRASA
PARA EQUIPO DE CONTROL DE PRESIÓN**



CURRO, Federico Andrés

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2021

DISEÑO DE CABEZA DE INYECCIÓN DE GRASA PARA EQUIPO DE CONTROL DE PRESIÓN

CURRO, Federico Andrés

Director: Ing. **CAMPOS, Damián**

Co-director: Ing. **KASWALDER, Edwin**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

2021

DISEÑO DE CABEZA DE INYECCIÓN DE GRASA PARA EQUIPO DE CONTROL DE PRESIÓN

CURRO, Federico Andrés

Aprobado en fecha 15 de Diciembre de 2021

Tribunal evaluador:

- Mg. Ing. KEIL, Germán.
- Dr. Ing. STEIMBREGER, Ceferino.
- Ing. MAZZONI, José Luis.

AGRADECIMIENTOS

Hoy culmina una de las etapas mas importantes de mi vida, y esto no hubiese sido posible sin la participación de muchas personas e instituciones.

En primer lugar quiero agradecer a Damián Campos, mi tutor, por un lado por guiarme y aconsejarme durante la elaboración de este trabajo y, mas importante aún, por el acompañamiento brindado en los últimos años de la carrera. También deseo darle las gracias a Edwin Kaswalder, quien me abrió las puertas de su empresa para poder realizar este proyecto y siempre estuvo predispuesto a transmitirme sus conocimientos.

A la Universidad Nacional del Comahue, donde hoy culmino mis estudios, y a la Universidad Tecnológica Nacional donde los comencé hace muchos años atrás. Especialmente a todos los profesores que contribuyeron con su conocimiento y sabiduría a mi formación profesional y personal.

A mi familia, por el cariño, la educación y el apoyo que me han dado, inculcándome los valores de responsabilidad, respeto y trabajo.

A mis amigos y compañeros que me acompañaron durante este camino.

Pero, por sobre todo, a Romina, mi esposa, mi amiga y mi compañera, quien me brindó su ayuda, soporte y amor. Sin su apoyo, este trabajo nunca se habría escrito y, por eso, este logro también es suyo.

A todos, muchas gracias.

DISEÑO DE CABEZA DE INYECCIÓN DE GRASA PARA EQUIPO DE CONTROL DE PRESIÓN

Autor: CURRO, Federico Andrés.

Director: Ing. CAMPOS, Damián.

Co-Director: Ing. KASWALDER, Edwin.

Resumen

Este trabajo surge a partir de la propuesta, por parte de una Empresa de la región, para la fabricación y certificación de equipos de control de presión utilizados comúnmente en intervenciones de pozos de petróleo. El alcance del mismo queda restringido únicamente al diseño de una cabeza de inyección de grasa.

El desarrollo del proyecto comienza con la definición de las especificaciones técnicas en función de la identificación de las necesidades del cliente y los requerimientos normativos específicos. Luego, se realiza el cálculo y dimensionamiento de los componentes principales, y su posterior verificación empleando modelos de elementos finitos. En la parte final, se proporcionan los lineamientos a seguir para la fabricación de los componentes y su control de calidad.

Con el objetivo de validar el diseño, se fabricó un equipo sobre el cual se realizaron todos los ensayos de aceptación, y se evaluaron los niveles de esfuerzos empleando técnicas extensométricas.

Los resultados obtenidos permitieron generar la documentación necesaria para iniciar el proceso de certificación del equipo y sentar las bases para que la Empresa pueda habilitar una nueva unidad de negocios de acuerdo a los objetivos planteados.

Palabras clave: equipo de control de presión, diseño mecánico, certificación

DESIGN OF GREASE INJECTION HEAD FOR WELLHEAD EQUIPMENT

Author: CURRO, Federico Andrés.

Advisor: Ing. CAMPOS, Damián.

Co-Advisor: Ing. KASWALDER, Edwin.

Summary

This work arises from the proposal from a local company, for the manufacturing and certification of pressure control equipment, commonly used in oil wells interventions. The scope of this work is restricted only to the design of a grease injection head.

The development of the project begins with the definition of the technical specifications, in correspondence with the identification of the client's needs and the specific standard requirements. Then, the calculation and sizing of the main components are done, and its posterior verification, applying finite element models. In the final part, the guidelines for component fabrication and quality control are provided.

With the object of validating the design, equipment about which all acceptance tests were done and the stress levels were evaluated applying experimental extensometer techniques, was manufactured.

The results obtained enable the generation of documentation needed in order to initialize the equipment's certification process and lay the groundwork for the company to enable a new business unit according to the proposed objectives.

Keywords: pressure control equipment. mechanical design, certification

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	2
3. MARCO TEÓRICO	2
3.1. Equipo de control de presión	2
3.2. Cabeza de inyección de grasa	5
3.3. Metodología de proyecto	8
3.3.1. Especificaciones técnicas	9
3.3.2. Aplicación y desempeño	10
3.3.3. Selección y certificación del material	12
3.3.4. Diseño Mecánico	15
3.3.5. Fabricación y control de calidad	27
3.3.6. Validación	32
4. DESARROLLO	33
4.1. Especificaciones del producto	33
4.2. Aplicación y desempeño	33
4.3. Materiales	34
4.4. Diseño mecánico	36
4.4.1. Definición de la geometría	36
4.4.2. Verificación de los componentes	40
4.5. Fabricación y Control de Calidad	53
4.5.1. Control de calidad	54
4.5.2. Fabricación	58
4.6. Validación	63
4.7. Análisis de Costos	64
5. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	67
6. CONCLUSIONES	68

7. REFERENCIAS	69
A. DIMENSIONES GENERALES	71
B. MEMORIA DE CALCULO	71
B.1. Terminología	71
B.2. Verificación estructural de la unión roscada	72
B.3. Verificación estructural del bloque	79

Índice de Figuras

1.	Equipo de control de presión típico (Schlumberger, 2013).	3
2.	Cabeza de inyección de grasa (Corte longitudinal).	5
3.	Perfil de presión a través de los tubos de flujo.	7
4.	Metodología de proyecto basada en API 6A.	9
5.	Proceso de análisis de resultados según API 6X.	20
6.	Ejemplo de SCP y SCL (ASME, 2013).	21
7.	Guía de selección para las SCL (ASME, 2013): (a) Ejemplo de orientación de SCL, (b) condiciones de tensiones circunferenciales y meridionales, (c) condición de tensión a través del espesor.	22
8.	Ejemplo de linealización de la tensión a través del espesor de pared del componente.	22
9.	Evaluación de la resistencia del componente a partir de las tensiones locales (FKM, 2012).	24
10.	Ejemplo de marcado de componente.	31
11.	Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 en función de la temperatura de revenido adoptada (IAS, 1987).	35
12.	Equipo de inyección de grasa: 1. Cupla, 2. Tubo de flujo, 3. Camisa, 4. Cuerpo cupla de inyección, 5. Acople, 6. Tornillos de montaje, 7. Bloque de inyección.	36
13.	Dimensiones características de la cupla y la camisa.	37
14.	Dimensiones características para el diseño de superficies de sello con o-rings (Parker, s.f.).	38
15.	Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa sometido a presión interna (Budynas y Nisbett, 2012).	39
16.	Análisis por elementos finitos del cuerpo cupla de inyección.	42
17.	Trazado de SCL para el cuerpo cupla de inyección.	43
18.	Tensiones linealizadas del cuerpo cupla de inyección.	44
19.	Tensiones triaxiales del cuerpo cupla de inyección.	45
20.	Análisis por elementos finitos de la cupla.	46

21.	Trazado de SCL para cupla.	47
22.	Tensiones linealizadas de la cupla.	47
23.	Tensiones triaxiales de la cupla.	47
24.	Dimensiones características de la rosca (ASME, 1997)	49
25.	Análisis por elementos finitos de la unión roscada.	51
26.	Análisis por elementos finitos del bloque cupla de inyección.	52
27.	Proceso de fabricación y Control de Calidad.	53
28.	Diagrama de asignación de números de trazabilidad.	55
29.	Formulario de aceptación del material.	56
30.	Formulario de aceptación de pieza terminada (Caso de aplicación: Camisa).	57
31.	Formulario de aceptación de pieza terminada (Caso de aplicación: Cami- sa).	58
32.	Componentes fabricados.	59
33.	Ensayo de Líquidos penetrantes.	60
34.	Disposición general del ensayo.	61
35.	Registro de presión durante el ensayo hidrostático.	62
36.	Posición de las galgas extensométricas.	63
37.	Esquema del sistema de adquisición y procesamiento de datos.	63
38.	Incidencia relativa de los costos en la fabricación del primer lote de pro- ducción.	65
39.	Incidencia relativa de los costos de fabricación de diez equipos.	66
40.	Algoritmo de cálculo FKM para evaluación de resistencia estática utili- zando tensiones locales.	74
41.	Sección representativa del bloque para obtener d_{eff}	80

Índice de Tablas

1.	Clases de Temperatura.	11
2.	Requerimientos y clases de material.	12
3.	PSL mínimo.	12
4.	Requerimientos de propiedades de materiales estándar.	13
5.	Límites de concentración del acero [% en masa].	13
6.	Límites de concentración de fósforo y azufre [% en masa].	14
7.	Presión de prueba [psi].	31
8.	Análisis de composición química.	34
9.	Propiedades mecánicas.	35
10.	Verificación contra colapso plástico: cuerpo cupla de inyección.	43
11.	Verificación contra colapso plástico: cupla.	45
12.	Tensiones camisa [MPa]	48
13.	Resultados de ensayo de extensometría.	64

1. INTRODUCCIÓN

Los equipos de presión utilizados en la industria del petróleo tienen la función de mantener la presión del pozo mientras se realizan trabajos dentro del mismo. Todos los equipos deben cumplir altos estándares de calidad, debido a que comúnmente trabajan a presiones muy altas, en un rango entre 15 000 y 30 000 psi, y con fluidos contaminantes, lo que implica que ante cualquier falla o fuga se genere un escenario peligroso para las personas y el medio ambiente.

En consecuencia, el Instituto de Petróleo Americano (API, por sus siglas en inglés) creó la norma API 6A ([API, 2019a](#)), la cual brinda requerimientos mínimos para asegurar los estándares de calidad en la fabricación y ensayo de estos equipos. Un equipo con certificación API le garantiza al comprador que éste alcanza un estándar industrial específico. La certificación debe ser entregada por un agente de certificación reconocido, independiente del fabricante, lo que le asegura al usuario que todos los requerimientos han sido efectivamente cumplidos.

Para que el equipo alcance la calificación requerida, los agentes de certificación entregan dos tipos de certificados:

- El Certificado de Revisión Independiente (IRC, por sus siglas en inglés): establece que todos los requerimientos de diseño han sido alcanzados.
- El Certificado de Conformidad (COC, por sus siglas en inglés): establece que la pieza fue fabricada y controlada conforme al IRC, y por ende a la norma.

En la actualidad, aproximadamente el 90 % del equipamiento disponible es producido por un reducido número de marcas, principalmente originarias de Estados Unidos y Canadá, las cuales poseen una acreditada trayectoria en el mercado.

En nuestro país, la situación macroeconómica actual plantea una coyuntura que requiere implementar medidas tendientes a favorecer la sustitución de importaciones. En virtud de esta necesidad, una empresa regional propone la fabricación y certificación de equipos de presión de acuerdo a los requerimientos específicos dados por la norma API 6A. Dicha empresa posee acreditados antecedentes en el mantenimiento, inspección y operación de equipos de presión en la cuenca neuquina.

2. OBJETIVO

Objetivo general

Este trabajo tiene como objetivo el diseño de una cabeza de inyección de grasa para un equipo de control de presión.

Objetivos específicos

- Diseño del componente.
- Fabricación del prototipo funcional.
- Validación experimental.
- Generación de documentación para certificación según API 6A.

3. MARCO TEÓRICO

A continuación, se desarrollan los considerandos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento del equipo bajo estudio, el marco normativo de aplicación y la metodología que guió el desarrollo de este trabajo.

3.1. Equipo de control de presión.

Al momento de realizar tareas de mantenimiento en pozos, resulta de vital importancia la instalación y operación de sistemas y equipos de control de presión, dado que estas actividades deben realizarse con el nivel de seguridad requerido, reduciendo al mínimo los riesgos de un accidente o de un impacto adverso al entorno ([Poggesi y col., 2017](#)).

Durante las mencionadas operaciones, se baja una herramienta por dentro del pozo con distintas funciones (punzado, perfilado, limpieza, entre otras) que cuelga de un cable con capacidad para transmitir datos (*wireline*), un alambre (*slickline*) o una tubería flexible (*coiled tubing*).

La necesidad de utilizar un Equipo de Control de Presión (ECP) surge cuando se requiere efectuar una intervención en un pozo activo o potencialmente activo, o en uno que

tenga presión inducida en superficie. Se considera activo a un pozo que tiene presión en cabeza, es decir, en la superficie.

El ECP (ver Figura 1) proporciona un medio seguro para entrar y salir de un pozo durante su intervención, manteniendo el control del mismo en todo momento. Este tipo de equipos se encuentra disponible en diversos tamaños y capacidades, y es seleccionado de acuerdo a la necesidad específica de cada tipo de trabajo.

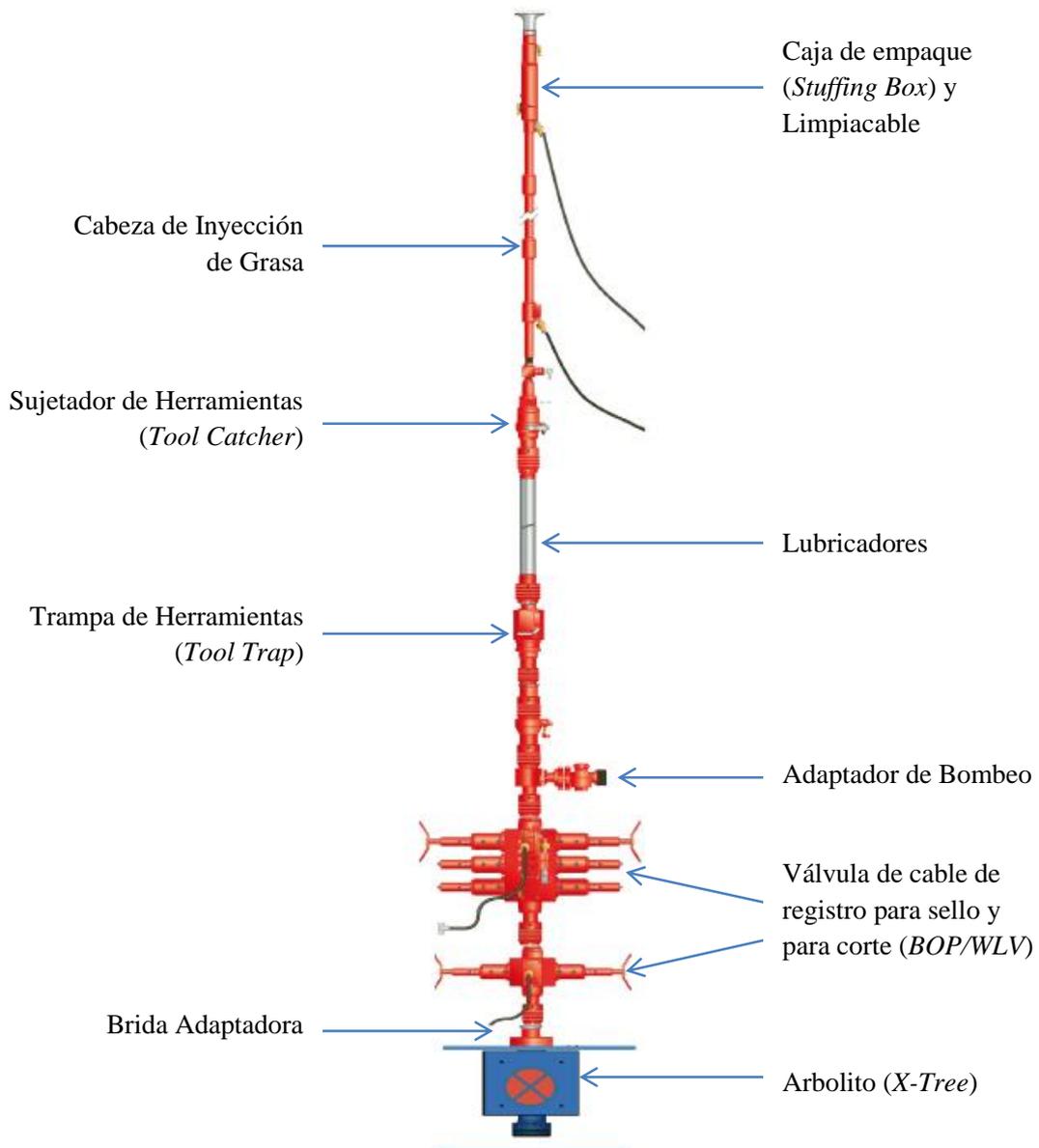


Figura 1. Equipo de control de presión típico (Schlumberger, 2013).

A continuación, se describe brevemente la función de cada uno de los componentes principales de un ECP utilizado en operaciones de *Wireline*:

- Arbolito (*X-Tree*): conjunto de válvulas y bridas que se instala por sobre la boca del pozo. Permite controlar el flujo desde y hacia el pozo. Cualquier herramienta que ingrese o se extraiga del mismo pasará por el arbolito. El ECP está conectado a la parte superior del arbolito a través de un adaptador.
 - Brida adaptadora: se conecta al pozo mediante su parte inferior por medio de una conexión bridada o roscada (en pozos de muy baja presión) y al ECP por medio de una conexión rápida. Tiene la función de proveer un acople rápido al ECP.
 - Adaptador de Bombeo: su función principal es la de permitir el control del pozo bombeando fluido hacia el interior del mismo, inyectando un gran caudal de fluido. También se utiliza para proporcionar una vía de desahogo rápida.
 - Válvula de cable de registro (BOP/WLV): comúnmente denominada BOP (*Blow Out Preventer*) o WLV (*Wire Line Valve*). Está diseñada para proporcionar una barrera de seguridad controlable durante situaciones de emergencia. Permite reparar el cable, sellando la presión por debajo de la válvula, sin dañarlo.
 - Trampa de herramientas (*Tool Catcher*): tiene la función de evitar que se caiga la sarta de herramientas al fondo del pozo en caso de que se desprenda de la cabeza del cable en superficie.
 - Lubricador: se construye a partir de secciones de tubería de pared gruesa, con uniones rápidas en sus extremos que facilitan su montaje con los demás componentes del ECP, ubicándose sobre la válvula BOP con las herramientas alojadas en su interior. Durante su operación, se presuriza el equipo hasta la presión del pozo, se abre el árbol de válvulas y se ingresen las herramientas al pozo. Para retirarlas, se utiliza el proceso inverso, las herramientas se posicionan dentro del lubricador (estando este a la presión del pozo), se cierra el árbol de válvulas y se libera la presión del lubricador.
 - Sujetador de Herramientas (*Tool Trap*): este dispositivo está diseñado para sujetar la sarta de herramientas en el lubricador desde su extremo superior. El sistema de
-

enganche soporta el peso de la sarta e impide que caiga al pozo a menos que se libere manualmente.

- Caja de empaque (*Stuffing Box*): ayuda a contener la presión del pozo en el caso que se pierda el sello de grasa. Se cierra mediante un accionamiento hidráulico, apretando un sello de goma contra el cable.
- Limpiacable: tiene la función de limpiar la grasa sobre el cable cuando este sale del pozo.
- Cabeza de Inyección de Grasa: tiene la función de proveer un sello dinámico, basado en la alta viscosidad de la grasa, que permita mover el cable durante la operación.

En concordancia con los objetivos del presente trabajo, en el siguiente apartado, se describe en detalle la cabeza de inyección de grasa.

3.2. Cabeza de inyección de grasa

Este componente, evita que la presión del pozo se libere a la atmósfera y, al mismo tiempo, permite el libre movimiento del cable de registro. La presión se controla mediante un sello dinámico creado por una grasa viscosa, la cual es bombeada a través del pequeño espacio anular entre el cable de registro y los tubos de flujo. Se compone, principalmente, de un conjunto de tubos de flujo conectados entre sí mediante cuplas (ver Figura 2).

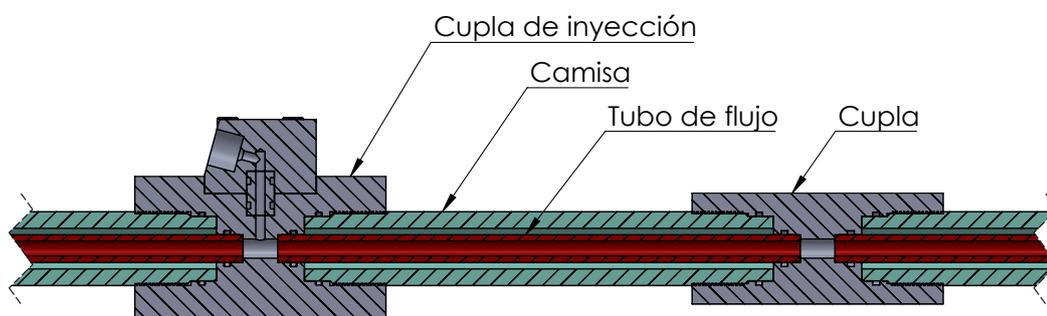


Figura 2. Cabeza de inyección de grasa (Corte longitudinal).

Los tubos concéntricos tienen una camisa externa y un tubo interno conocido como el tubo de flujo o inserto, el cual es ligeramente más largo y se inserta dentro de las cuplas de la cabeza de inyección de grasa, donde es sellado con un *o-ring* en ambos extremos.

La camisa del tubo de flujo asegura la resistencia mecánica del conjunto, mientras que el mismo tubo es el que contiene la grasa alrededor del cable de registro. La camisa también es sellada por un *o-ring* en las cuplas, para controlar la presión en caso de que falle el sello del inserto.

Los tubos deben adaptarse al tamaño del cable de registro que se utiliza, teniendo en consideración cualquier desgaste de dicho cable. En efecto, existe una selección de tubos para cada tamaño de cable. El supervisor de la operación debe decidir qué tamaño de tubo es el más apropiado para el cable. Los cables van cambiando de diámetro durante su vida útil, ya sea por desgaste, estiramiento u óxido. De producirse una variación en el diámetro del cable, sólo se debe cambiar el inserto, mientras que la camisa es común a todos los diámetros.

Una bomba externa proporciona grasa presurizada al puerto más cercano al extremo inferior del sistema de tubos de flujo (ver Figura 3). La presión del pozo mantiene la grasa en el tubo, si existiese una presión cero en el pozo, la grasa fluiría hacia abajo y hacia afuera por el extremo del tubo inferior. En la práctica, se pierden pequeñas cantidades de grasa en ambos extremos, particularmente cuando el cable está en movimiento, pero tanto la presión del pozo como los fluidos del mismo son contenidos, dado que esta presión no es suficiente para desplazar la grasa en este espacio anular.

Los tubos de flujo pueden sellar la presión del pozo debido a la resistencia que ejerce el flujo de un fluido viscoso al pasar a través de una restricción. La caída de presión entre dos puntos ΔP está dada por la ecuación de Couette (Schlumberger, 2013):

$$\Delta P = \frac{6 L \mu Q}{R_c h^3} \quad (1)$$

Donde L es la longitud del tubo de flujo, μ la viscosidad del fluido, h la holgura entre el cable y el tubo de flujo, R_c el radio del cable y Q el caudal de grasa inyectada.

A partir de la Ecuación 1, se obtiene que la capacidad de sello aumenta cuando disminuye el espacio entre el cable de registro y el diámetro interno del tubo de flujo. No obstante, es necesario contar con algún espacio para compensar variaciones en el diámetro externo del cable y, controlar la fricción y el desgaste. Asimismo, se observa que una mayor longitud de tubos permite controlar una cantidad de presión mayor.

La cantidad de tubos a utilizar se calcula durante la operación en función de la presión

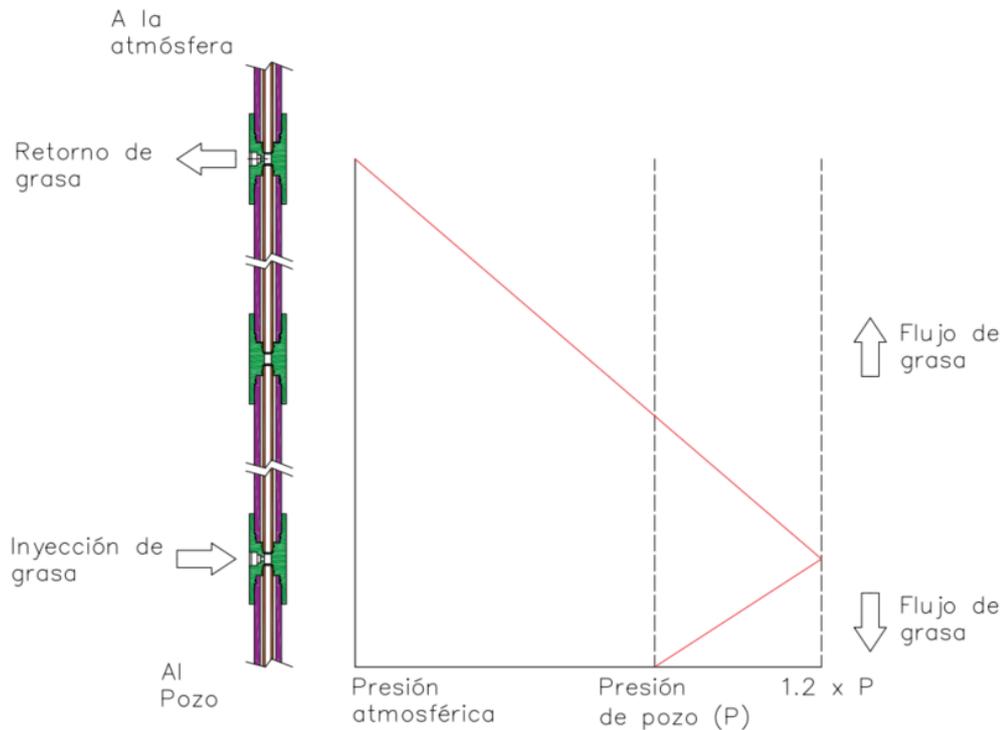


Figura 3. Perfil de presión a través de los tubos de flujo.

a la que está operando el pozo. La grasa se inyecta a una presión 20 % superior a la del pozo en superficie. De esta forma, los tubos de flujo ubicados por debajo de la inyección deben ser suficientes para que se produzca esa caída de presión, mientras que los tubos por encima deben ser suficientes para reducir la presión de inyección hasta la presión atmosférica.

La cantidad de tubos a utilizar depende de la presión a la que esté trabajando el pozo. En la práctica, las dimensiones de los mismos están estandarizadas, por lo que se puede estimar en forma rápida la caída de presión en cada tubo siempre y cuando se utilice la grasa apropiada. En función de la geometría y el tipo de grasa, se estima que la pérdida de presión es de 2 000 psi en líquido, y 1 500 psi en gas.

Por lo tanto, se puede calcular el número de tubos de flujo necesarios encima del punto de inyección según la Ecuación 2, teniendo en cuenta que la inyección de grasa se hace con una presión 20 % superior a la del pozo, y que la caída total de presión debe ser hasta la atmosférica. Este número de tubos se redondea al valor superior.

$$\text{Número de tubos de flujo}_{\text{encima}} = \frac{1,2 \text{ MEWHP}}{\Delta P} \quad (2)$$

Donde MEWHP es la máxima presión esperada en el pozo y ΔP es la caída de presión en cada tubo.

Por otro lado, la cantidad de tubos que deben colocarse por debajo del punto de inyección deben ser los suficientes para producir una caída de presión desde la presión de inyección hasta la presión del pozo (ecuación 3).

$$\text{Número de tubos de flujo}_{\text{debajo}} = \frac{0,2 \text{ MEWHP}}{\Delta P} \quad (3)$$

Cabe destacar que estas fórmulas son aproximadas, dado que existen factores que afectan el rendimiento de la cabeza de inyección, entre los que se debe mencionar: la naturaleza de la grasa, la temperatura, la velocidad del cable, la naturaleza de los fluidos del pozo, entre otros. Por este motivo, siempre es más seguro utilizar tubos de flujo en exceso. Si la longitud del tubo de flujo no es adecuada, el consumo de grasa se incrementa resultando muy difícil, y hasta prácticamente imposible, establecer un sello.

3.3. Metodología de proyecto

Para la fabricación de componentes destinados a la industria del petróleo, se requiere satisfacer las especificaciones y recomendaciones dadas en diversos estándares internacionales, teniendo como objetivo final cumplimentar satisfactoriamente el proceso de certificación.

En este trabajo, se adoptaron los requisitos de diseño, fabricación y control de calidad dados por la norma API 6A (API, 2019a). En base a estos lineamientos, se desarrolló una metodología de proyecto (ver Figura 4) que presenta seis etapas principales:

- Especificaciones Técnicas.
 - Aplicación y Desempeño.
 - Materiales.
 - Diseño Mecánico.
 - Fabricación y Control de Calidad.
 - Validación.
-

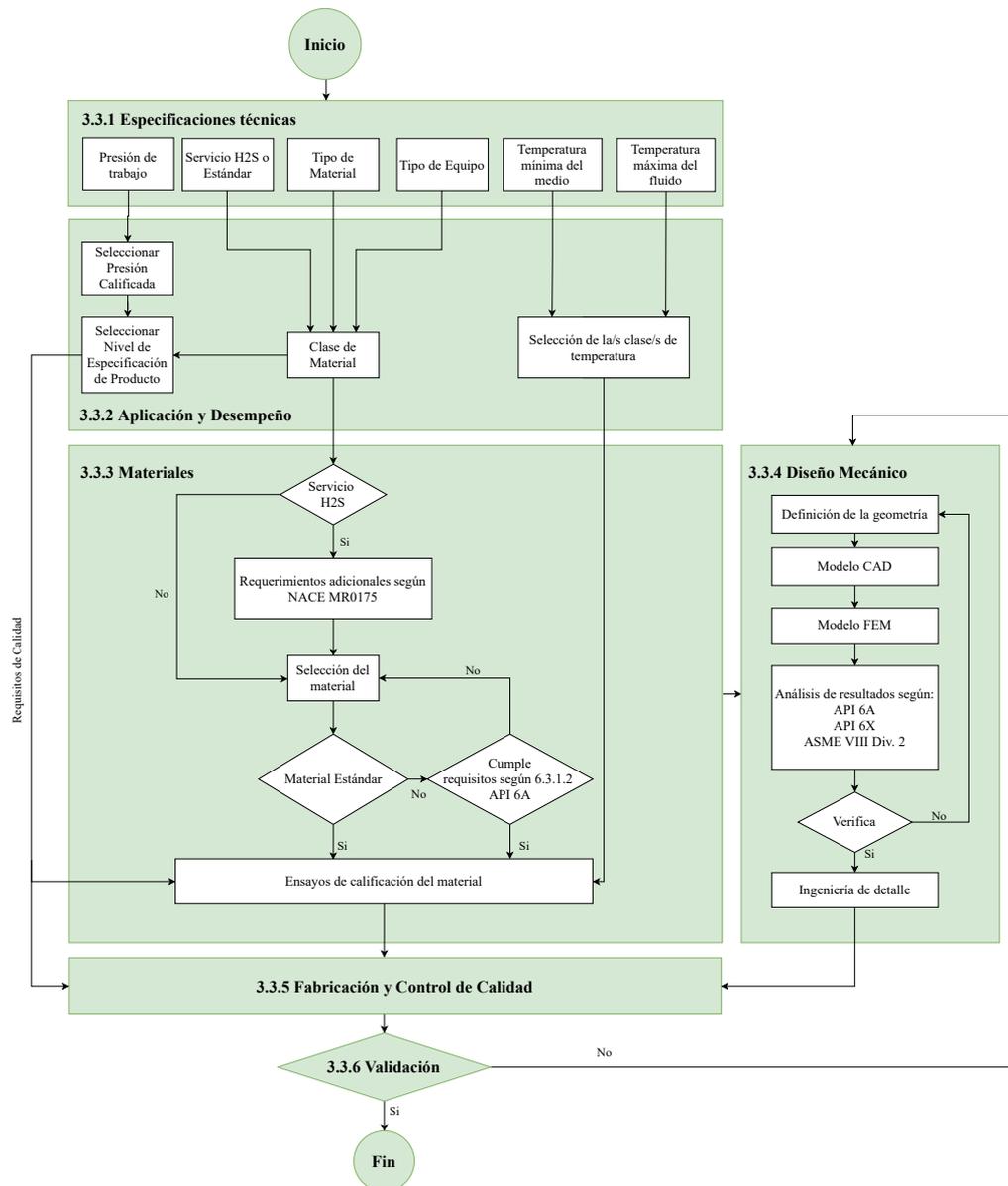


Figura 4. Metodología de proyecto basada en API 6A.

3.3.1. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas establecen, con detalles precisos y medibles, lo que el producto tiene que hacer (Ulrich y Eppinger, 2015). En general, se obtienen a partir de distintas fuentes como pueden ser:

- Identificación de las necesidades del cliente.
- Análisis de productos similares (*benchmarking*).
- Patentes.

- Literatura específica.
- Requisitos normativos mandatorios ([API, 2019a](#)).

Es de especial interés, en campos de aplicación tan específicos como el caso bajo estudio, la opinión de usuarios líderes. Estos son aquellos usuarios calificados y clientes que presentan necesidades con anticipación a la mayor parte del mercado y están alertas a beneficiarse de sus innovaciones.

3.3.2. Aplicación y desempeño

En esta parte del proyecto, se establece el nivel de requerimientos bajo el cual va a estar certificado el equipo. A tal fin, se debe tener en cuenta: el tipo de componente o equipo y las condiciones en las que va a prestar servicio de acuerdo a:

1. Requerimiento de *performance*

El requerimiento de *performance* se selecciona en función del tipo de equipo y de la severidad del servicio a prestar. La norma define dos grados:

- **PR1:** es el nivel básico de ensayos y diseño, de acuerdo con las especificaciones de material, temperatura y presión.
- **PR2:** es un procedimiento de diseño y validación de mayor nivel, el cual puede ser requerido por el cliente en algunas oportunidades. Este incluye aplicar procedimientos de ensayo específicos, como ciclos de presión y temperatura. En general el nivel PR2 se aplica a válvulas y otros equipamientos específicos.

2. Clasificación de presión

La presión de trabajo del equipo debe estar comprendida dentro de la clasificación por categorías que establece la norma, estas son:

- 13,8 MPa (2 000 psi).
 - 20,7 MPa (3 000 psi).
 - 34,5 MPa (5 000 psi).
-

- 69,0 MPa (10 000 psi).
- 103,5 MPa (15 000 psi).
- 138,0 MPa (20 000 psi).

3. Clases de temperatura

El equipo debe ser diseñado para operar en una o más de las clases de temperatura, las cuales se muestran en la Tabla 1. La temperatura mínima, es la menor temperatura ambiental donde el equipo puede operar y la máxima temperatura corresponde a la mayor temperatura que puede alcanzar el fluido en contacto con el equipo.

Tabla 1. Clases de Temperatura.

Clase de Temperatura	Rango de Temperatura [°C]	
	min.	max.
K	-60	82
L	-46	82
N	-46	60
P	-29	82
S	-18	60
T	-18	82
U	-18	121
V	2	121

4. Clase de Material

La norma API 6A agrupa los materiales en clases. Define siete clases de material que especifican los requerimientos mínimos de material para servicio general o H₂S como se muestra en la Tabla 2. El equipo debe ser diseñado, probado y marcado como satisfactorio para una de estas Clases de Material.

Ahora bien, siempre que un equipo opere en un pozo que contenga H₂S se deben tomar recaudos especiales. Al seleccionar una clase que opere en servicio H₂S se debe cumplir con los requerimientos de propiedades de material dados en la norma NACE MR0175/ISO 15156 (NACE, 2015).

5. Nivel de especificación del producto

Tabla 2. Requerimientos y clases de material.

Clase de Material API	Cuerpos, Bonetes, Conexiones de salida y Extremos	Componentes controladores de presión, vástagos y colgadores
AA Servicio General	Acero al Carbono o Baja Aleación	Acero al Carbono o Baja Aleación
BB Servicio General	Acero al Carbono o Baja Aleación	Acero Inoxidable
CC Servicio General	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
DD Servicio H2S	Acero al Carbono o Baja Aleación	Acero al Carbono o Baja Aleación
EE Servicio H2S	Acero al Carbono o Baja Aleación	Acero Inoxidable
FF Servicio H2S	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
HH Servicio H2S	Aleación Resistente a la Corrosión	Aleación Resistente a la Corrosión
ZZ Servicio H2S	Definido por el usuario	Definido por el usuario

El nivel de especificación del producto (PSL por sus siglas en inglés) establece los requerimientos mínimos de control de calidad que deben aplicarse durante la fabricación de los componentes. La norma establece el nivel mínimo que debe seleccionarse en función de la clase de material y la presión de trabajo, tal como muestra la Tabla 3.

En las etapas siguientes del proyecto, el grado PSL indica los requerimientos mínimos de calidad que deben ser alcanzados para la certificación.

Tabla 3. PSL mínimo.

Clase de Material	Presión de trabajo especificada					
	13,8 MPa (2 000 psi)	20,7 MPa (3 000 psi)	34,5 MPa (5 000 psi)	69,0 MPa (10 000 psi)	103,5 MPa (15 000 psi)	138,0 MPa (20 000 psi)
AA, BB, CC	PSL 1	PSL 1	PSL 1	PSL 2	PSL 3	PSL 3
DD, EE, FF	PSL 1	PSL 1	PSL 1	PSL 2	PSL 3	PSL 3
HH, ZZ	PSL 3	PSL 3	PSL 3	PSL 3	PSL 3	PSL 4

3.3.3. Selección y certificación del material

De acuerdo al procedimiento dado por la norma, para seleccionar un material, se deben especificar los siguientes requerimientos y criterios de aceptación:

- Propiedades Mecánicas.
- Calificación del Material.
- Procedimiento de tratamiento térmico.
- Composición química.

- Requerimientos de ensayos no destructivos.
- Método de procesamiento.

Los materiales se clasifican en estándar y no estándar, a partir de esta distinción se definen los requerimientos de calificación del material:

- Materiales estándar: Son aquellos que cumplen con los requisitos de propiedades mecánicas indicados en la Tabla 4.
- Materiales no estándar: Este tipo de materiales no alcanzan los requisitos dados en la Tabla 4, para los cuales la norma define una serie de requisitos extra (ver apartado 6.3.1.2 de API 6A (API, 2019a)).

Tabla 4. Requerimientos de propiedades de materiales estándar.

Designación del material	S_Y [MPa]	S_u [MPa]	A [%]	Z [%]
36K	248	483	21	Sin requerimiento
45K	310	483	19	32
60K	414	586	18	35
75K	517	655	17	35

La composición química del material elegido (con sus tolerancias) debe estar especificada por el fabricante del equipo y debe cumplir con los límites establecidos en la Tabla 5, en la cual sólo se incluyen los requerimientos de aceros al carbono y de baja aleación, de interés en este trabajo. Los límites de composición de fósforo y azufre dependen del PSL, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 5. Límites de concentración del acero [% en masa].

Elemento de Aleación	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Límite de Composición	0,45	1,8	1	*	*	1	2,75	1,5	0,3

En el caso de que la clase de material seleccionada sea DD, EE, FF o HH (servicio H2S), el material también debe cumplir con los requerimientos de la norma NACE MR0175 (NACE, 2015) para el procesamiento y propiedades del material. Dicha norma especifica una lista de materiales o familias de materiales permitidos y requerimientos

Tabla 6. Límites de concentración de fósforo y azufre [% en masa].

Nivel de Especificación de Producto (PSL)	Límite de Composición	
	Fósforo (P)	Azufre (P)
PSL 1	0,040 max.	0,040 max.
PSL 2	0,040 max.	0,040 max.
PSL 3	0,025 max.	0,025 max.
PSL 4	0,015 max.	0,010 max.

de propiedades mecánicas en función de la concentración de H_2S presente en la locación de trabajo. El equipo debe ser marcado según la presión parcial de H_2S para la cual está calificado o simplemente como servicio H_2S si es apto para operar con concentraciones superiores a 0,3 kPa.

El cumplimiento de estas condiciones garantiza un adecuado comportamiento frente a mecanismos de daño asociados a corrosión bajo tensión por la presencia de sulfuros (SSCC) y a la fragilización por hidrógeno (HE).

Una vez definido el material a utilizar, se especifican los ensayos necesarios para su calificación. La cantidad y tipo de ensayos dependen del PSL adoptado, el tipo de conformado (forjado, soldado, fundido) y de las clases de temperatura para las cuales se desea calificar. El cupón debe ser tomado después del tratamiento térmico y debe pertenecer a la misma colada y lote de tratamiento que el material utilizado en la fabricación del equipo. Los ensayos que deben hacerse sobre el material antes de su maquinado son:

- Ensayo de tracción: el ensayo debe realizarse a temperatura entre 4°C y 50°C, según ASTM A370 (ASTM, 2016). El resultado debe satisfacer los requisitos de la Tabla 4 para la designación seleccionada.
- Ensayo de impacto: se deben realizar tres ensayos a una temperatura inferior a la mínima de la clase de temperatura seleccionada, según ASTM A370 (ASTM, 2016). El criterio de aceptación está dado por los siguientes requisitos:
 - El valor promedio de energía absorbida debe superar los 27 J.
 - Ningún valor individual de energía absorbida debe ser inferior a 18 J.
 - Se acepta sólo un valor de energía absorbida por debajo de 27 J.

- Ensayo de dureza: la dureza mínima debe ser de 197 HB, la medición se realiza según ASTM E10 ([ASTM, 2018](#)).
- Ensayo no destructivo volumétrico: se debe realizar un ensayo de ultrasonido o radiográfico al tocho de material, después del tratamiento térmico y antes del maquinado.

3.3.4. Diseño Mecánico

El proceso de diseño mecánico incluye la definición de la ingeniería básica, la verificación estructural y la ingeniería de detalle de cada uno de los componentes. A continuación, se describen cada una de las etapas contempladas:

Definición de la geometría

El diseño de componentes mecánicos pretende encontrar la configuración óptima de los mismos de acuerdo con sus requerimientos funcionales. Dicha configuración comprende la topología, forma y dimensiones del componente. En este sentido, la forma geométrica del componente, sus dimensiones y el material deben satisfacer ciertos requisitos de resistencia, rigidez y comportamiento dinámico. Estos factores determinarán la capacidad de carga del elemento.

La resolución de problemas de diseño parte de la definición de un problema y su desarrollo se apoya en el planteo y solución de una gran cantidad de preguntas.

Un método de análisis se apoya en la experiencia. Esta forma de trabajo tiene la ventaja de que el diseño previo ha trabajado satisfactoriamente y ofrece un punto seguro de partida para el nuevo diseño. Tiene la desventaja de que bloquea cualquier pensamiento creativo.

Un segundo método está basado únicamente en cargas, permitiendo al diseñador usar su habilidad creativa completamente. Además, los modelos numéricos disponibles para realizar su análisis permiten determinar secciones más eficientes.

En este trabajo, las dimensiones generales de cada componente se obtienen a partir del análisis de productos similares disponibles en el mercado y, aplicando la teoría de resistencia de materiales clásica, se definen las secciones resistentes. Una vez definidas las dimensiones principales, se realiza un modelo CAD, el cual puede ser utilizado para la

verificación mediante herramientas más precisas, como los modelos de elementos finitos.

Verificación estructural

Una vez definidas las dimensiones de los componentes, se debe verificar que los mismos sean aptos para el funcionamiento en las condiciones de trabajo.

Durante la operación, el equipo no está expuesto solo a presión interna (presión de pozo) sino también a esfuerzos externos producto de factores como el viento, tiro del cable, peso propio del equipo, entre otros. En general, los distintos criterios propuestos por API simplifican la determinación de las cargas al aplicar una presión de prueba 50 % mayor a la de trabajo.

La norma API 6A indica los requisitos para la verificación estructural, esta debe cumplir con uno o más de los siguientes criterios:

1. **Norma API 6X:** esta norma describe una metodología de análisis para el diseño de ciertos productos sometidos a presión interna y equipamiento de la industria del gas y petróleo. Los métodos incluidos, aplican a diseños cuyas normativas referencien a esta norma (como es el caso de API 6A). Los métodos están de acuerdo con las reglas del Apéndice 4 del código *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2004, Section VIII, Division 2*, adoptando límites de resistencia ligeramente distintos. El criterio utilizado asume un comportamiento del material dúctil y libre de defectos. El análisis de fatiga queda fuera del alcance de esta norma.

Este criterio es de especial interés para este trabajo, debido a que permite evaluar los resultados obtenidos mediante un análisis de elementos finitos. En la Sección [3.3.4](#) se explica con mas detalle la metodología de verificación.

2. **Teoría de la energía de distorsión:** los cálculos de diseño del equipo de presión deben estar conforme al criterio de falla de Von Mises. El efecto de las discontinuidades y los concentradores de tensión exceden el alcance de este método. De todos modos, el espesor básico de pared puede ser dimensionado mediante los esfuerzos triaxiales durante un ensayo de presión hidrostática y limitado por el criterio:

$$S_E = S_Y \quad (4)$$

Donde:

- S_E : es la tensión equivalente de Von Mises, en la sección mas tensionada de la pared del recipiente.
- S_Y : es la resistencia a la fluencia mínima especificada del material.

3. **Análisis de esfuerzos experimental:** si se emplea como alternativa a las dos anteriores, debe estar conforme a ASME BPVC:2004 con las adendas de 2005 y 2006, Sección VIII, División 2, Apendice 6.

Metodología API 6X

La metodología de diseño aplicada en este trabajo, se basa en API 6X ([API, 2019b](#)) y el código ASME VIII Div. 2 ([ASME, 2013](#)), y las recomendaciones dadas por [Sanzi \(2016\)](#) y [Kocurek y col. \(2012\)](#). Los productos verificados según esta norma deben ser evaluados para cada uno de los siguientes modos de fallo:

- Colapso plástico.
- Falla localizada.
- Fatiga de bajo ciclo y distorsión progresiva.
- Corte puro.
- Capacidad de servicio.

Quedan fuera del alcance de este trabajo las verificaciones por fatiga de bajo ciclo y distorsión progresiva. El código ASME VIII Div. 2 ([ASME, 2013](#)) especifica que este tipo de análisis no es requerido como parte del diseño, siempre que se tenga una experiencia sobre equipos comparables sujetos a un histograma de cargas similares y sobre un marco temporal prolongado, y que durante su vida útil, el componente no supere los 10^6 ciclos de carga.

Verificar la capacidad de servicio implica asegurar que la funcionalidad del producto sea satisfecho durante el servicio y el ensayo hidrostático. Como criterio general, se

aplicó la observación de equipos con funciones similares y se verificarán las soluciones adoptadas mediante pruebas de funcionamiento.

Se pueden utilizar distintos métodos de análisis mediante elementos finitos, cada uno de los cuales tienen las siguientes características (ASME, 2013):

- Método de análisis elástico: los esfuerzos son calculados utilizando un análisis elástico, clasificados en categorías y limitados a valores admisibles que han sido establecidos conservativamente para que no se produzca el colapso plástico.
- Método de la carga límite: se realiza un cálculo para determinar un límite inferior a la carga límite de un componente. La carga admisible en el componente se establece aplicando factores de diseño a la carga límite de manera que no ocurra la aparición de grandes deformaciones plásticas (colapso plástico).
- Método de análisis elastoplástico: la carga de colapso es calculada considerando la carga aplicada y las características de deformación del componente. La carga admisible del componente es establecida aplicando factores de diseño para la carga de colapso plástico.

El método de análisis elástico tiene un bajo costo computacional en relación con los otros dos. Este modelo está limitado por las tensiones máximas admisibles establecidas por la normativa. En caso de ser superadas, debe utilizarse uno de los otros dos modelos elastoplásticos expuestos. Por otro lado, los límites requeridos para el modelo elástico son conservativos, lo cual puede llevar al sobredimensionamiento del componente.

El modelo elástico no puede ser aplicado en aquellos casos que los valores de tensión sean superiores a la tensión de fluencia en una región cuya dimensión mayor supere el 5 % del espesor. En este caso el resultado puede no ser conservativo.

Siguiendo con la metodología, el análisis se realiza calculando la tensión equivalente de Von Mises a partir de las tensiones obtenidas en el análisis de elementos finitos según la ecuación 5.

$$S_E = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x\sigma_y - \sigma_y\sigma_z - \sigma_x\sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (5)$$

Donde:

- σ_x , σ_y y σ_z son los componentes del esfuerzo normal en el punto de interés.
- τ_{xy} , τ_{yz} y τ_{zx} son los componentes del esfuerzo de corte.

A continuación, se presentan los valores admisibles de referencia, que define la norma para la verificación de la protección frente a los diversos modos de falla.

- Tensión admisible de diseño (S_m):

$$S_m = \frac{2}{3}S_Y \quad (6)$$

- Tensión general primaria de membrana admisible máxima durante el ensayo de presión hidrostático (S_t):

$$S_t = 0,9S_Y \quad (7)$$

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos se verifican los resultados según el criterio de API 6X. Un diagrama simplificado de este proceso se muestra en la Figura 5.

Protección contra colapso plástico

Para evaluar la protección contra el colapso plástico, el resultado obtenido debe ser categorizado y comparado con valores límites asociados. Las tres categorías básicas de tensión equivalente son:

- Tensión primaria de membrana general (P_m): es la tensión primaria equivalente promedio a través del espesor de una sección producida solo por presión interna y otras cargas mecánicas especificadas, excluyendo las discontinuidades y concentraciones.
- Tensión primaria de membrana local (P_L): su definición es igual a P_m , salvo que se incluyen las discontinuidades y concentraciones.

- Tensión primaria de flexión (P_b): es la componente de la tensión primaria proporcional a la distancia a partir de la superficie media del sólido, producida solo por presión interna y cargas mecánicas especificadas, excluyendo las discontinuidades y concentraciones.
- Tensión secundaria más flexión (Q): tensión auto-equilibrada necesaria para satisfacer la continuidad de la estructura. Se produce en las discontinuidades debido a la presión interna y las cargas mecánicas. Se excluyen de estas las concentraciones locales.
- Tensión pico (F): es utilizada para la verificación por fatiga, y contempla el incremento sobre la tensión primaria o secundaria debido a una entalla.

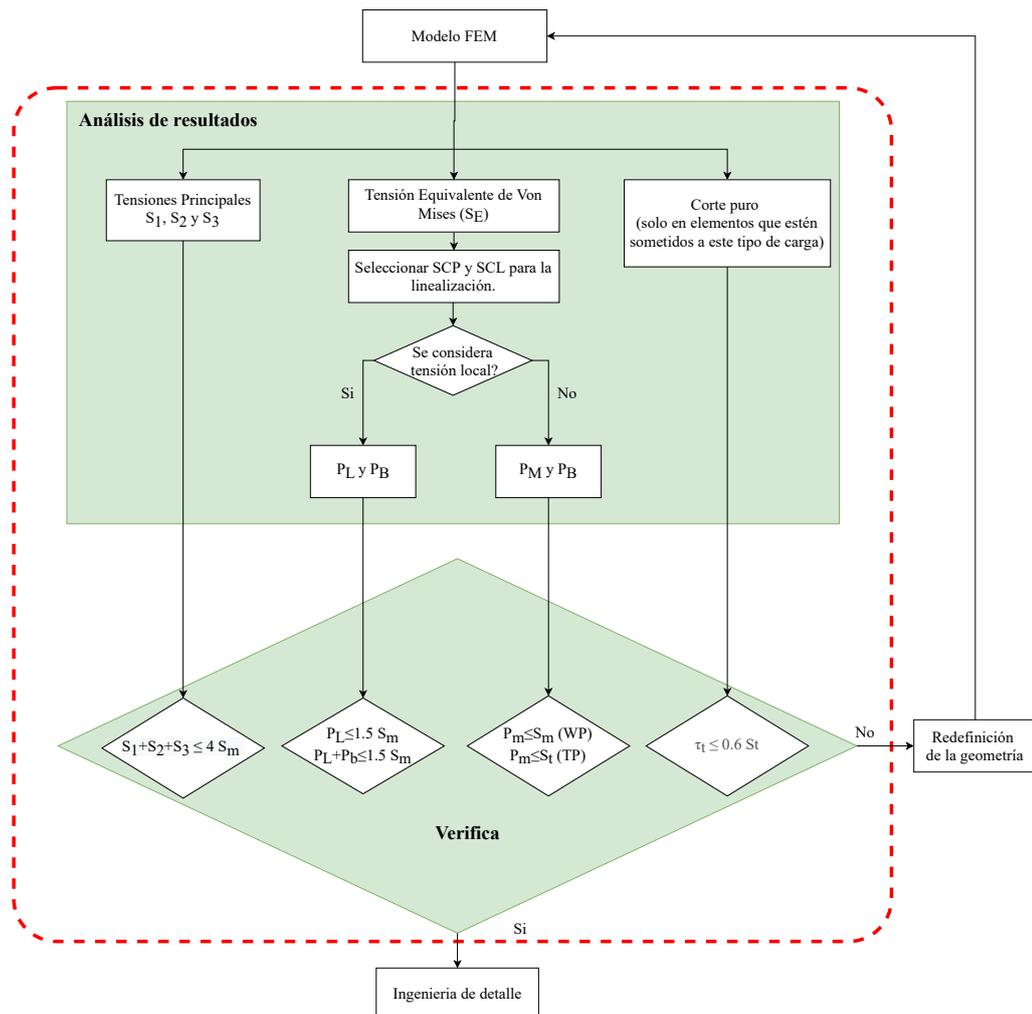


Figura 5. Proceso de análisis de resultados según API 6X.

Las componentes de la tensión antes mencionadas se obtienen mediante un proceso denominado linealización de tensiones a partir de los resultados de tensión equivalente obtenidos en el modelo de elementos finitos. Este procedimiento involucra integración numérica de los componentes de la tensión para separar las componentes de tensión de membrana y de flexión de la tensión total. La tensión total incluye la tensión pico. El procedimiento de linealización se desarrolla según el código ASME VIII (ASME, 2013).

Las tensiones de membrana y de flexión se desarrollan en secciones transversales a través del espesor del componente, estas secciones se llaman planos de clasificación de tensiones (SCP, por sus siglas en inglés). Luego sobre ese plano, se trazan rectas llamadas líneas de clasificación de tensiones (SCL, por sus siglas en inglés). La Figura 6 muestra un ejemplo de SCP y SCL sobre un recipiente a presión. Los SCP y las SCL deben ser tomadas de forma que cubran todas las regiones y zonas críticas de la geometría analizada.

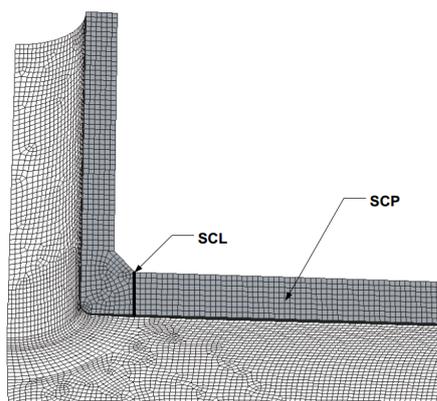


Figura 6. Ejemplo de SCP y SCL (ASME, 2013).

Para la evaluación de fallas locales, típicamente se colocan las SCL sobre las discontinuidades estructurales. Con el fin de obtener resultados más precisos (los cuales se compararán con los límites de tensión elásticos), se deberían respetar las siguientes pautas en lo posible:

- La SCL se debe orientar normal a la superficie del componente con la mayor tensión. Si esto se dificulta, debería orientarse normal a la superficie media de la sección transversal (ver Figura 7a).
- Las componentes de tensión meridionales o circunferenciales a lo largo de una SCL deben ser monótonamente crecientes o decrecientes (ver Figura 7b).

- La distribución de esfuerzos en la dirección del espesor debe ser monótonamente creciente o decreciente (ver Figura 7c).

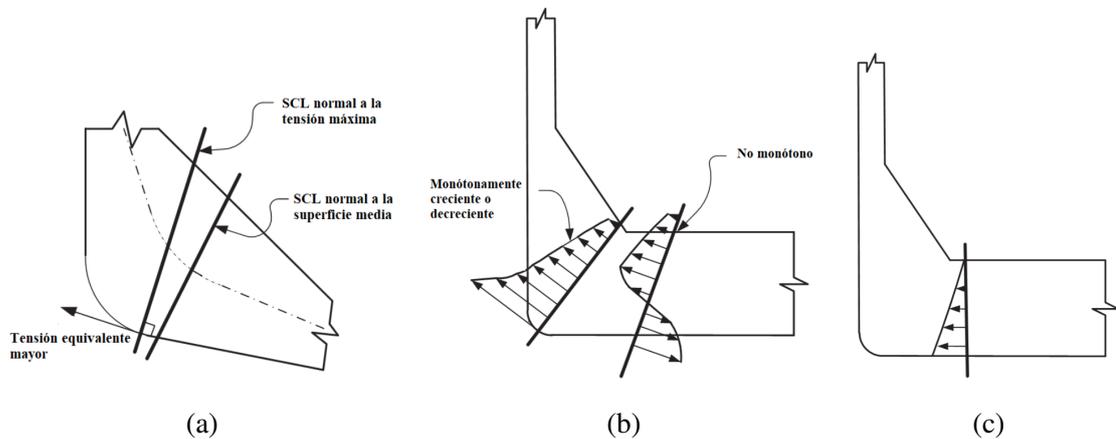


Figura 7. Guía de selección para las SCL (ASME, 2013): (a) Ejemplo de orientación de SCL, (b) condiciones de tensiones circunferenciales y meridionales, (c) condición de tensión a través del espesor.

La Figura 8 muestra un ejemplo de linealización. A partir del modelo de elementos finitos se obtiene un perfil de tensiones a través de una SCL (curva roja) y a partir de esta se obtienen la tensión primaria de membrana P_m (recta violeta) y la tensión primaria de flexión. La recta verde representa $P_m + P_b$.

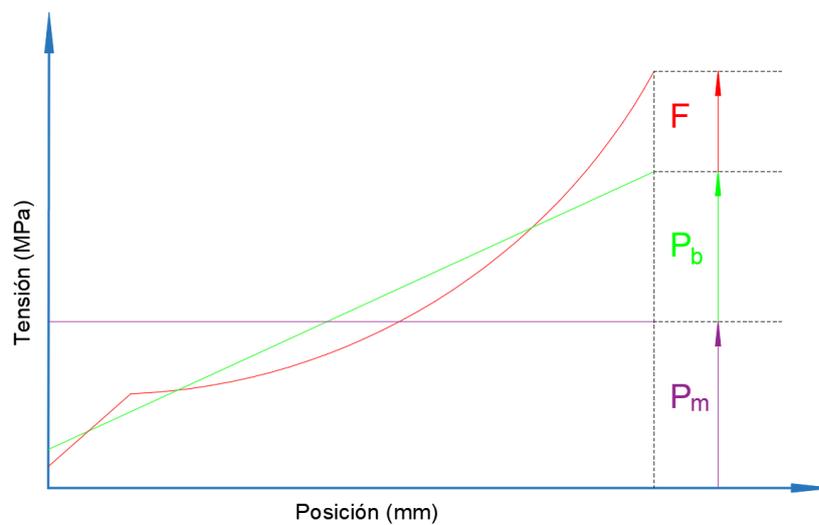


Figura 8. Ejemplo de linealización de la tensión a través del espesor de pared del componente.

Dependiendo de la localización de la SCL, se considera que las tensiones son de membrana o locales. Se considera tensión local, según el caso de estudio de (Miranda y col., 2011), cuando la sección se encuentra a una distancia d de una discontinuidad, tal que:

$$d \leq 2\sqrt{r_m t}$$

Donde r_m es el radio medio y t el espesor.

Los esfuerzos secundarios y pico son utilizados para la verificación de los componentes a la fatiga y distorsión progresiva, que como se explicó precedentemente, no son aplicables a este trabajo.

Una vez obtenidos los valores de las tensiones primarias P_m , P_b y P_L según sea necesario para cada SCL, éstos deben ser comparados con los valores mínimos de aceptación según la norma API 6X para la verificación a colapso plástico en los siguientes casos:

1. Si la tensión es de membrana:

$$P_m \leq S_m \quad (8)$$

2. Si la tensión es local:

$$P_L \leq 1,5S_m \quad (9)$$

$$P_L + P_b \leq 1,5S_t$$

En el caso de tensiones locales, la norma no especifica las condiciones en las que se debe evaluar el componente, por lo cual esta verificación se lleva a cabo en condiciones de ensayo hidrostático ya que es el caso más desfavorable.

Protección contra fallas localizadas

A partir del análisis de elementos finitos se obtienen las tensiones principales σ_1 , σ_2 y σ_3 . Luego, para verificar la protección contra fallas localizadas se debe cumplir el criterio expresado en la ecuación 10.

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq 4S_m \quad (10)$$

Corte puro

Solo debe ser verificado para secciones bajo condiciones de operación a corte puro (por ej. chavetas y roscas). La tensión de corte primaria promedio en condiciones de ensayo hidrostático τ_t no debe exceder $0,6S_t$.

Metodología FKM

En los casos donde los componentes a verificar quedan fuera del alcance indicado por la norma API 6X, se recomienda la aplicación de la metodología dada por la guía FKM de cálculo, denominada: *Analytical Strength Assessment of Components* (FKM, 2012).

Esta guía FKM proporciona un algoritmo de cálculo para la verificación de componentes mecánicos. Permite realizar una evaluación tanto de las tensiones nominales como de las tensiones locales, las cuales se pueden determinar a partir de la teoría de la elasticidad lineal, por medio de soluciones analíticas, análisis de elementos finitos o a través de mediciones experimentales (por ejemplo, extensometría). En la Figura 9, se presenta el algoritmo de cálculo utilizado para la evaluación de resistencia estática de un componente empleando tensiones locales.

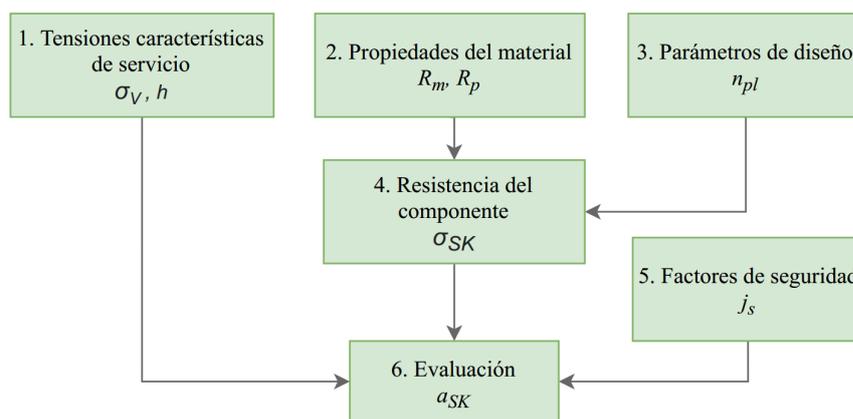


Figura 9. Evaluación de la resistencia del componente a partir de las tensiones locales (FKM, 2012).

A continuación, se da una breve descripción de cada paso del algoritmo descrito:

1. Tensiones características de servicio:

Con la implementación de un modelo de elementos finitos, se obtienen las tensiones principales (σ_1 , σ_2 y σ_3). En función del tipo de comportamiento que tenga el ma-

terial, con el que se fabrica el componente, se define el criterio de falla a partir del cual se obtiene la tensión equivalente (σ_V). Por ejemplo, para el caso de materiales dúctiles, se adopta el criterio de Von Mises.

Adicionalmente, se debe calcular el grado de multiaxialidad h , término que expresa la relación entre la tensión equivalente y la tensión hidrostática (σ_H).

2. Propiedades del material:

En este paso, se determinan la resistencia a la tracción (R_m) y a la fluencia (R_p) del material a partir de sus propiedades estándar. Dado que estas propiedades se obtienen a partir de ensayos de laboratorio, la resistencia real del material en servicio puede diferir.

Los factores que hacen disminuir la resistencia del material respecto de la estándar son el tamaño del material en bruto y su anisotropía. A medida que el material utilizado tiene mayor tamaño, respecto de la probeta de tracción, la resistencia es menor. En los materiales forjados, al tener una estructura direccional, poseen un grado de anisotropía en sus propiedades que incide en mayor grado a medida que aumenta su resistencia.

3. Parámetros de diseño:

Estos parámetros están relacionados con la geometría del componente, específicamente con los concentradores de tensión. El parámetro de diseño a calcular es el factor de sección (n_{pl}), que determina cuánto se puede exceder el límite de carga elástico permitiendo un cierto grado de plastificación local. Se define como el valor mínimo entre el factor de entalla plástico (K_p) y la deformación crítica (ϵ_{etr}).

El factor de entalla plástico está dado por la relación entre la carga límite plástica y la elástica. La primera se alcanza cuando, en un modelo elasto-plástico, una sección completa del componente alcanza la plastificación completa. Mientras que la carga límite elástica se alcanza cuando la tensión local en el punto de referencia alcanza la tensión de fluencia. Este factor está directamente relacionado con la geometría

del componente.

$$K_p = \frac{\text{Carga límite plástica}}{\text{Carga límite elástica}} \quad (11)$$

La deformación crítica depende de la elongación a la rotura (A) del material y del grado de multiaxialidad (h) del estado de tensiones en el punto de referencia.

En caso de analizarse una pequeña zona plástica rodeada de una gran zona elástica, se obtiene una carga límite plástica muy alta y, por lo tanto, un elevado factor de entalla. Entonces, en esta caso especial, el factor de sección se relaciona solo con la deformación crítica.

4. Resistencia del componente:

Es la tensión equivalente crítica, en el punto de referencia, y está dada por el producto entre la resistencia a la fluencia R_p y el factor de sección n_{pl} .

5. Factores de seguridad:

El factor de seguridad total j_{ges} se obtiene a partir de una serie de factores de seguridad que dependen del conocimiento del estado de carga en servicio, de las condiciones de seguridad que debe cumplir el equipo y de la temperatura. Este factor total se corresponde con una probabilidad de supervivencia del 97.5 %.

6. Evaluación

La evaluación se realiza calculando el grado de utilización (a_{SK}) a partir de la tensión equivalente, la resistencia del componente y el factor de seguridad total. Posteriormente, debe ser comparado con un valor de referencia que, para el caso de materiales dúctiles, es igual a 1. El grado de utilización indica el margen entre la tensión actual y la máxima tensión admisible en el punto de referencia.

Si la tensión en el punto de referencia tiene un alto grado de multiaxialidad ($h > 1,33$), se debe llevar a cabo también una evaluación contemplando la tensión hidrostática.

3.3.5. Fabricación y control de calidad

Una vez finalizada la etapa de diseño mecánico, incluyendo la ingeniería de detalle, se puede iniciar la etapa de fabricación del equipo. En este sentido, la norma API 6A especifica los requerimientos que se deben cumplir durante este proceso, con el objetivo de garantizar que el mismo se realizó cumpliendo todos los requisitos específicos.

Junto con el producto terminado, el cliente debe recibir una copia de todos los certificados obtenidos durante el proceso de fabricación. A continuación, se detallan los procedimientos que se deben generar para el aseguramiento de la calidad:

- Trazabilidad.
- Aceptación del material.
- Aceptación de pieza terminada.

Trazabilidad

La norma ISO 9000 (ISO, 2015) define a la trazabilidad como: *la capacidad para seguir el histórico, la aplicación o la localización de un objeto*. Para contar con dicha capacidad, se debe generar un procedimiento específico que facilite la codificación de los materiales y piezas en forma metódica y ordenada.

Durante el proceso de fabricación, es necesario asignar diferentes números de trazabilidad a los materiales y piezas. La norma API 6A exige que cada componente terminado debe ser marcado con un número de serie único que garantiza la trazabilidad del mismo desde la colada del acero, pasando por su mecanizado, ensayos, controles y tratamientos térmicos correspondientes.

Asegurar la trazabilidad nos permite conocer la historia completa de la pieza, de esta forma sería posible retirarla del mercado en el caso que se descubra cualquier vicio durante algún proceso de fabricación luego de terminada, e incluso entregada y puesta en funcionamiento.

Aceptación del material

La norma API 6A da una serie de requerimientos para el material de fabricación tanto en ensayos y propiedades como en la documentación necesaria para acreditarlos, los cuales fueron definidos en la Sección 3.3.3. En función de los mismos se deben generar procedimientos para determinar que todos estos controles se hayan llevado a cabo, y que toda la documentación requerida este disponible. De esta forma se garantiza la aptitud del material previo al inicio del proceso de fabricación.

La documentación mínima, asociada a la provisión del material, debe incluir:

- Certificado de colada: número de colada, método de fabricación y composición química.
- Certificado de tratamiento térmico: número de lote de tratamiento térmico, ciclos térmicos aplicados.
- Ensayos de propiedades mecánicas: resultados de ensayos de tracción, impacto y dureza.
- Ensayos No Destructivos (END): resultado de ensayo de ultrasonido.

Aceptación de la pieza terminada

Al finalizar el proceso de maquinado de las piezas, se deben verificar distintos aspectos que influyen en la calidad del producto. En función del nivel de especificación adoptado, se deben efectuar los siguientes procesos:

1. Control dimensional: dado que no se plantea, en primera instancia, un proceso de fabricación seriada, se debe realizar este control sobre las piezas según las tolerancias requeridas en los planos de detalle. En particular, se debe centrar la atención en las dimensiones críticas (uniones roscadas, alojamientos de sellos y cualquier otra dimensión característica que comprometa la intercambiabilidad entre las partes).
 2. Ensayo de tintas penetrantes: las cantidad de indicaciones relevantes y su tamaño deben estar dentro de la tolerancia indicada.
-

3. Marcado: una vez superados los controles anteriores, la pieza está lista para ser marcada y para la aplicación del tratamiento anticorrosivo. La realización de estos procesos debe ser registrada y se debe corroborar que cumplan los requisitos específicos.
4. Prueba de funcionamiento o hidrostática: para cada escalonamiento de presión, las caídas de presión se deben mantener (durante ciertos períodos de tiempo) por debajo del valor límite y sin evidencias de fugas.
5. Recubrimiento: la pintura se aplica una vez generada el requerimiento por parte del cliente, ya que queda a su elección el color que debe ser aplicado (comúnmente cada empresa adopta un color específico para identificar a sus equipos).
6. Embalaje: finalmente se embala y etiqueta según lo indicado en los procedimientos específicos.

Ensayo de tintas penetrantes

Los líquidos penetrantes poseen la propiedad de filtrarse a través de las discontinuidades que presentan los materiales basándose en la acción capilar, esta es la capacidad que poseen los líquidos de ascender y descender por dos paredes cercanas entre si. Al aplicarse sobre la superficie de la pieza, el líquido se introduce en pequeñas aberturas como pueden ser fisuras en el material. La superficie debe haber sido limpiada previamente con el objetivo de que las fisuras no se encuentren cubiertas por aceite, óxido o cualquier otra materia extraña ([Echeverría, 2003](#)).

Una vez cubierta toda la superficie con el líquido se debe dejar reposar, dándole tiempo para que penetre en las cavidades. Luego se limpia el excedente y se aplica el polvo revelador, el cual se tiñe con el líquido exponiendo las discontinuidades.

El criterio de aceptación, dado por la norma API 6A, es el siguiente:

- Ninguna indicación relevante con una dimensión principal mayor o igual a 5 mm.
 - No más de diez indicaciones relevantes en cualquier área continua de 40 cm².
 - No más de tres indicaciones redondas relevantes en una línea separadas por menos de 1.6 mm (borde a borde).
-

- No se deben evidenciar indicaciones lineales relevantes .
- Sin indicaciones relevantes en superficies sellantes en contacto con presión.

La determinación de la relevancia de una indicación la debe realizar un inspector calificado. Una indicación no relevante puede ser inherente a la rugosidad superficial, huellas digitales o fibras adheridas a la superficie. Una indicación relevante es el resultado de una discontinuidad y es evaluada de acuerdo al criterio de aceptación.

Ensayo hidrostático

El ensayo hidrostático tiene por objeto validar la integridad y el buen funcionamiento del equipo en condiciones de operación. Durante el ensayo se llena el equipo con un fluido (generalmente agua) y luego se aplican escalonamientos de presión. Este ensayo tiene varios objetivos, según [Farr y Jawad \(2010\)](#), estos son:

- Detectar pérdidas, cuyo grado de tolerancia depende de la norma de aplicación.
- Alcanzar cargas y esfuerzos que equivalgan o excedan aquellos que se van a aplicar en condiciones de operación.
- Indicar algún error grave durante el diseño o la fabricación.
- Ayudar a redondear las esquinas y ofrecer alivio de tensiones en algunos componentes.

La norma API 6A especifica que el fluido utilizado debe ser agua o agua con aditivos. Antes de comenzar el ensayo, se debe verificar que tanto el equipo a ensayar como el medidor de presión estén aislados de la fuente de presión y que todas las superficies exteriores del equipo estén secas.

El ensayo de presión requerido por la norma consta de los siguientes ciclos:

1. Período de mantenimiento de presión primario: se aplica la presión de prueba y mantiene durante 3 minutos.
 2. Reducción de la presión a 0 psi.
-

3. Período de mantenimiento de presión secundario: Se aplica la presión de prueba y mantiene durante 15 minutos.
4. Reducción de la presión a 0 psi.

La presión de prueba se determina en función de la presión a la cual se califica el equipo. Estos valores están especificados en la Tabla 7.

Tabla 7. Presión de prueba [psi].

Presión de trabajo (WP)	Presión de prueba (TP)
2 000	4 000
3 000	6 000
5 000	7 500
10 000	15 000
15 000	22 500
20 000	30 000

Durante el ensayo no se deben evidenciar pérdidas en el equipo y la presión monitorizada no debe variar en más de 500 psi durante el período de mantenimiento. La presión de ensayo inicial no debe superar a la presión especificada en más de un 5 %.

Marcado

El marcado de la pieza se debe realizar mediante un método de baja tensión, con el fin de no generar endurecimiento sobre la superficie de la pieza. Este es un requerimiento de la norma NACE MR0175, ya que las zonas de dureza elevada son más vulnerables a la corrosión por H₂S. La norma API 6A especifica la información mínima que debe estar marcada sobre cada componente (ver ejemplo en la Figura 10).

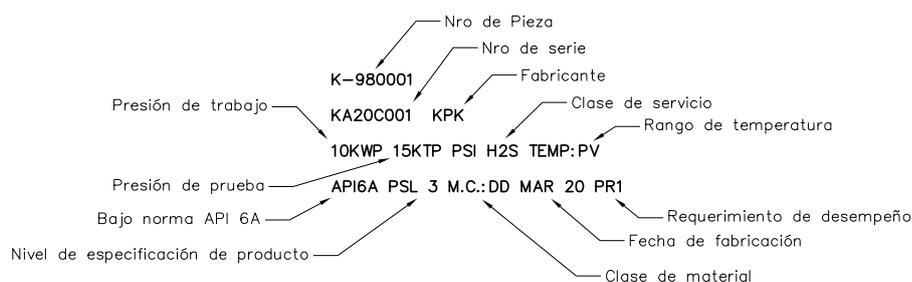


Figura 10. Ejemplo de marcado de componente.

3.3.6. Validación

Con el objetivo de validar el diseño se propone, en forma complementaria a los ensayos de aceptación definidos en el apartado anterior, realizar ensayos extensométricos.

Una galga extensométrica es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición eléctrica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser: presión, carga, torque, deformación, posición, entre otros. El principio de funcionamiento esta basado en la relación deformación/resistencia de los conductores eléctricos, cuya variación se debe en parte a la deformación del conductor y en parte a la variación de la resistividad ρ del material a causa de cambios microestructurales (Hoffman, 1989).

A partir de la instalación de galgas extensométricas sobre la piezas, se mide la deformación en ciertos puntos de interés, valores que se pueden traducir en tensiones, comparándose finalmente los valores obtenidos con los resultados de los modelos adoptados durante la etapa de diseño mecánico.

Al medir una deformación con galgas extensométricas, se asume que la deformación se transmite prácticamente sin pérdidas desde el objeto bajo estudio a la banda extensométrica. Esto último requiere que se garantice una adecuada unión entre ambos, la cual se realiza por medio de un adhesivo.

La unidad de medida para la deformación es el strain $[\epsilon]$, una medida adimensional equivalente a la relación entre el cambio en longitud y la longitud inicial. En la práctica, la magnitud de medida de una galga es muy pequeña, por lo que usualmente se expresa como microstrain $[\mu\epsilon$ o $\mu\text{m}/\text{m}]$.

La variación en resistencia de estos transductores produce una señal muy pequeña, por lo cual se debe utilizar un circuito que la amplifique, la filtre y la procese para luego mostrar los resultados a través de una adecuada interfaz (Yapur y col., 2005).

4. DESARROLLO

En esta sección, se desarrollan cada uno de los pasos incluidos en la metodología de proyecto definida en la Sección 3.3.

4.1. Especificaciones del producto

Las especificaciones del producto se obtuvieron a partir de las necesidades definidas por el cliente, dentro de los parámetros definidos por la norma de aplicación, quien cuenta con un amplio conocimiento sobre el funcionamiento de este tipo de equipos. Es importante destacar la dilatada experiencia de la Empresa en cuanto a la operación y certificación de los ECP. Como resultado del análisis, se especifica lo siguiente:

- Presión de trabajo: 12 000 psi.
- Temperatura mínima del medio: -29 °C.
- Temperatura máxima del fluido: 121 °C.
- Apto para servicio en ambientes con alta concentración de H_2S .
- Tipo de material a emplear: Acero.
- Intercambiabilidad de partes con equipos similares disponibles en el mercado.

Con el objetivo de asegurar la intercambiabilidad de las partes, se determinaron sus dimensiones principales a partir de un estudio de *benchmarking* sobre equipos de similares características.

4.2. Aplicación y desempeño

En función de la identificación de necesidades, se establecieron los siguientes niveles de certificación para ser tenidos en cuenta durante el diseño del equipo:

- Requerimiento de *performance*: PR1.
 - Clasificación de presión: 15 000 psi.
-

- Clases de temperatura: P, S, T, U, V.
- Clase de servicio: H2S.
- Clase de material: DD.
- Nivel de especificación de producto: PSL 3.

4.3. Materiales

La norma API 6A (API, 2019a), para una presión de trabajo de 15 000 psi, especifica un material con una designación mínima de 45K. Sin embargo, se consideró conveniente la selección de un material de designación 75K, dado que una mayor resistencia mecánica se traduce en una disminución del tamaño y peso del equipo.

A partir del relevamiento de equipos similares disponibles en el mercado, se identificó que la familia de materiales mas utilizada para la fabricación de ECP es la AISI/SAE 41XX. En este trabajo, dada su disponibilidad en el mercado nacional, se seleccionó un acero AISI/SAE 4140.

En una primera instancia, se debe verificar que este material cumpla con los requerimientos de propiedades mecánicas y composición química para su calificación como material estándar (Sección 3.3.3). Dado que el material deber ser calificado para servicio H2S, complementariamente debe cumplir con los siguientes requerimientos específicos (NACE, 2015):

- Contenido de azufre y fósforo menor al 0,025 %.
- Dureza menor a 26 HRC (258 HB¹).

En la Tabla 8 se muestra la composición química del acero seleccionado, en comparación con los requerimientos definidos en la norma API 6A.

Tabla 8. Análisis de composición química.

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Requerimientos normativos	0,45	1,8	1	0,025	0,025	1	2,75	1,5	0,3
AISI/SAE 4140	0,38-0,43	0,75-0,1	0,2-0,35	0,035	0,04	-	0,8-1,1	0,15-0,25	-

¹Conversión de unidades según ASTM E140 Tabla 1

En referencia a la tabla anterior, al momento de requerir la provisión del material, se debe procurar que el contenido de fósforo (P) y azufre (S) no supere el valor límite especificado.

Con el fin de alcanzar las propiedades mecánicas requeridas, a partir de la Figura 11, se adoptó una temperatura de revenido de 700° (ver Tabla 9).

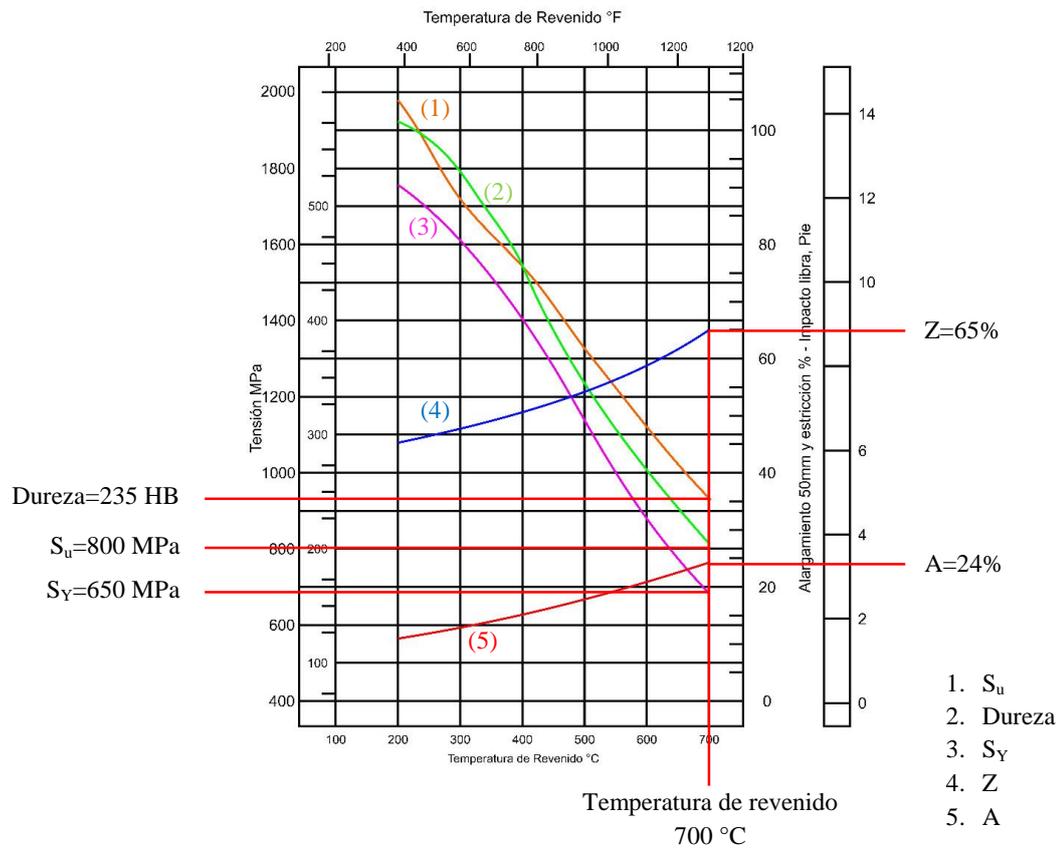


Figura 11. Propiedades mecánicas del acero AISI/SAE 4140 en función de la temperatura de revenido adoptada (IAS, 1987).

Tabla 9. Propiedades mecánicas.

	S_Y [MPa]	S_U [MPa]	A [%]	Z [%]	Dureza [HB]
Requerimientos normativos	517	655	17	35	197-258
AISI/SAE 4140 (Revenido a 700°C)	650	800	24	59	235

4.4. Diseño mecánico

4.4.1. Definición de la geometría

En la Figura 14, se muestra una vista explotada de una configuración geométrica típica de un equipo de inyección de grasa. Las dimensiones generales de cada componente asociadas a las longitudes y diámetros de las partes se obtuvieron en la etapa de *benchmarking*, a partir del relevamiento de equipos similares disponibles en el mercado.

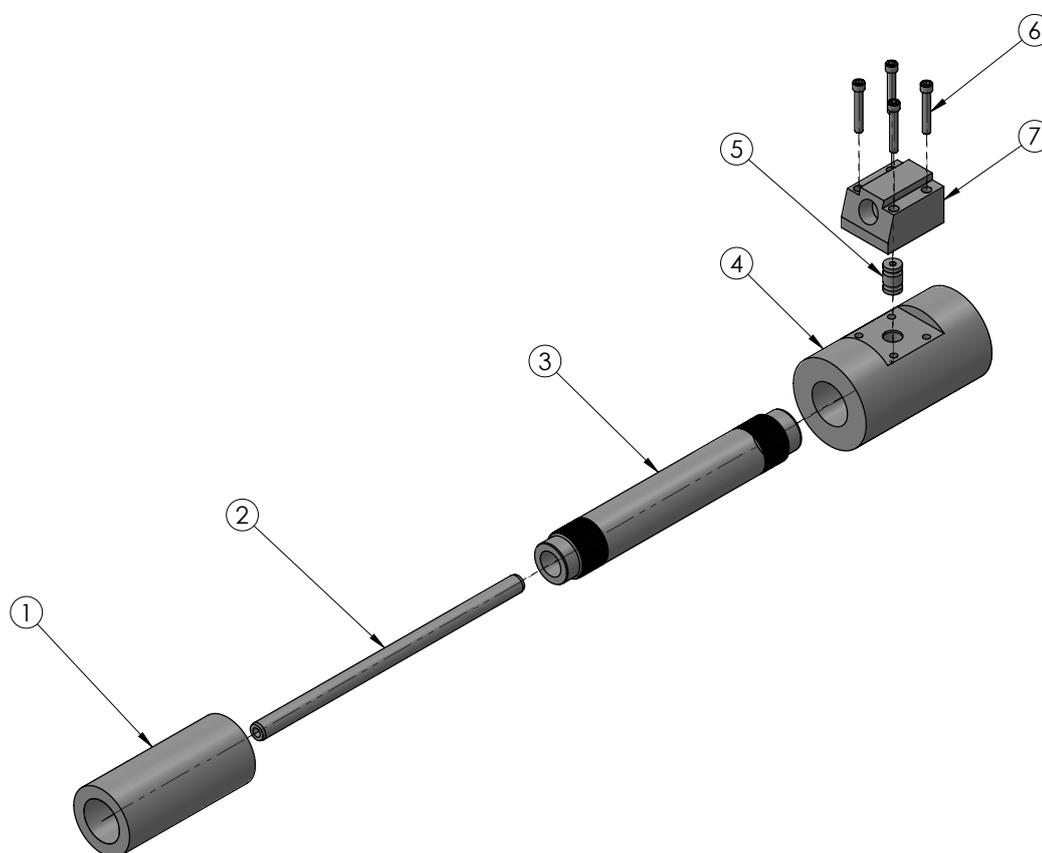


Figura 12. Equipo de inyección de grasa: 1. Cupla, 2. Tubo de flujo, 3. Camisa, 4. Cuerpo cupla de inyección, 5. Acople, 6. Tornillos de montaje, 7. Bloque de inyección.

Como punto de partida del diseño, y con el objetivo de asegurar la intercambiabilidad de las partes con equipos similares, resulta de interés analizar la zona de unión entre la cupla, la camisa y el tubo de flujo (ver detalle Figura 13).

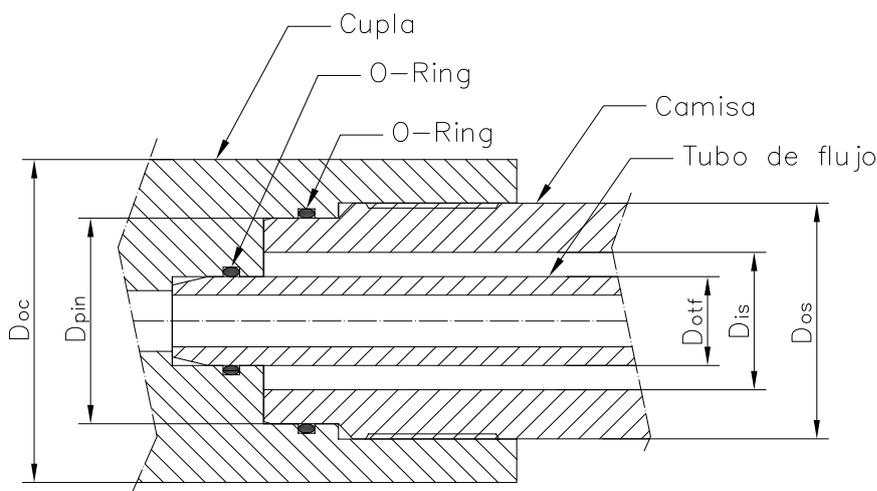


Figura 13. Dimensiones características de la cupla y la camisa.

A continuación, en relación a la figura anterior, se establecen los lineamientos de diseño que se adoptaron para cada uno de los componentes del equipo de inyección de grasa.

1. Cupla:

- Los diámetros internos de la cupla se determinan a partir de los diámetros característicos del tubo de flujo (D_{otf}) y de la camisa (D_{pin} y D_{os}).
- Se adoptan uniones roscadas del tipo ACME, según lo especificado en la norma ASME B1.5 (ASME, 1997).
- La longitud de la cupla debe ser compatible con el tubo de flujo seleccionado, asegurando un adecuado sello entre ambos componentes.
- Finalmente, el diámetro exterior de la cupla (D_{oc}) se obtiene a partir del cálculo basado en la resistencia del espesor mínimo requerido.

2. Camisa:

- Las dimensiones de este componente, se obtienen de manera análoga a lo especificado para la cupla. En este sentido, es necesario compatibilizar un adecuado montaje del sistema cupla-camisa-tubo de flujo.
- Con el objetivo de asegurar la estanqueidad, entre la camisa y la cupla se requiere la instalación de un sello tipo *o-ring*. A tal fin, se adoptan las recomendaciones dadas por Parker® (Parker, s.f.). En la Figura 14 se expone el

detalle de los diámetros de referencia de los elementos externos e internos, ranuras y huelgos de un sello mediante *o-rings*.

- Finalmente, el diámetro interior de la camisa (D_{is}) se obtiene a partir del cálculo basado en la resistencia del espesor mínimo requerido.

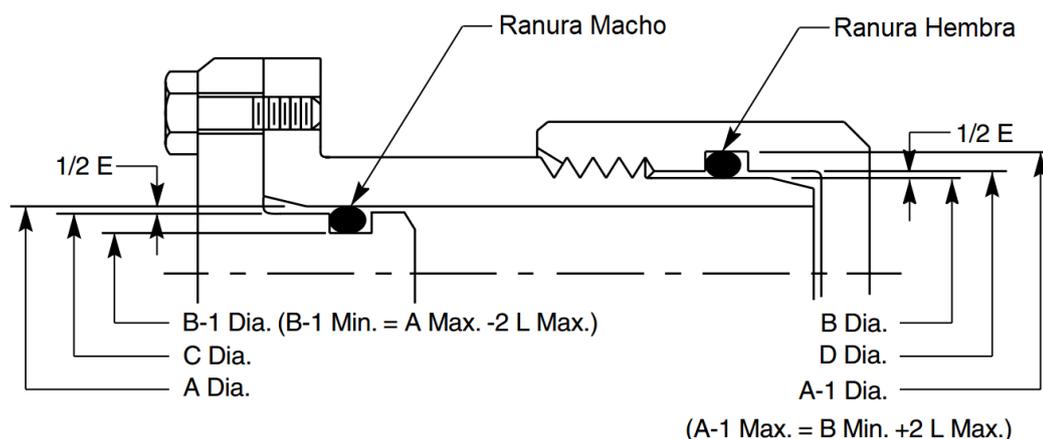


Figura 14. Dimensiones características para el diseño de superficies de sello con o-rings (Parker, s.f.).

3. Tubo de flujo:

- Este elemento es un componente estándar, a partir del cual se deben compatibilizar los demás componentes para su adecuado montaje. Por lo tanto, la longitud y el diámetro del tubo, se adoptan como medidas de referencia para dimensionar la camisa y la cupla.

4. Cupla de inyección:

- La vinculación entre el bloque y el cuerpo se realiza a través de una unión atornillada.
- Con el objetivo de asegurar el sello entre el bloque y el cuerpo, se dispone de un acople intermedio, dotado de dos sellos tipo *o-ring*.
- La conexión de grasa del bloque debe ser estandarizada según la presión de trabajo asignada. Por lo expuesto, se seleccionó un acople de tipo cónico autoclave, según especificaciones del fabricante (HIP, s.f.).

Con el objetivo de determinar los espesores de las secciones resistentes, se utilizaron las Ecuaciones 12, 13 y 14, las cuáles se obtienen de la teoría de resistencia de materiales clásica para cilindros de pared gruesa sometidos a presión interna. En la Figura 15 se muestra la distribución de los esfuerzos radiales (σ_r) y tangenciales (σ_t), a través del espesor del componente. Los esfuerzos longitudinales (σ_l) se producen cuando el propio recipiente toma las reacciones en los extremos debido a la presión interna (p_i) (Budynas y Nisbett, 2012).

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right) \quad (13)$$

$$\sigma_l = \frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (14)$$

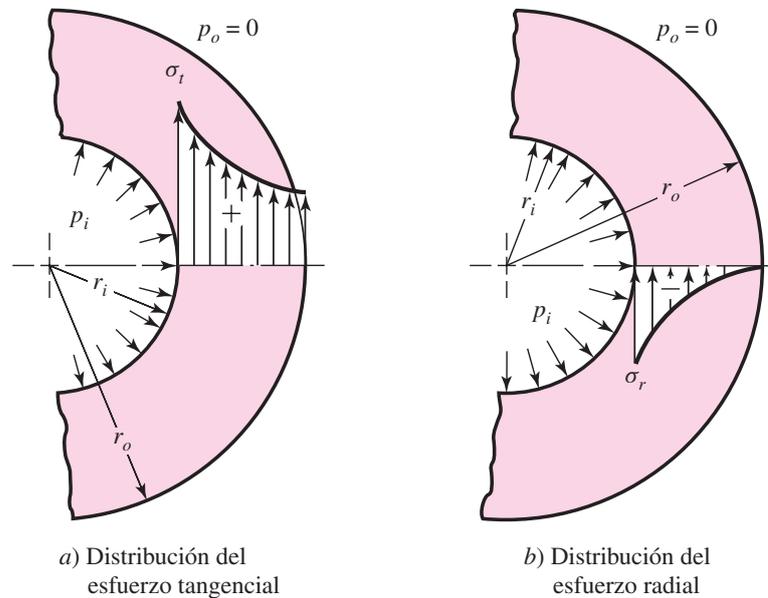


Figura 15. Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa sometido a presión interna (Budynas y Nisbett, 2012).

Se plantea, como criterio de diseño, que la tensión equivalente de Von Mises (S_E) sea menor que la tensión de fluencia del material (S_Y), cuando el componente está sometido

a la presión de prueba (22 500 psi), tal como lo indican los requerimientos dados en API 6A (API, 2019a).

$$S_E = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_t)^2]^{\frac{1}{2}} < S_Y \quad (15)$$

A partir de los lineamientos expuestos, se determinaron las dimensiones de los componentes principales para la elaboración de los modelos CAD. Estos modelos permitieron realizar la evaluación final del diseño que se expone en el apartado siguiente.

4.4.2. Verificación de los componentes

Los componentes se verificaron según los requisitos dados en la Sección 3.3.4, a partir de un modelo de elementos finitos del tipo lineal elástico implementado en un *software* específico (Akin, 2010). Es de interés, analizar el comportamiento de los componentes principales sometidos a presión que fueron diseñados *ad-hoc*, por lo expuesto, se centró la atención en los siguientes componentes:

- Cuerpo cupla de inyección.
- Cupla.
- Camisa.
- Unión roscada (vinculación entre componentes).
- Bloque de inyección.

Dado que la geometría de los componentes indicados y las cargas aplicadas son simétricas, y con el objetivo de disminuir el costo computacional, se restringe el análisis a secciones del sólido limitadas por los planos de simetría. Esta práctica no solo disminuye la cantidad de elementos que se deben calcular, sino que también simplifica la determinación de las restricciones del modelo (Bolek, 2018).

El paso siguiente es la creación del mallado, para esto se parte de un tamaño de elemento general y se ejecuta un análisis. El resultado muestra que se alcanzan tensiones altas en las discontinuidades, cuyo valor aumenta a medida que se refina la malla. Entonces se debe efectuar un análisis de convergencia sobre estas zonas, el cual consiste en aplicar un

mallado con elementos cada vez mas pequeños sobre las discontinuidades, hasta que la variación en estas tensiones tienda a anularse (More y Bindu, 2015).

El estado de cargas adoptado se corresponde con las condiciones críticas presentes durante el ensayo hidrostático. En esta condición, la acción de la presión sobre el conjunto se puede dividir en dos componentes:

- Presión aplicada sobre el interior.
- Fuerza de tracción que provoca la separación entre los componentes del equipo.

4.4.2.1 Cuerpo cupla de inyección

El cuerpo de la cupla de inyección posee dos planos de simetría, por lo tanto el análisis se restringe a un cuarto del componente.

Se considera que la presión interna actúa en la zona comprendida entre las ranuras de los *o-rings* encargados de sellar la cupla con la camisa, la cual se corresponde con la condición de ensayo mas severa, sin contemplar la instalación del tubo de flujo. En servicio, esta condición de carga, se manifiesta para el caso en que se pierde la condición de estanqueidad entre el tubo de flujo y la cupla.

La fuerza de separación, se aplica en la zona de la unión roscada, y su magnitud se determina a partir del efecto que genera la aplicación de la presión de prueba sobre la sección transversal en ambos extremos del equipo.

La Figura 16 muestra el proceso completo de análisis: modelo CAD, restricciones y cargas aplicadas sobre el modelo y el mallado adoptado.

Se puede notar, en el resultado del análisis, que en algunos puntos la tensión supera el límite de fluencia del material, sin embargo esto no significa que el material vaya a fallar sino que se puede producir plastificación local, es decir deformaciones permanentes en una pequeña extensión del volumen. La aplicación del criterio API 6X permite evaluar el comportamiento global del componente considerando las tensiones a lo largo del espesor con el fin de verificar su funcionamiento.

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos, se debe evaluar la protección contra todos los modos de fallo indicados en la norma API 6X.

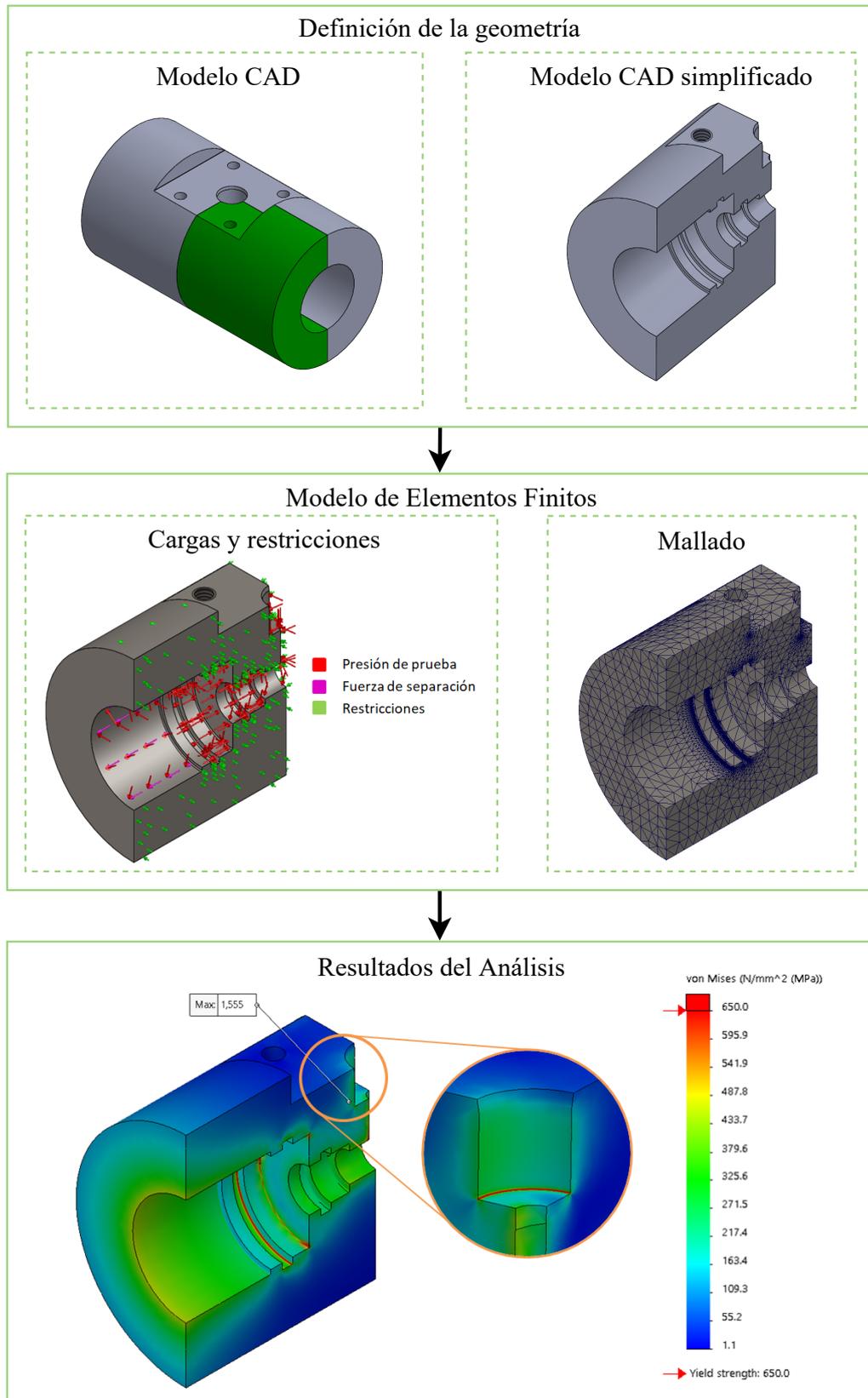


Figura 16. Análisis por elementos finitos del cuerpo cupla de inyección.

Protección contra colapso plástico

Las componentes del cuadro de tensiones, tal como se indicó en la Sección 3.3.4, se obtienen a través del proceso de linealización. En la Figura 17 se presenta un detalle en corte, según el plano longitudinal, que indica el trazado de las SCL. El *software* de elementos finitos proporciona los resultados de las tensiones de membrana (o locales, dependiendo de su localización) y de flexión a lo largo de las SCL. En este caso, para todos los puntos evaluados, se asume tensión local dado que los mismos se encuentran dentro de la zona de influencia de los concentradores de tensión. En la Tabla 10 se presentan las tensiones obtenidas para cada SCL (ver Figura 18).

Se puede observar que, para cada una de las SCL seleccionadas, los valores de tensión de membrana local y su combinación con la tensión de flexión se encuentran dentro de los valores admisibles definidos anteriormente (ver Ecuaciones 8 y 9).

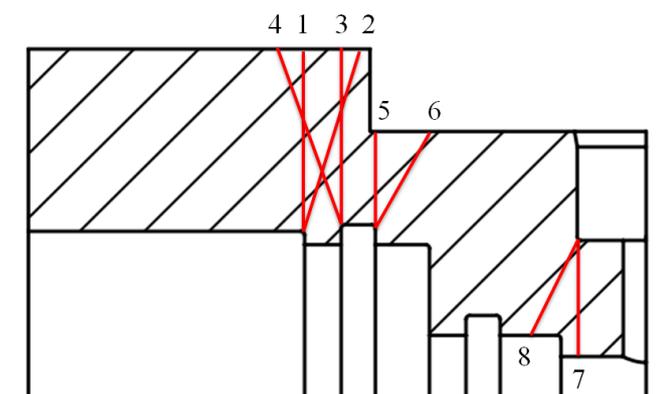


Figura 17. Trazado de SCL para el cuerpo cupla de inyección.

Tabla 10. Verificación contra colapso plástico: cuerpo cupla de inyección.

SCL	P_L [MPa]	$P_L + P_B$ [MPa]
1	99	152
2	78	138
3	69	154
4	91	139
5	118	201
6	120	178
7	206	280
8	179	224

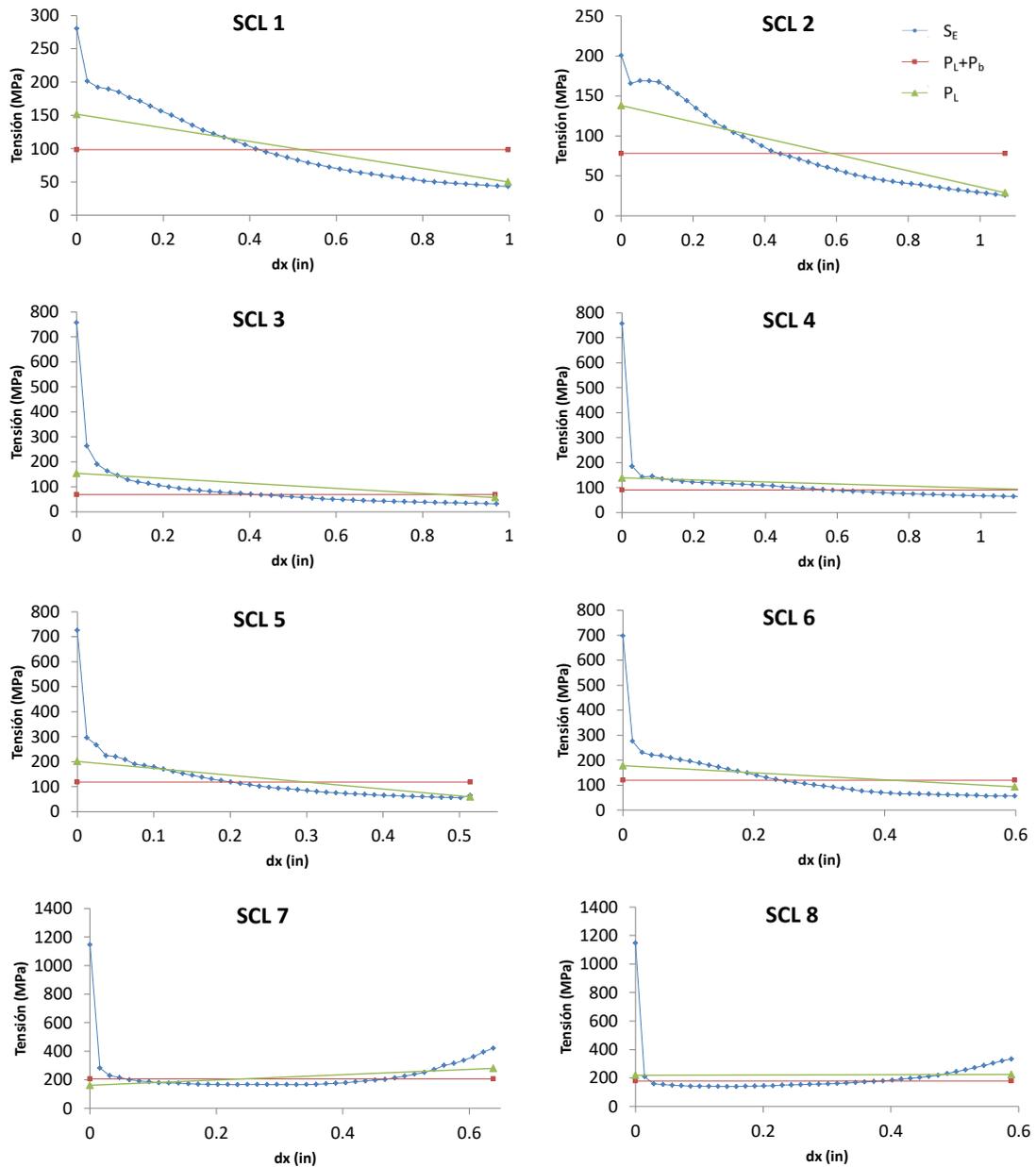


Figura 18. Tensiones linealizadas del cuerpo cupla de inyección.

Protección contra falla localizada

Para verificar la integridad bajo este modo de falla, se comparan las tensiones triaxiales con el valor límite de $4S$ (Ecuación 10). En la Figura 19 se observa la distribución de tensiones triaxiales. Del análisis se obtiene que la tensión máxima es de 1439 MPa, mientras que la tensión triaxial máxima admisible es de 1732 MPa, por lo tanto el margen de seguridad para este caso es 1,1. Por lo expuesto, bajo este modo de falla, el diseño no fallaría bajo las condiciones planteadas.

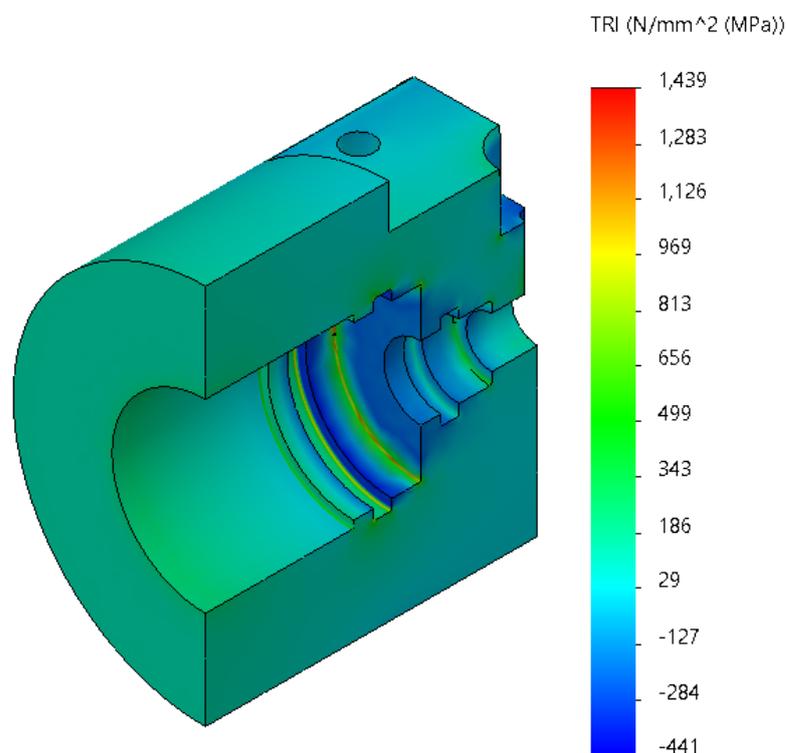


Figura 19. Tensiones triaxiales del cuerpo cupla de inyección.

4.4.2.2 Cupla

Para el análisis de la cupla se empleó un procedimiento análogo al desarrollado para el cuerpo de la cupla de inyección. El proceso de análisis por elementos finitos y el trazado de las SCL, se presentan en las Figuras 20 y 21 respectivamente.

Protección contra colapso plástico

En este caso particular, se debe destacar que el análisis se restringió únicamente a la zona donde la tensión equivalente es superior al valor de la tensión admisible. En la Tabla 11 se presentan las tensiones obtenidas para cada SCL (ver Figura 22).

Se puede observar que los valores de tensión de membrana local, y su combinación con la tensión de flexión, se encuentran dentro de los valores admisibles.

Tabla 11. Verificación contra colapso plástico: cupla.

SCL	P_L [MPa]	$P_L + P_B$ [MPa]
1	78	133
2	113	131

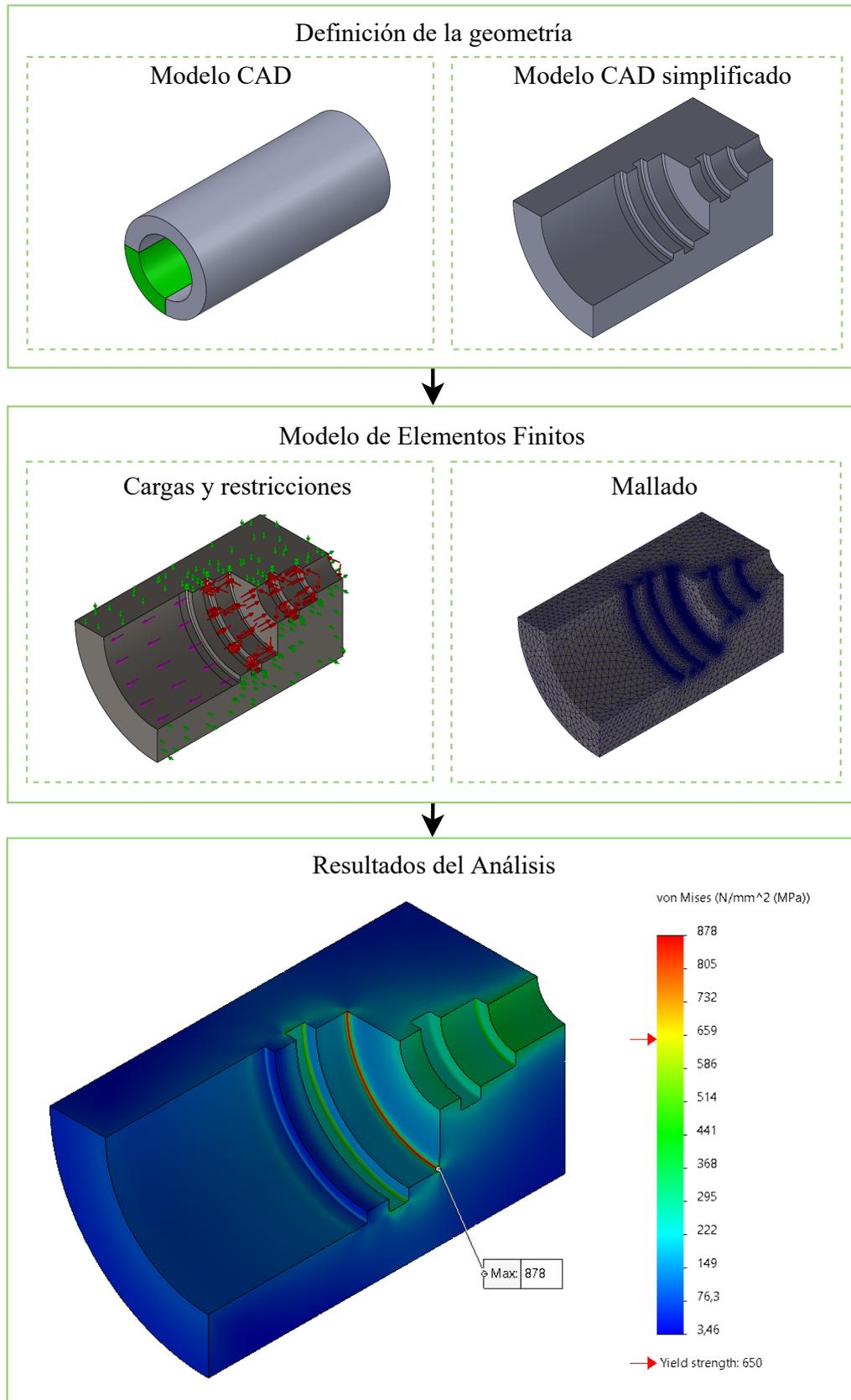


Figura 20. Análisis por elementos finitos de la cupla.

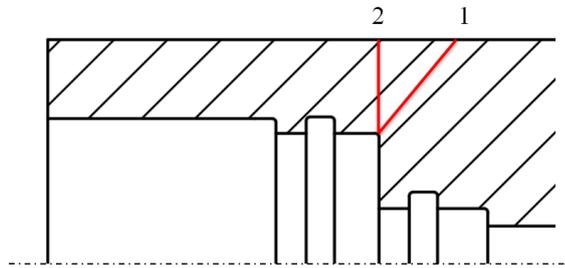


Figura 21. Trazado de SCL para cupla.

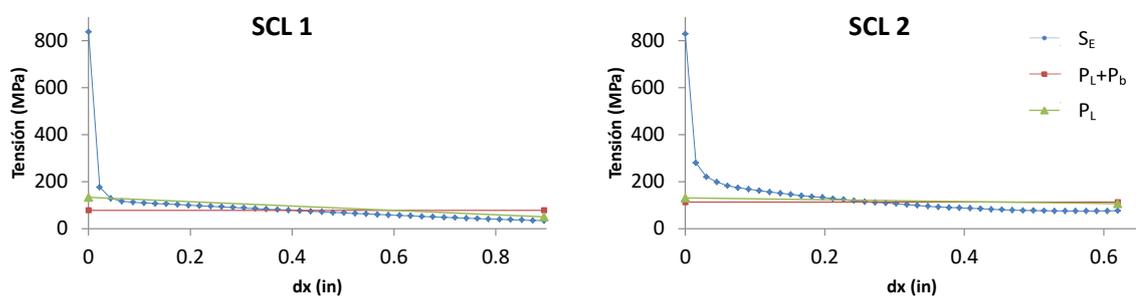


Figura 22. Tensiones linealizadas de la cupla.

Protección contra falla localizada

En la Figura 23 se presenta la distribución de tensiones para el caso bajo estudio. Con el objetivo de verificar la integridad bajo este modo de falla se comparan las tensiones triaxiales con el valor límite de $4S$ (Ecuación 10).

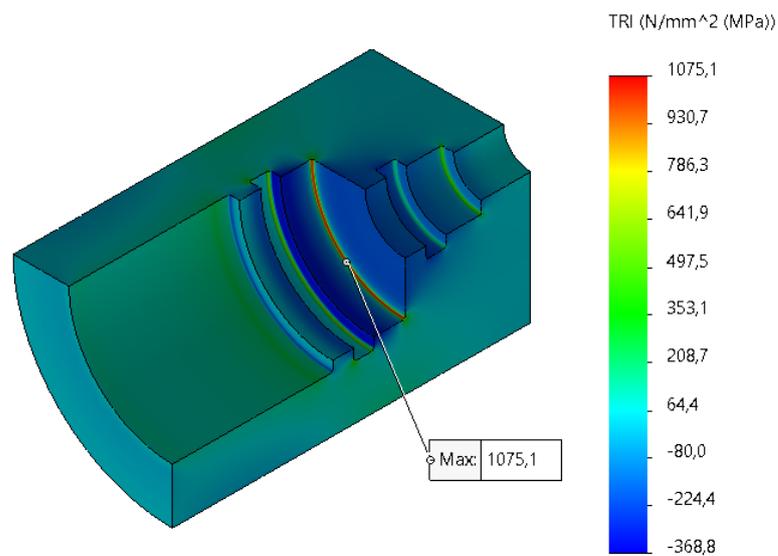


Figura 23. Tensiones triaxiales de la cupla.

Del análisis planteado, se obtiene que la tensión triaxial máxima es de 1075 MPa, manteniéndose este valor por debajo de la tensión admisible ($4S=1732$ MPa). Este resultado indica, que bajo este modo de falla, el diseño verifica con un margen de seguridad de 1,6.

4.4.2.3 Camisa

En virtud de que la camisa posee una geometría simple (tubería de sección constante), no se justifica la aplicación de un modelo de elementos finitos. Por lo expuesto, se considera apropiada la aplicación de la teoría de resistencia de materiales clásica para analizar su integridad estructural. En la tabla 12, se presentan los resultados obtenidos para los esfuerzos característicos según las expresiones dadas en la Sección 4.4.1.

Tabla 12. Tensiones camisa [MPa]

Ubicación	σ_t	σ_r	σ_l	S_E	CS
r_i	289,7	-155,1	67,3	385,2	1,7
r_o	134,6	0	67,3	116,5	5,6

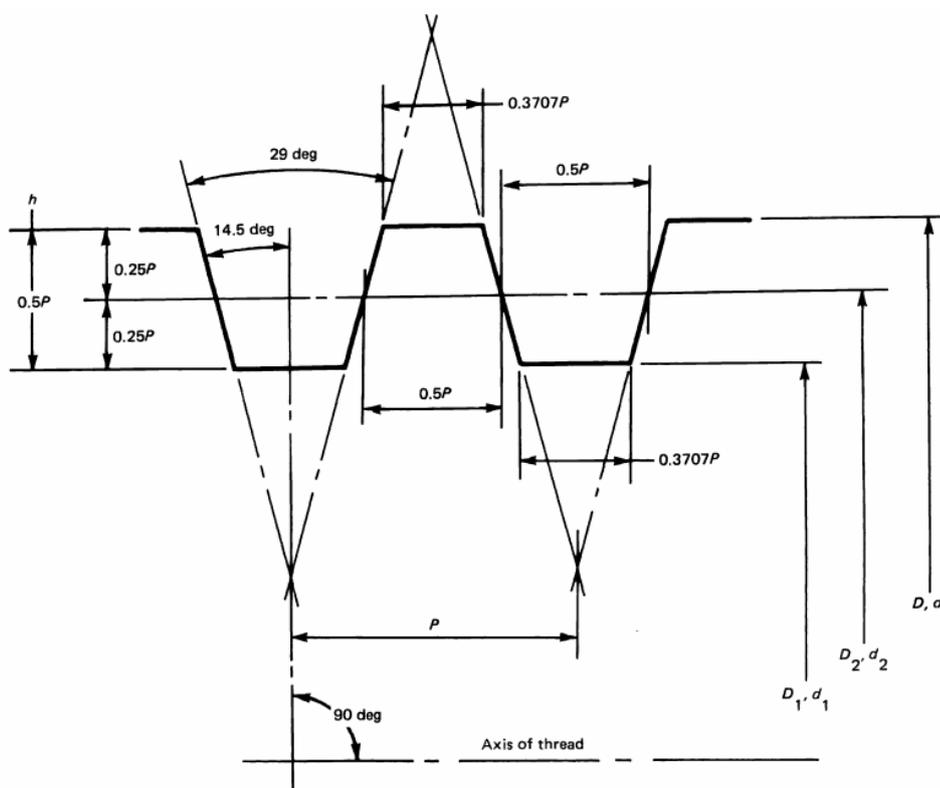
En correspondencia con la metodología planteada, las tensiones máximas se ubican en la cara interior de la camisa. Los resultados obtenidos exceden los requerimientos dados por la normativa de referencia, dado que el margen de seguridad es de 1,7 con respecto a la tensión de fluencia (API, 2019a).

4.4.2.4 Unión roscada

En virtud de que una de las restricciones del diseño se refiere a asegurar la intercambiabilidad entre las partes del ECP, se definió que la vinculación entre los componentes principales se realice a través de un único tipo de unión roscada ACME 2"-10-3G (ver Figura 24).

A partir de lo expuesto, se consideró necesario realizar la verificación de la unión roscada. A tal fin, se considera el estado de carga generado en las condiciones de ensayo y la geometría adoptada en los componentes de menor sección resistente en la zona de interés (conjunto camisa y cupla).

La concentración de esfuerzos que se manifiesta en las conexiones roscadas, se encuentra catalogada como una de las más severas en el diseño de componentes de máquinas.



D	Diámetro mayor, rosca interior	2,020-2,040"
D_1	Diámetro menor, rosca interior	1,900-1,905"
D_2	Diámetro de paso, rosca interior	1,950-1,958"
d	Diámetro mayor, rosca exterior	1,995-2,000"
d_1	Diámetro menor, rosca exterior	1,867-1,880"
d_2	Diámetro de paso, rosca exterior	1,933-1,942"
P	Paso	0,100"
h	Altura del filete	0,05"

Figura 24. Dimensiones características de la rosca (ASME, 1997)

Para su análisis a través de métodos de elementos finitos, debido al carácter altamente localizado de la concentración, se requiere una malla muy refinada para alcanzar la convergencia, y por lo tanto, un alto costo computacional (Dragoni, 1994).

Con el objetivo de simplificar el proceso de análisis, se utilizó un modelo de elementos finitos 2D axisimétrico (Chaaban y Jutras, 1992). La única característica que se pierde al aplicar este tipo de simplificación, es la geometría helicoidal de la rosca, lo cual no afecta considerablemente la distribución de la tensión (Chen y Shih, 1999).

La Figura 25 muestra el proceso completo de análisis, cuyo resultado indica que la

tensión máxima se produce en la raíz del primer filete.

La norma API 6X especifica que las roscas deben ser verificadas como secciones sometidas a corte puro. Los resultados obtenidos indican que el estado de tensiones en el filete de la rosca no se corresponde con esta clasificación. Debido a esto, se adoptó para su evaluación la guía de cálculo [FKM \(2012\)](#). En el Anexo [B.2](#) se presenta el detalle de la memoria de cálculo realizada.

A partir de la evaluación realizada, se concluye que el componente verifica para el caso de carga estática ($a_{SK} = 0,367 < 1$).

4.4.2.5 Cupla de inyección

Dada la complejidad de su geometría, este componente no puede ser clasificado como un cuerpo, de acuerdo a lo definido por la norma API 6A, dada la complejidad de su geometría. En virtud de esto, la norma especifica que cualquier otra parte no encuadrada como cuerpo, y que contenga presión, deberá ser diseñada de tal forma que pueda satisfacer los requerimientos de *performance* y las condiciones de servicio especificadas en la Sección [3.3.2](#). A tal fin, se debe documentar el criterio y marco normativo en los que se basa el diseño. Por lo tanto, para el análisis de este componente, se utilizó la guía de diseño [FKM \(2012\)](#) para tensiones locales.

Las tensiones principales se obtuvieron a partir de un modelo de elementos finitos. La geometría discretizada en el modelo se circunscribe a la mitad del bloque, en relación al plano de simetría longitudinal. Se considera en el análisis la presión interna y la precarga aplicada a los tornillos durante el montaje. La Figura [26](#) muestra el proceso completo de análisis.

Los resultados obtenidos permiten identificar la magnitud y la localización del punto de mayor tensión, el cual se utilizó para la evaluación del componente según el algoritmo de cálculo dado por la guía [FKM \(2012\)](#). Su evaluación permitió obtener el grado de utilización $a_{SK} = 0,46$, lo cuál implica que el componente verifica para el caso de carga estática considerado. En el Anexo [B.3](#), se detalla la memoria de cálculo completa.

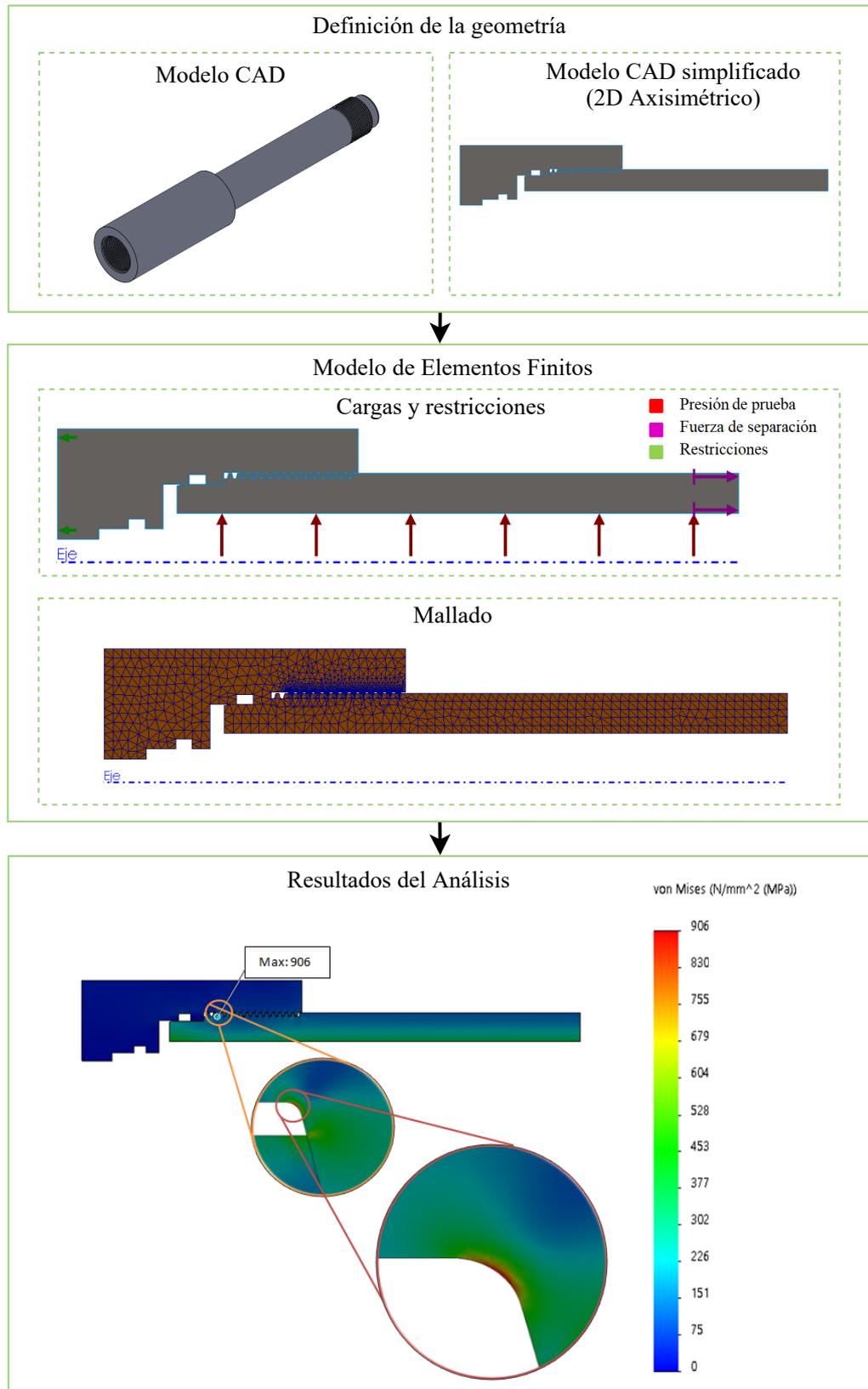


Figura 25. Análisis por elementos finitos de la unión roscada.

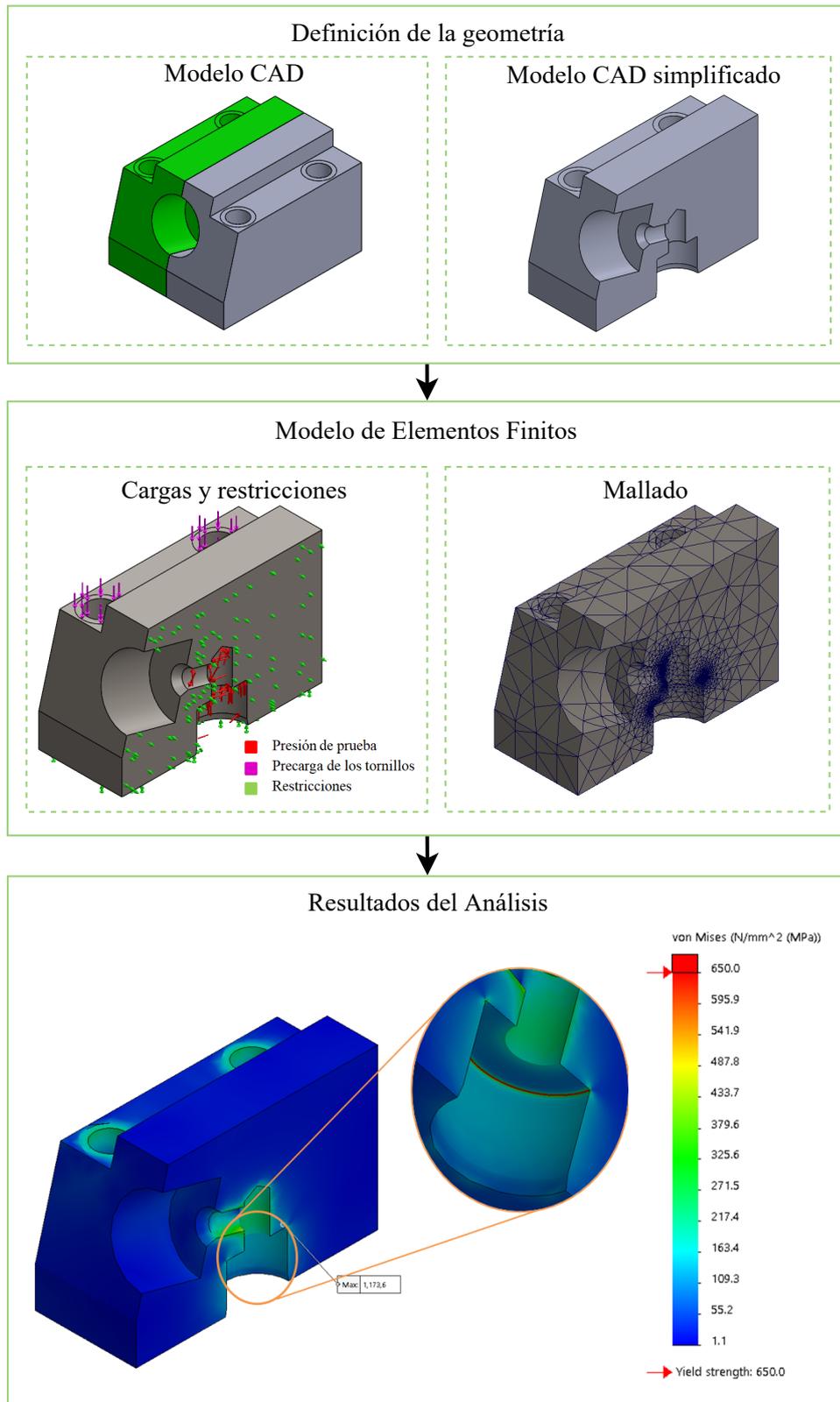


Figura 26. Análisis por elementos finitos del bloque cupla de inyección.

4.5. Fabricación y Control de Calidad

Esta etapa del proyecto, consiste en la elaboración de los procedimientos necesarios para la fabricación del equipo, asegurando el cumplimiento de los requerimientos normativos y del sistema de gestión de calidad de la Empresa. En este sentido, la norma API 6A especifica los lineamientos que se deben cumplir durante este proceso, con el objetivo de garantizar que el mismo se realizó cumpliendo todos los requisitos especificados.

En la Figura 27, se esquematizan los procesos involucrados, desde la adquisición del material hasta la entrega del producto terminado al cliente.

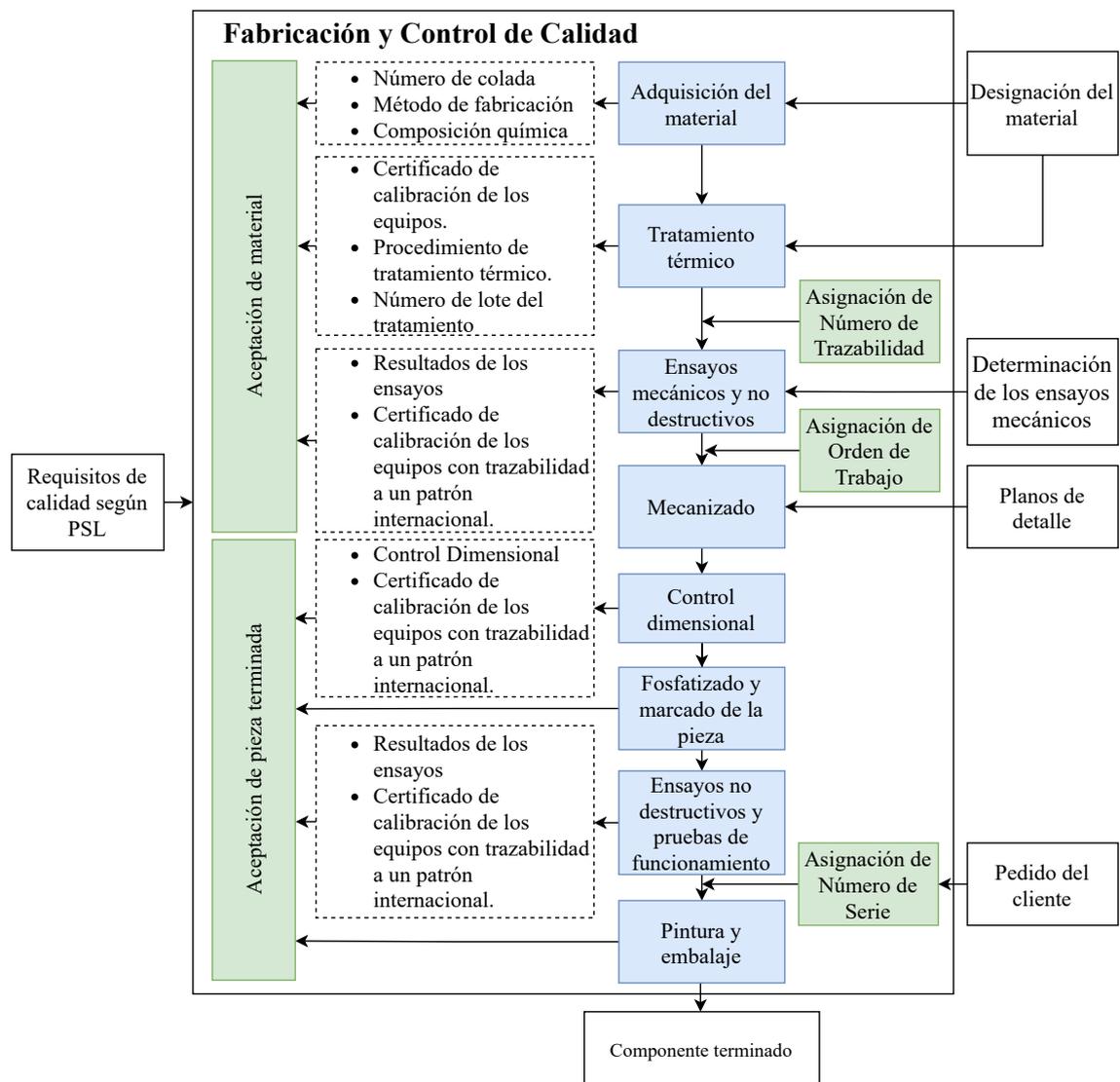


Figura 27. Proceso de fabricación y Control de Calidad.

En el diagrama anterior, se clasifican los procesos en dos grupos principales:

- **Fabricación:** las tareas involucradas se relacionan con la transformación del material y el agregado de valor a cada componente.
- **Control de Calidad:** tiene como objetivo el cumplimiento de los requerimientos normativos y del Sistema de Gestión de la Calidad (SGC).

4.5.1. Control de calidad

La Empresa acredita una basta experiencia en el mantenimiento y ensayo de ECP, sin embargo, al momento de iniciar el proyecto no contaba con antecedentes en la fabricación de este tipo de equipos. Por esta razón, se completó el sistema documental del SGC, incorporando los procedimientos y formularios específicos para el desarrollo de esta actividad. Las tareas realizadas se enfocaron principalmente en la trazabilidad y aceptación, tanto del material como de las piezas terminadas.

4.5.1.1 Trazabilidad

A lo largo del proceso de fabricación, se deben asignar los siguientes códigos:

- **Número de Trazabilidad (NT):** este código se asigna a cada unidad de material, adquirido por la Empresa, que será empleado en la fabricación de los componentes. El NT debe estar indicado sobre el material en forma indeleble. No se podrá aplicar una tecnología de fabricación o ensayo sobre el material antes de ser asignado un NT. Tiene como objetivo agrupar toda la documentación de un material en bruto, quedando asociado a la pieza obtenida a partir de este.
 - **Orden de Trabajo (OT):** se le asigna a cada lote de fabricación destinado a procesos tecnológicos internos o a proveedores externos de la Empresa. A su vez, puede incluir distintos tipos y cantidades de piezas, por lo que se debe establecer, adicionalmente, un subnúmero de identificación para cada una de ellas dentro del lote. Tiene como objetivo registrar la fecha, el lugar y al responsable del trabajo de fabricación. La OT se puede generar, a partir de la solicitud de un cliente, o por un pedido interno con el objetivo de fabricar unidades a ser cargadas en el *stock*.
-

- **Requerimiento de Fabricación (RF):** se le asigna al conjunto de componentes o ensambles solicitados por un cliente.
- **Número de Serie (NS):** se le asigna a un ensamble (se marca sobre cada parte del mismo) o a un componente individual en caso de que el mismo no se comercialice como parte de un ensamble mayor. Es asignado luego del RF. Es el número de identificación único que posee un componente o ensamble a partir del cual se referencia todo su proceso de fabricación.

En la Figura 28 se indica el procedimiento de asignación de los números de trazabilidad.

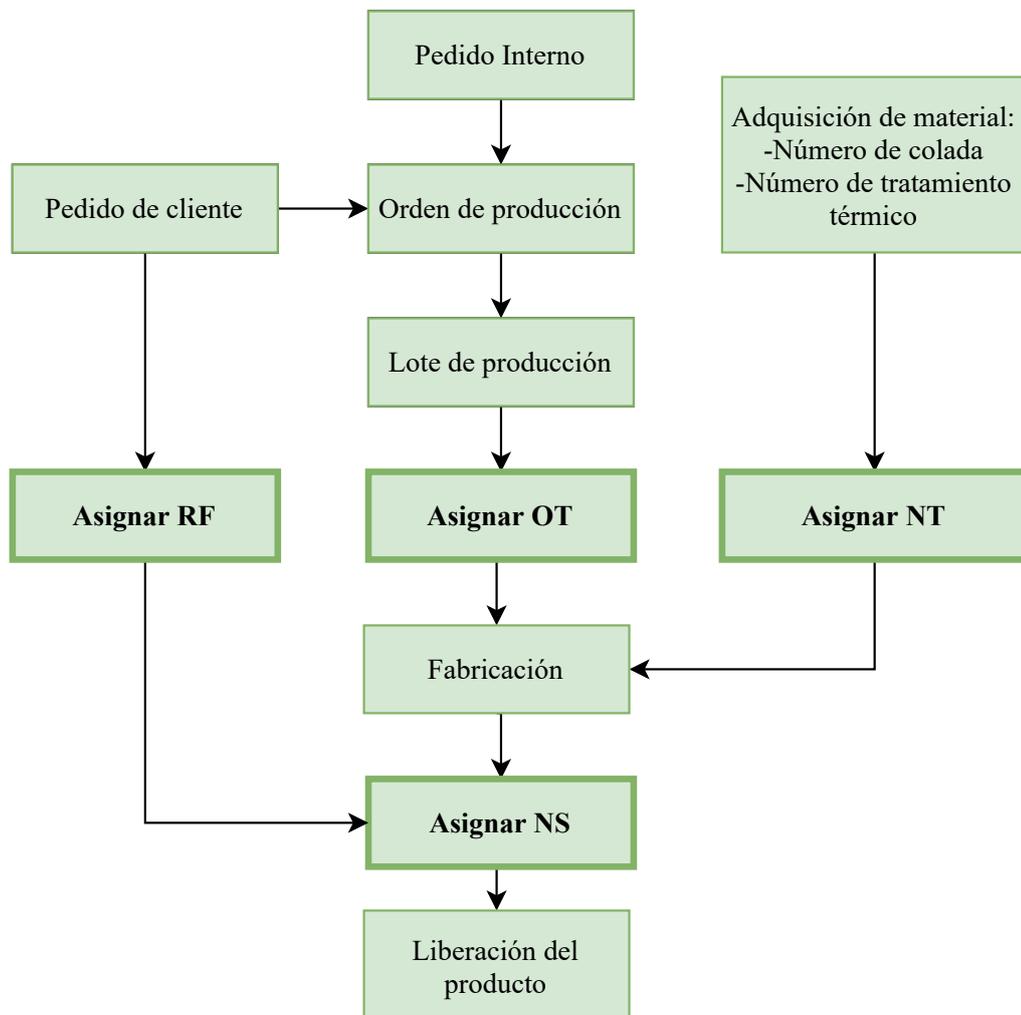


Figura 28. Diagrama de asignación de números de trazabilidad.

4.5.1.2 Aceptación del material

En el procedimiento de aceptación de material elaborado referencia al formulario indicado en la Figura 29. En el mismo, se verifica el cumplimiento de todas las certificaciones del material, y que este se encuentre dentro de los valores de aceptación.

Fecha	
-------	--

Verificación de documentación

	Verifica	Nombre operador
Certificado de colada: Nro de colada, metodo de fusión, composición, trabajado		
Certificado de trat. térmico: Ciclos, medio, temperatura del medio, dureza		
Certificado de calibración de equipos de TT		

Verificación de prop. del material

	Valor	Criterio de aceptación	Verifica	Nombre operador
Composición	Contenido de azufre	< 0,025%		
	Contenido de fosforo	< 0,025%		
Dureza TT	Valor de dureza Rockwell	> 20 y < 26 HRC		

Barras que componen el lote, asignar numero de trazabilidad (TN)

TN	Diametro	Longitud	Nro Colada	Nro TT

Si verifica anterior, cortar cupón y enviar a hacer ensayos destructivos

	Valor	Criterio de aceptación	Verifica	Nombre operador
Ensayo de tracción	Resistencia a la fluencia	> 75 ksi		
	Resistencia a la rotura	> 95 ksi		
	Alargamiento	> 24 %		
	Estricción	> 35%		
Ensayo de impacto	Resultado prueba 1			
	Resultado prueba 2			
	Resultado prueba 3			
	Promedio de pruebas	> 27 J		
	Cantidad de pruebas debajo de 27 J	≤ 1		
	Cantidad de pruebas debajo de 18 J	= 0		
Ensayo de dureza	Valor de dureza Rockwell	> 20 y < 26 HRC		

Si verifica anterior, realizar ultrasonido sobre el material completo

Ensayo de ultrasonido	Ninguna indicación que supere la DAC de referencia		
	Sin indicaciones multiples que excedan el 50% de la DAC de referencia		

La verificación de este formulario habilita la producción del equipo

Figura 29. Formulario de aceptación del material.

Una vez que el formulario se encuentre completo, y todos los ítem verificados, el material se considera apto para ser mecanizado. En efecto, se elabora un formulario específico para cada tipo de material que se utilice en la fabricación de piezas en la empresa.

4.5.1.3 Aceptación de pieza terminada

Una vez completado el mecanizado de la pieza se deben realizar una serie de controles de calidad, según lo especificado en la sección 3.3.5. Los resultados deben ser registrados en un formulario específico. A modo de ejemplo, en las Figuras 30 y 31, se muestra el documento elaborado para el caso de la camisa.

Ahora bien, una vez completado el formulario de aceptación de pieza terminada esté completo, se debe entregar al supervisor de calidad para su control. Si el resultado es satisfactorio, la pieza se considera en condición de ser entregada al cliente.

Fecha		Número de trazabilidad (TN)	
		Número de Trabajo	
		Número de Serie	

Numero de pieza K-980001

		Verifica	Nombre operador
Control dimensional	Todas las medidas en el rango indicado en el formulario de la pagina 2		
Tintas penetrantes	Sin indicaciones relevantes >5mm		
	No más de 10 indicaciones relevantes en area de 40 cm ²		
	No mas de 3 indicaciones en una linea separadas por 1,6 mm		
	Sin indicaciones relevantes en superficies sellantes		
Ensayo dureza	En posición indicada	Valor: >20 HRC y <26 HRC	
Ensayo hidrostático	No muestra fugas a TP		
	1º Golpe a TP (3min) Var. de presión=	<500 psi	
	2º Golpe a TP (15min) Var. de presión =	<500 psi	
	3º Golpe a LP (5min) Var. de presión=	<40 psi	
Ensayo hidrostático	No muestra fugas a TP		
	Variación de presión a TP =	<500 psi	
Marcado (Verificar datos)	K-980001 (NRO SERIE) KPK		
	15KWP 22.5KWP PSI H2S PV API 6A PSL 3 DD (MES) (AÑO) PR1		
Fosfatado	Limpieza		
	Fosfatado		
	Enjuague		
	Secado		
Pintura	Corroborar color con pedido de cliente		
	Pintado		
Embalaje	Aplicar aceite sobre sup. Expuestas		
	Colocar tapones plásticos		
	Envolver con cartón corrugado y film plástico		
	Colocar etiqueta		

Figura 30. Formulario de aceptación de pieza terminada (Caso de aplicación: Camisa).

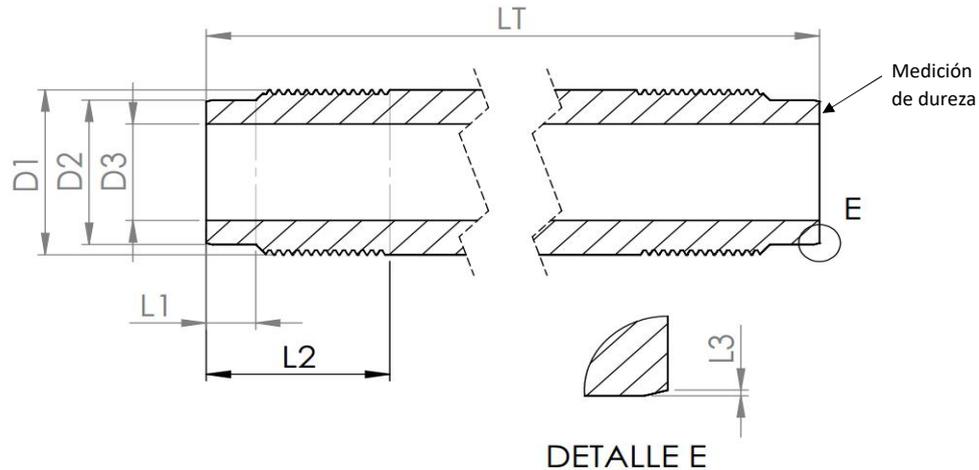
Fecha		Número de trazabilidad (TN)	
		Número de Trabajo	
		Número de Serie	

Numero de pieza K-980001

Verificar las medidas indicadas en el plano.

Todas las dimensiones en pulgadas. Tolerancia general ± 0.005 , excepto se indique lo contrario.

Verificar ambos lados de la camisa, denominados como 1 y 2 en la hoja de control.



Dim.	Crit. de aprobación	Lado 1			Lado 2		
		Medida	Verifica	Operador	Medida	Verifica	Operador
D1	2 ^{+0/-0.005}						
D2	1.75 ^{+0/-0.002}						
D3	1.17						
LT	12.3						
L1	0.53						
L2	1.98						
L3	0.02 ^{+0.005/-0}						

Figura 31. Formulario de aceptación de pieza terminada (Caso de aplicación: Camisa).

4.5.2. Fabricación

La fabricación, del primer lote de componentes, fue asignada a un proveedor externo, al cual se le entregaron los planos de detalle y el material (luego de su proceso de aceptación según lo indicado en la Sección 4.5.1.2). En la Figura 32, se muestran las piezas terminadas al momento de su recepción.

Una vez finalizado el proceso de maquinado de las piezas, se deben llevar a cabo todos los procedimientos descritos en la Sección 4.5.1.3. A continuación, se desarrolla la aplicación de los siguientes procedimientos:

- Ensayo de superficie.
- Ensayo hidrostático.



(a) Camisas.



(b) Cupla.



(c) Cuerpo cupla de inyección.



(d) Bloque cupla de inyección.

Figura 32. Componentes fabricados.

4.5.2.1 Ensayo de superficie

La Empresa tiene capacidad instalada y personal calificado para realizar ensayos por partículas magnéticas y líquidos penetrantes. En este caso particular, si bien ambos métodos son adecuados, se decidió utilizar líquidos penetrantes dada su ejecución simple y su menor susceptibilidad a la indicación de falsos positivos (Echeverría, 2002). Por lo tanto, se inspeccionaron todas las superficies accesibles en busca de defectos, aplicando el siguiente procedimiento:

1. Limpieza de las piezas con agua caliente a presión, y a continuación con un solvente apropiado, con el objetivo de quitar cualquier depósito de grasa sobre la superficie.
2. Aplicación del líquido penetrante con pincel, cubriendo toda la superficie (ver Figura 33a).

3. Se establece un período de reposo de cinco minutos, con el objetivo de permitir que el líquido penetre en eventuales grietas o fisuras que pudiesen existir.
4. Limpieza de la superficie con abundante agua sin presurizar, para evitar que la tinta atrapada en una eventual fisura sea removida.
5. Aplicación del revelador con pulverizador de pintura (ver Figura 33b).
6. Se establece un período de reposo de cinco minutos, con el objetivo de que la tinta atrapada ascienda por capilaridad y se evidencie en la superficie.
7. Evaluación de las indicaciones por parte de un inspector calificado.

Para todo el lote de piezas ensayado, no se encontraron indicaciones relevantes por lo que se considera el ensayo de superficie satisfactorio.



(a) Aplicación del líquido.



(b) Aplicación del revelador.

Figura 33. Ensayo de líquidos penetrantes.

4.5.2.2 Ensayo hidrostático

El equipamiento disponible en la Empresa, para realizar este tipo de ensayo, permitió adoptar la configuración que se muestra en la Figura 34. La disposición contempla una camisa y dos cuplas, en cuyos extremos se colocan tapones de prueba de alta presión. En el extremo derecho se observa la línea de suministro de agua, mientras que la válvula instalada en el extremo opuesto permite realizar la purga del sistema. Es deseable que, durante el ensayo, se minimice la cantidad de burbujas de aire atrapadas dentro del equipo,

ya que esto dificulta la estabilización de la presión. Una vez que el equipo fue purgado, se aplica la presión en forma escalonada hasta alcanzar los valores indicados para el ciclo de presión especificado.

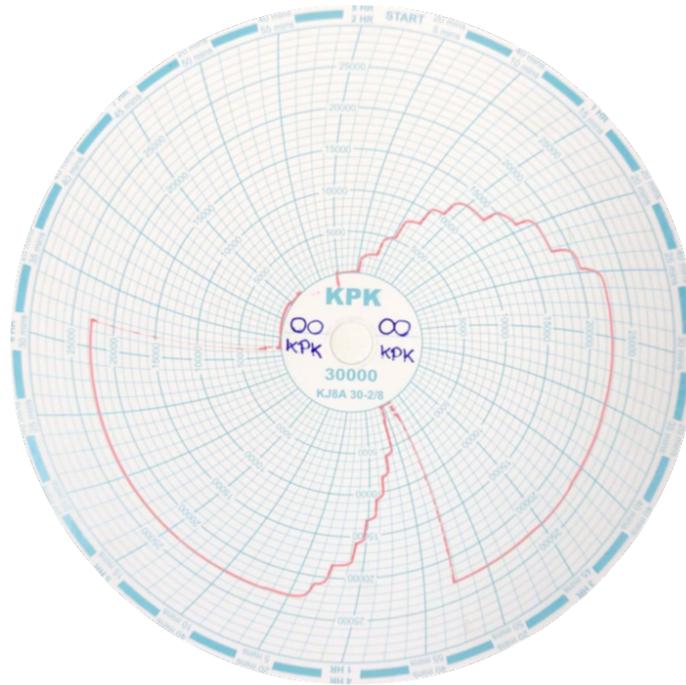


Figura 34. Disposición general del ensayo.

La adquisición de los datos se realizó mediante la instrumentación del sistema con transductores de presión. Los registros, necesarios para generar los informes, se obtuvieron a través de dos registradores: uno de carta o analógico (ver Figura 35a) y otro digital (ver Figura 35b).

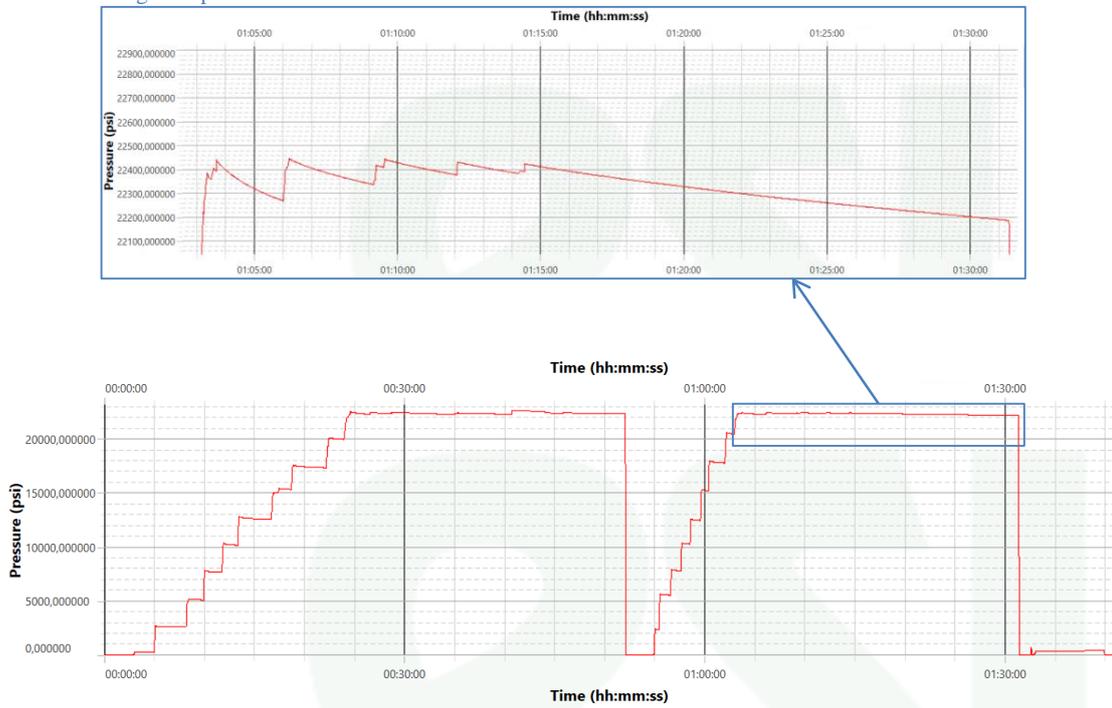
El ensayo se realizó según lo especificado en la Sección 3.3.5. La presión se aplicó en forma gradual, contemplando diez escalonamientos hasta alcanzar la presión de prueba, procurando estabilizar la presión en torno al valor especificado. La caída de presión registrada, tanto en el período de ensayo primario como en el secundario, no superó el valor límite especificado por la norma de aplicación (ver detalle Figura 35b)

Una vez finalizado el ensayo de presión, si bien no es un requerimiento normativo, de forma complementaria la Empresa especifica un ciclo de presión adicional de cinco minutos (entre 250 psi y 350 psi). Este requerimiento adicional, tiene como objetivo verificar que los sellos blandos no se hayan dañado durante el ensayo principal, manteniendo sus características elásticas inherentes. El ensayo realizado en estas condiciones se considera satisfactorio, dado que no se produjo una caída de presión mayor al valor límite especificado (40 psi).



(a) Registro analógico.

Segundo período de mantenimiento



(b) Registro digital.

Figura 35. Registro de presión durante el ensayo hidrostático.

4.6. Validación

En función de lo expuesto en la Sección 3.3.6, se instalaron cuatro galgas posicionadas de forma tal que pudiesen medir la deformación transversal y longitudinal de cada componente (ver Figura 37). Los registros se realizaron una vez alcanzada la presión de prueba durante el ensayo hidrostático del equipo (ver Figura 34).

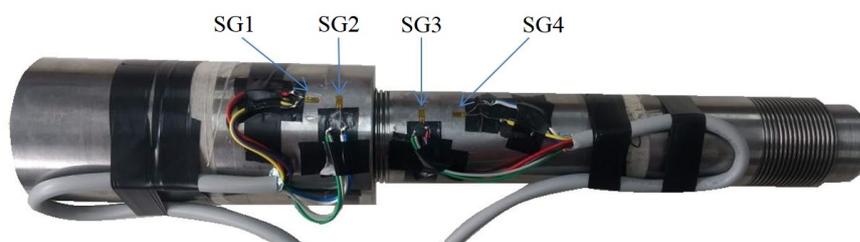


Figura 36. Posición de las galgas extensométricas.

La Figura 37 esquematiza el sistema, de adquisición y procesamiento de la señal, empleado durante el ensayo. Dicho sistema se compone principalmente de: strain gauges (6/120 Ly41), adquisidor de datos HBM Quantum X MX1615B y el software HBM Catman Easy (<http://hbm.com/>).

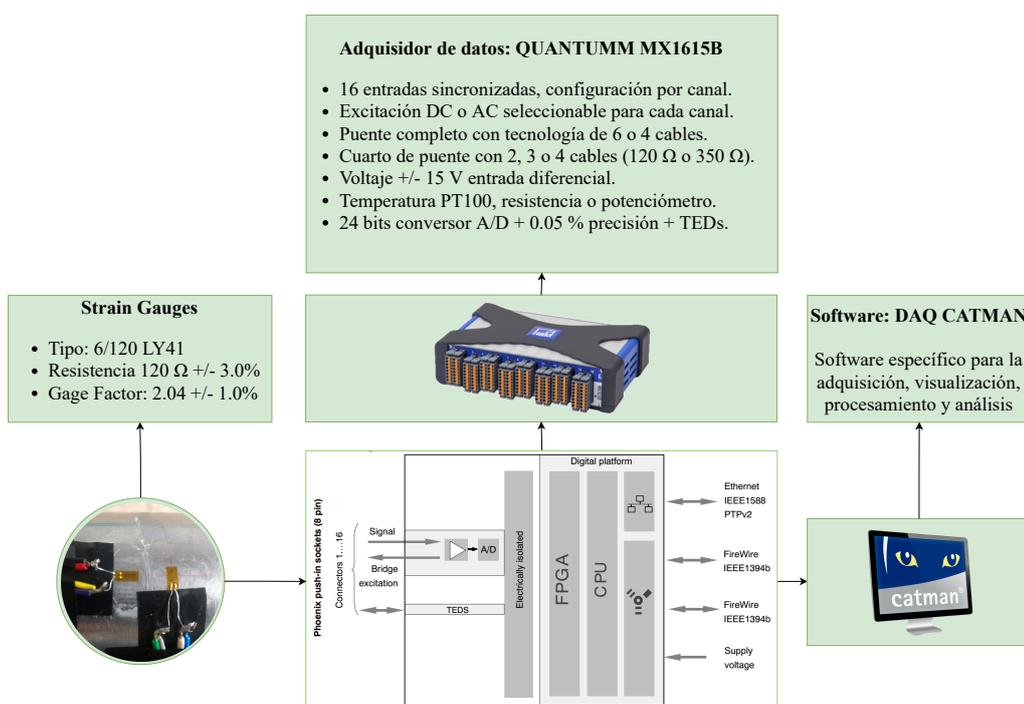


Figura 37. Esquema del sistema de adquisición y procesamiento de datos.

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo, y se comparan con los obtenidos del modelo de elementos finitos (MEF), en cada una de las posiciones analizadas. Se puede observar que la diferencia porcentual, entre los valores obtenidos por extensometría y el modelo de elementos finitos, alcanza un valor de hasta el 30 %. Esta diferencia, se considera aceptable para una primera iteración del proceso de diseño.

Tabla 13. Resultados de ensayo de extensometría.

Componente	SG	SG [$\mu\epsilon$]	MEF [$\mu\epsilon$]	Δ %
Cupla	1	138	166	20,7
	2	117	125	7,3
Camisa	3	469	560	19,4
	4	112	145	29,9

4.7. Análisis de Costos

Se realizó un análisis del costo de fabricación, y su relación con un volumen de producción dado, de los equipos a partir de la metodología propuesta por Ullman (2003). No se fueron incluidos, en este análisis, los costos de comercialización y el beneficio proyectado.

Los gastos generales incluyen los costos asociados a la administración, ingeniería, instalaciones y otros que se deben afrontar, incluso cuando la producción sea nula. Para este análisis, se contabilizaron las horas de ingeniería asignadas al proyecto y la certificación.

El costo asociado a la amortización de los equipos y herramental específico queda fuera del alcance de esta evaluación. Si se consideraron los insumos requeridos para realizar los END.

Para la estimación de la mano de obra directa, se asignaron recursos propios de la empresa, considerando que el personal estará afectado a las tareas control dimensional, Ensayos No Destructivos, tratamiento superficial y marcado de los equipos.

El proceso de mecanizado fue tercerizado, por lo que se obtiene un costo directo para cada pieza fabricada. Las piezas estándar (por ejemplo: o-rings y tornillos), tienen una incidencia menor en los costos, en relación con los otros componentes.

El costo de los materiales está compuesto por dos costos variables:

- Cantidad de piezas fabricadas.

- Provisión del material: la incidencia en el costo total del lote, se compone del costo de tratamiento térmico y de los ensayos de certificación. Si la cantidad de material adquirido aumenta, siempre que provenga de la misma colada y mismo lote de tratamiento térmico, el costo asociado a cada pieza disminuye. En el caso del primer lote fabricado, se contempló la adquisición de material suficiente para fabricar dos equipos completos.

En el diagrama, que se presenta en la Figura 38, se pueden observar las variables que se tuvieron en cuenta al momento de estimar el costo de fabricación del primer lote, considerando que el diseño está certificado por un ente independiente. Se puede notar que, las tareas asociadas al diseño y la certificación, tienen mayor incidencia sobre el costo total. Sin embargo, estos son costos en los cuales se incurrirá por única vez, con lo cual su peso relativo disminuye al aumentar la producción del equipo.

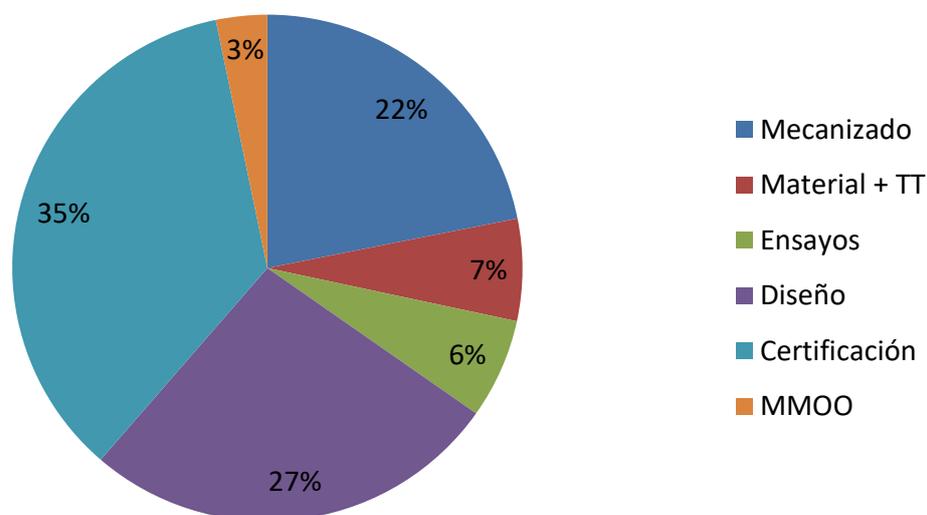


Figura 38. Incidencia relativa de los costos en la fabricación del primer lote de producción.

A continuación, con el objetivo de evaluar la incidencia de los costos fijos sobre el valor del producto final, se estimaron los costos asociados a la producción de diez equipos completos. En la Figura 39, se expone la incidencia relativa de cada ítem sobre los costos totales para este nivel de producción.

En la Figura anterior, se observa que al aumentar el volumen de producción se registra una importante disminución de la incidencia de los costos de diseño, certificación y en-

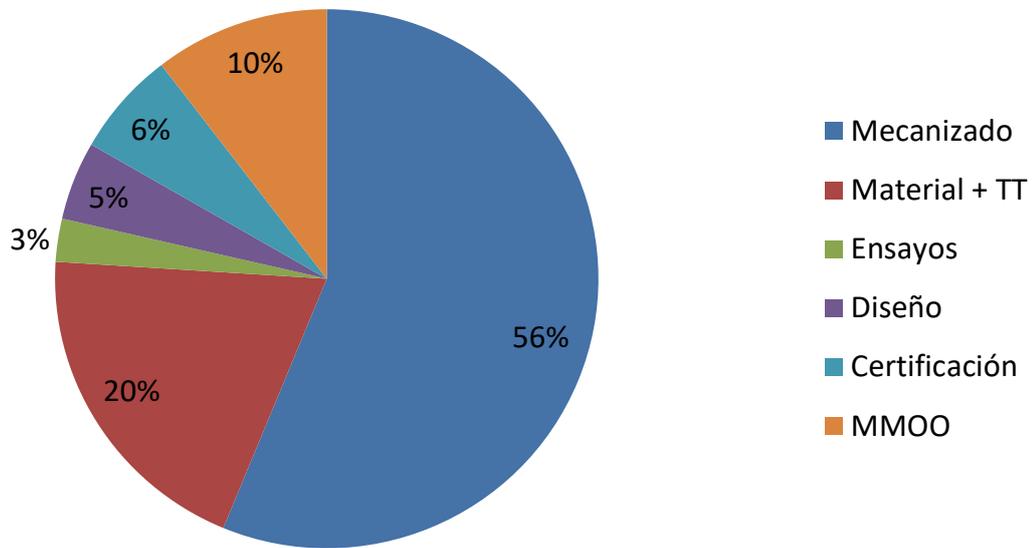


Figura 39. Incidencia relativa de los costos de fabricación de diez equipos.

sayos. Dado que los ensayos se deben realizar sobre cada lote de tratamiento térmico del material adquirido, al aumentar el tamaño de los mismos se obtienen una baja importante del costo asociado a cada pieza. Además se observa que durante una producción continua, el mecanizado tiene la mayor incidencia sobre el costo total, por lo que se debe centrar la atención en este proceso con el objetivo de disminuir los costos.

5. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

En función del desarrollo alcanzado, se identificaron algunas actividades que quedaron pendientes de realizar o de profundizar, ya sea porque no estaban contempladas en el alcance de este trabajo, o bien, por la imposibilidad de ser realizadas dentro de los plazos establecidos. En este sentido, se propone:

- Dado que los resultados obtenidos por el MEF son conservativos, respecto a los obtenidos de forma experimental (ver Tabla 13), se considera oportuno dar continuidad a un proceso de optimización que permita disminuir la fuente de incertidumbres asociadas al modelo (relacionadas principalmente con la real aplicación de la carga, restricciones de vínculo y las zonas de contacto entre diversos elementos). La aplicación de un proceso iterativo de diseño, calibrando el MEF a partir de los resultados obtenidos por extensometría, permitirá reducir de manera significativa el peso del componente manteniendo un adecuado comportamiento estructural.
 - Dado que el tratamiento superficial anticorrosivo y el proceso de pintura no fueron abordados, en este trabajo, y que se aplicaron los procedimientos vigentes en la Empresa, corresponde revisar y, dado el caso, actualizar los procedimientos vigentes en base a las técnicas y productos disponibles en el mercado.
 - Completar el análisis de costos contemplando un análisis de la demanda del mercado, con el objetivo de estimar los niveles de producción óptimos.
-

6. CONCLUSIONES

En este trabajo, se elaboraron la memoria de cálculo y la ingeniería de detalle de los componentes principales. En paralelo, se completó la documentación requerida para actualizar el SGC. A partir de esta documentación, la Empresa se encuentra en condiciones de iniciar el proceso de certificación de la cabeza de inyección de grasa para un equipo de control de presión conforme a los requerimientos de API 6A.

Con el objetivo de validar el diseño, se fabricó un equipo sobre el cual se realizaron todos los ensayos de aceptación y se evaluó el nivel de esfuerzos aplicando técnicas extensométricas.

La metodología propuesta permitió obtener resultados satisfactorios, en concordancia con los objetivos planteados, sentando las bases para su aplicación en el desarrollo de equipos similares.

En lo que respecta a los procedimientos desarrollados para el SGC, cabe destacar que la norma API 6A hace especial hincapié en el control de la calidad del material y de las piezas terminadas. Para alcanzar dichos estándares de calidad, el material debe contar con documentación detallada sobre los procesos tecnológicos y ensayos aplicados. Por esta razón, se considera oportuno desarrollar proveedores nacionales con el fin de garantizar el cumplimiento de los requerimientos planteados.

El desarrollo alcanzado permite disponer de un equipo, con las características necesarias, que se constituye en una alternativa de mercado válida frente a los equipos fabricados por reconocidas marcas extranjeras. Con el beneficio adicional de aportar valor a las PyMEs locales.

Finalmente, y a título personal, el desarrollo del Proyecto Integrador Profesional (PIP) me permitió integrar, en un caso de aplicación real, los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera. En particular, resultó muy enriquecedor la diversidad de conceptos aplicados relativos a: materiales, cálculo de equipos sometidos a presión, tecnología mecánica y la aplicación de estándares de calidad. En este sentido, fue muy valioso también el aporte realizado por personal de la Empresa con acreditada experiencia en la industria hidrocarbúrfica.

7. REFERENCIAS

- Akin, J. E. (2010). *Finite element analysis concepts: via SolidWorks*. World Scientific.
- API. (2019a). *API 6A - Specification for Wellhead and Tree Equipment* (21st. Edition). American Petroleum Institute.
- API. (2019b). *API 6X - Design Calculations for Pressure-containing Equipment* (2nd. Edition). American Petroleum Institute.
- ASME. (1997). *ASME B1.5 - ACME Screw Threads*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2013). *ASME Sec. VIII, Div. 2 - Rules for Construction of Pressure Vessels: Alternative Rules*. The American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM. (2016). *ASTM A370-16. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*. ASTM International.
- ASTM. (2018). *ASTM E10-18. Standard Test Method For Brinell Hardness Of Metallic Materials*. ASTM International.
- Bolek, D. (2018). Simplification methods for reducing computational effort in mechanical analysis. *Saimaa University of Applied Sciences*.
- Budynas, R. & Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9a. ed.)*
- Chaaban, A. & Jutras, M. (1992). Static analysis of buttress threads using the finite element method. *J. Pressure Vessel Technol.*, 114(2), 209-212.
- Chen, J.-J. & Shih, Y.-S. (1999). A study of the helical effect on the thread connection by three dimensional finite element analysis. *Nuclear engineering and design*, 191(2), 109-116.
- Dragoni, E. (1994). Effect of thread pitch and frictional coefficient on the stress concentration in metric nut-bolt connections.
- Echeverria, R. (2002). *Partículas magnetizables*. EDUCO.
- Echeverria, R. (2003). *Líquidos penetrantes*. EDUCO.
- Farr, J. R. & Jawad, M. H. (2010). *Guidebook for the design of ASME section VIII pressure vessels*. American Society of Mechanical Engineers.
- FKM. (2012). *Analytical Strength Assessment of Components* (Sexta Edición). VDMA Verlag.
-

-
- HIP. (s.f.). High Pressure Valves, Fittings and Tubing - 30,000, 40,000 and 60,000 psi service.
- Hoffman, K. (1989). *An Introduction to Measurements using Strain Gauges*. HBM GmbH.
- IAS. (1987). *IAS-IRAM. Acero para construcciones metálicas. Hojas de características*.
- ISO. (2015). *ISO 9000 - Sistemas de gestión de la calidad - Fundamentos y vocabulario*. Internacional Organization for Standardization.
- Kocurek, C. G., Pathak, P., Melancon, C., Sohn, S. y col. (2012). Merging ASME and API Design Methods for Subsea Equipment Up To 25,000 PSI Working Pressure. *Offshore Technology Conference*.
- Miranda, C. A. d. J., Faloppa, A. A., Mattar Neto, M. & Fainer, G. (2011). ASME stress linearization and classification-a discussion based on a case study. *2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011*.
- More, S. T. & Bindu, R. (2015). Effect of mesh size on finite element analysis of plate structure. *Int. J. Eng. Sci. Innovative Technol*, 4(3), 181-185.
- NACE. (2015). *ANSI/NACE MR0175/ISO 15156-1:2015 - Petroleum, petrochemical, and natural gas industries — Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production*. NACE, ANSI, ISO.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas. Un enfoque integrado* (Cuarta Edición). Pearson Educación.
- Parker. (s.f.). Parker O-Ring Handbook Catalog ORD 5700A/US.
- Poggesi, R., Murdoch, W. & Redford, M. (2017). *Manual de Capacitación para Control de Presión de 10 000 psi*. Elmar-NOV.
- Sanzi, H. (2016). La simulación computacional aplicada en la ingeniería. El Código ASME Sección VIII, División 2. *Actas del V CAIM*, 881, 1562-1572.
- Schlumberger. (2013). *Level 2 - WHE 10K Pressure Certification*. Schlumberger.
- Ullman, D. (2003). *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill.
- Ulrich, K. & Eppinger, S. (2015). *Product Design and Development*. Editorial Mc Graw-Hill.
- Yapur, M., García, J. I. O. & Salazar, D. H. T. (2005). Medición de esfuerzos y deformaciones en barras metálicas utilizando galgas extensométricas. *Escuela Superior Politécnica del Litoral*.
-

A. DIMENSIONES GENERALES**B. MEMORIA DE CALCULO****B.1. Terminología**

Magnitud	Símbolo
Tensión Equivalente	S_E
Resistencia a la fluencia mínima especificada	S_Y
Resistencia a la tracción mínima especificada	S_U
Elongación a la rotura	A
Estricción a la rotura	Z
Modulo de elasticidad	E
Componente del esfuerzo normal	σ_x, σ_y y σ_z
Componentes del esfuerzo de corte	τ_{xy}, τ_{yz} y τ_{zx}
Intensidad de tensión de diseño	S_m
Intensidad de tensión general primaria de membrana admisible	S_t
Tensión primaria de membrana general	P_m
Tensión primaria de membrana local	P_L
Tensión primaria de flexión	P_b
Tensiones principales	σ_1, σ_2 y σ_3
Tensión hidrostática	σ_H
Grado de multiaxialidad	h
Diámetro efectivo nominal	$d_{eff,N}$
Constante para $K_{d,m}$	$a_{d,p}$
Constante para $K_{d,p}$	$a_{d,m}$
Diámetro efectivo	d_{eff}
Factor de anisotropía	K_A
Resistencia a la fluencia, para d_{eff}	R_p
Resistencia a la tracción, para d_{eff}	R_m
Factor de sección	n_{pl}
Deformación total crítica	ε_{ertr}
Deformación crítica mínima a alta multiaxialidad	ε_{ref}
Deformación de referencia	ε_0
Resistencia del componente	σ_{SK}
Grado de utilización	a_{SK}
Factores de seguridad:	
Total	j_{ges}
De carga	j_S
Fractura a temperatura normal	j_m
Fluencia a temperatura normal	j_p
Fractura a temperatura elevada	j_{mt}
Fluencia a temperatura elevada	j_{pt}
Factores de temperatura	$K_{T,m}, K_{T,p}$

B.2. Verificación estructural de la unión roscada

Las roscas de acople entre los equipos se verificaron según el procedimiento dado por la norma FKM para la evaluación de la resistencia estática utilizando esfuerzos locales. La Figura 40 muestra el algoritmo completo de cálculo.

-
1. Tensiones principales en el punto de referencia, obtenidas del modelo de elementos finitos:

$$\sigma_1 = 1061 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 425 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 23 \text{ MPa}$$

2. Tensión equivalente:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (16)$$

$$\sigma_V = 907 \text{ MPa}$$

3. Tensión hidrostática:

$$\sigma_H = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (17)$$

$$\sigma_H = 503 \text{ MPa}$$

4. Grado de multiaxialidad:

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} \quad (18)$$

$$h = 0,55$$

5. Propiedades del material:

- a) Obtenidas de la hoja de datos del material (Figura 11):

Resistencia estándar a la fluencia, $R_{p,N} = 650 \text{ MPa}$.

Resistencia estándar a la tracción, $R_{m,N} = 800 \text{ MPa}$

Elongación a la rotura, $A = 24 \%$

- b) Diámetro efectivo nominal:

$$d_{eff,N} = 16 \text{ mm}$$

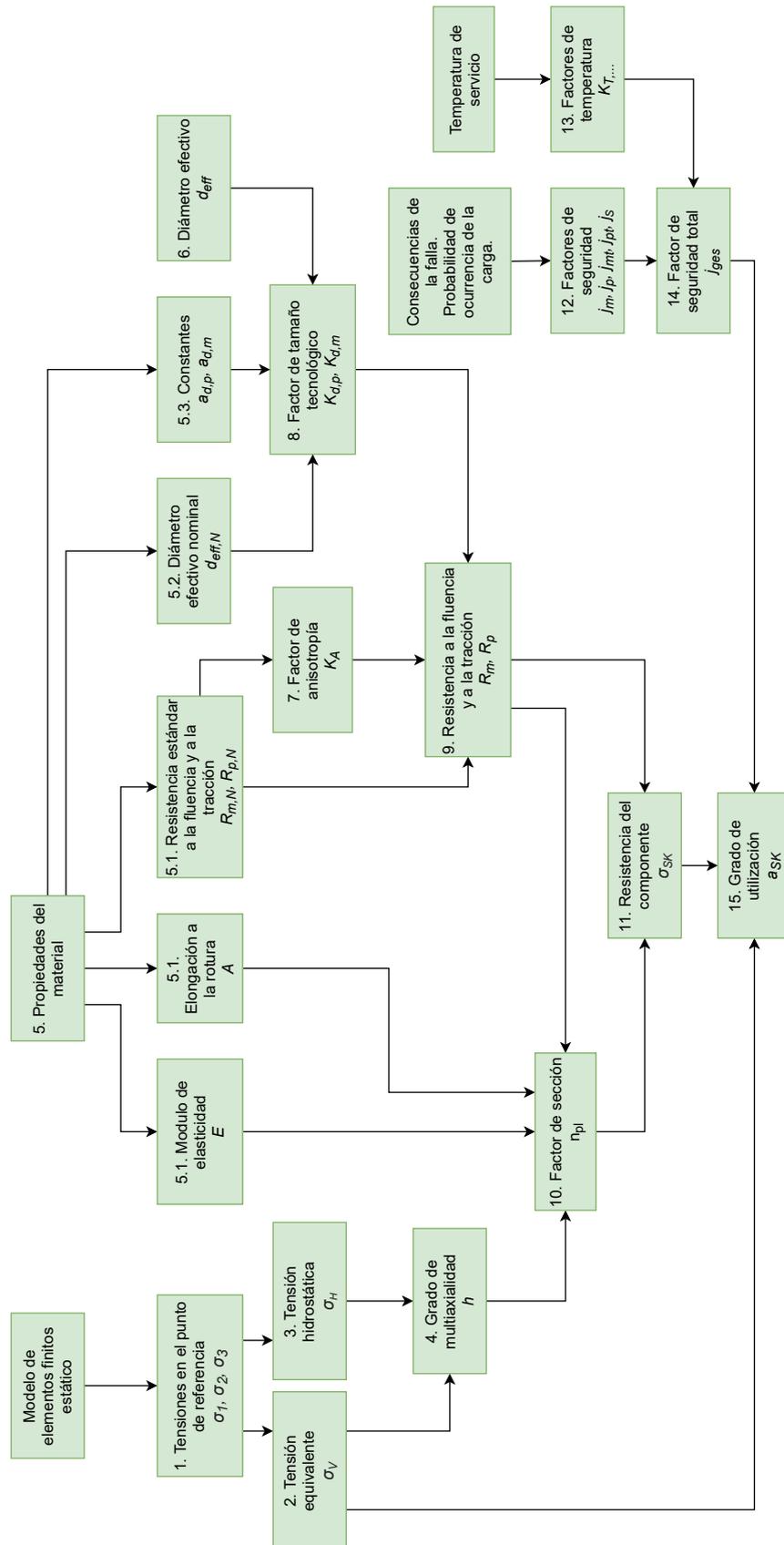


Figura 40. Algoritmo de cálculo FKM para evaluación de resistencia estática utilizando tensiones locales.

Valor obtenido a partir de Tabla 3.2.1 (FKM, 2012).

c) Constantes $a_{d,p}$ y $a_{d,m}$:

$$a_{d,p} = 0,3$$

$$a_{d,m} = 0,4$$

Valores obtenidos a partir de Tabla 3.2.1 (FKM, 2012). Estas constantes se utilizan para obtener el factor de tamaño tecnológico cuando $d_{eff} > d_{eff,N}$.

6. Diámetro efectivo: Se obtiene a partir de la sección transversal del componente. Se utiliza la sección de la raíz del filete, la misma es un rectángulo cuyo ancho está dado por el ancho del filete $s = 1,78mm$ y el largo está dado por la longitud de una vuelta de filete $b = 161,3mm$. La norma FKM indica que el diámetro efectivo equivalente se obtiene para aceros templados y revenidos y para una sección rectangular a partir de la ecuación 32.

$$d_{eff} = \frac{2 b s}{b + s} \quad (19)$$

$$d_{eff} = 3,52 \text{ mm}$$

7. Factor de anisotropía:

$$K_A = 0,86$$

Valor obtenido a partir de Tabla 3.2.4 (FKM, 2012) en función del tipo de material y la resistencia a la fluencia estándar.

8. Factor de tamaño tecnológico: Si el diámetro efectivo es menor que el nominal entonces:

$$K_{d,m} = K_{d,p} = 1 \quad (20)$$

9. Resistencia a la fluencia y a la tracción:

$$\begin{aligned} R_m &= K_{d,m} K_A R_{m,N} \\ R_p &= K_{d,p} K_A R_{p,N} \end{aligned} \quad (21)$$

$$R_m = 688 \text{ MPa}$$

$$R_p = 559 \text{ MPa}$$

10. Factor de sección:

$$n_{pl} = \text{MIN} \left(\sqrt{E \varepsilon_{ertr} / R_p}; K_p \right) \quad (22)$$

$$\varepsilon_{ertr} = \begin{cases} \varepsilon_{ref} & \text{para } h \leq 1/3 \\ \varepsilon_0 + 0,3 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ref} - \varepsilon_0}{0,3} \right)^{3 \cdot h} & \text{para } h > 1/3 \end{cases} \quad (23)$$

$$\varepsilon_{ref} = A \quad (24)$$

$$\varepsilon_0 = 0,05$$

El primer término de la ecuación 36 es la deformación crítica y el segundo es el factor de entalla plástico. La mínima deformación crítica a alta multiaxialidad ε_0 , se obtiene a partir de la Tabla 3.3.1 (FKM, 2012).

La norma indica que en el caso que el punto de referencia se trate de un punto plástico, solo la deformación crítica es relevante, por lo cuál el factor de entalla plástico K_p no fue calculado.

$$n_{pl} = 8,45$$

11. Resistencia del componente:

$$\sigma_{SK} = R_p n_{pl} \quad (25)$$

$$\sigma_{SK} = 4726 \text{ MPa}$$

12. Factores de seguridad: Se obtienen a partir de la Tabla 3.5.1 (FKM, 2012), considerando consecuencias de la falla altas y probabilidad de ocurrencia de la carga alta.

$$j_m = 2,0$$

$$j_p = 1,5$$

$$j_{mt} = 1,5$$

$$j_{pt} = 1,0$$

El factor de carga j_S se considera igual a la unidad, dado que se conoce con mucha precisión el estado de carga durante el ensayo hidrostático.

13. Factores de temperatura:

$$K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,2e - 3\frac{T}{\text{°C}} \quad (26)$$

Donde T es la temperatura de servicio, la cual se asume como la máxima para la cual está calificado el equipo $T = 121\text{°C}$.

$$K_{T,m} = K_{T,p} = 0,85$$

Los factores $K_{Tt,m}$ y $K_{Tt,p}$ contemplan la seguridad a la falla por creep. No se consideró dicho efecto, por lo que estos valores se toman igual a la unidad.

14. Factor de seguridad total:

$$j_{ges} = j_s \text{ MAX} \left(\frac{j_m}{K_{T,m}} \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) \quad (27)$$

$$j_{ges} = 1,91$$

15. Grado de utilización:

$$a_{SK} = \frac{\sigma_V}{\sigma_{SK}/j_{ges}} \leq 1 \quad (28)$$

$$a_{SK} = 0,367$$

B.3. Verificación estructural del bloque

El bloque de la cupla de inyección se verificó según el procedimiento dado por la norma FKM para la evaluación de la resistencia estática utilizando esfuerzos locales. La Figura 40 muestra el algoritmo completo de cálculo.

1. Tensiones principales en el punto de referencia, obtenidas del modelo de elementos finitos:

$$\sigma_1 = 1061 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = 425 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = 23 \text{ MPa}$$

2. Tensión equivalente:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (29)$$

$$\sigma_V = 1174 \text{ MPa}$$

3. Tensión hidrostática:

$$\sigma_H = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (30)$$

$$\sigma_H = 480,3 \text{ MPa}$$

4. Grado de multiaxialidad:

$$h = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} \quad (31)$$

$$h = 0,41$$

5. Propiedades del material:

a) Obtenidas de la hoja de datos del material (Figura 11):

Resistencia estándar a la fluencia, $R_{p,N} = 650 \text{ MPa}$.

Resistencia estándar a la tracción, $R_{m,N} = 800 \text{ MPa}$

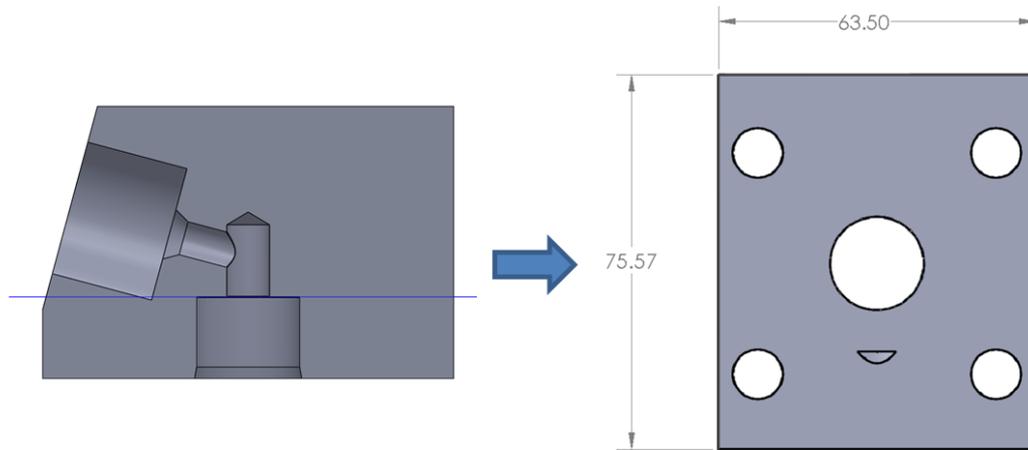


Figura 41. Sección representativa del bloque para obtener d_{eff} .

Elongación a la rotura, $A = 24\%$

b) Diámetro efectivo nominal:

$$d_{eff,N} = 16 \text{ mm}$$

Valor obtenido a partir de Tabla 3.2.1 (FKM, 2012).

c) Constantes $a_{d,p}$ y $a_{d,m}$:

$$a_{d,p} = 0,3$$

$$a_{d,m} = 0,4$$

Valores obtenidos a partir de Tabla 3.2.1 (FKM, 2012). Estas constantes se utilizan para obtener el factor de tamaño tecnológico cuando $d_{eff} > d_{eff,N}$.

6. Diámetro efectivo: Se obtiene a partir de la sección transversal del componente. Al tratarse de una sección compleja, no es posible compararla obtener una expresión directa para d_{eff} . La norma indica en estos casos que se debe tomar una sección representativa del componente que pase a través del punto de referencia y luego, esta sección debe ser adaptada lo mejor posible a un rectángulo. La Figura 41 muestra la sección utilizada para obtener d_{eff} .

$$d_{eff} = \frac{2 b s}{b + s} \quad (32)$$

$$d_{eff} = 69 \text{ mm}$$

Se destaca que la sección utilizada es la de mayor tamaño que se puede tomar, asumiéndose un criterio conservador dado que la resistencia del material disminuye con el tamaño.

7. Factor de anisotropía:

$$K_A = 0,86$$

Valor obtenido a partir de Tabla 3.2.4 (FKM, 2012) en función del tipo de material y la resistencia a la fluencia estándar.

8. Factor de tamaño tecnológico: Si $d_{eff} > d_{eff,N}$:

$$K_{d,m} = \frac{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg(d_{eff}/7,5 \text{ mm})}{1 - 0,7686 \cdot a_{d,m} \cdot \lg(d_{eff,N,m}/7,5 \text{ mm})} \quad (33)$$

$$K_{d,p} = \frac{1 - 0,7686 \cdot a_{d,p} \cdot \lg(d_{eff}/7,5 \text{ mm})}{1 - 0,7686 \cdot a_{d,p} \cdot \lg(d_{eff,N,m}/7,5 \text{ mm})} \quad (34)$$

$$K_{d,m} = 0,83$$

$$K_{d,p} = 0,76$$

9. Resistencia a la fluencia y a la tracción:

$$R_m = K_{d,m} K_A R_{m,N} \quad (35)$$

$$R_p = K_{d,p} K_A R_{p,N}$$

$$R_m = 571 \text{ MPa}$$

$$R_p = 427 \text{ MPa}$$

10. Factor de sección:

$$n_{pl} = \text{MIN} \left(\sqrt{E \varepsilon_{ertr} / R_p}; K_p \right) \quad (36)$$

$$\varepsilon_{ertr} = \begin{cases} \varepsilon_{ref} & \text{para } h \leq 1/3 \\ \varepsilon_0 + 0,3 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{ref} - \varepsilon_0}{0,3} \right)^{3 \cdot h} & \text{para } h > 1/3 \end{cases} \quad (37)$$

$$\varepsilon_{ref} = A \quad (38)$$

$$\varepsilon_0 = 0,05$$

El primer término de la ecuación 36 es la deformación crítica y el segundo es el factor de entalla plástico. La mínima deformación crítica a alta multiaxialidad ε_0 , se obtiene a partir de la Tabla 3.3.1 (FKM, 2012).

La norma indica que en el caso que el punto de referencia se trate de un punto plástico, solo la deformación crítica es relevante, por lo cuál el factor de entalla plástico K_p no fue calculado.

$$n_{pl} = 10,43$$

11. Resistencia del componente:

$$\sigma_{SK} = R_p n_{pl} \quad (39)$$

$$\sigma_{SK} = 4456 \text{ MPa}$$

12. Factores de seguridad: Se obtienen a partir de la Tabla 3.5.1 (FKM, 2012), considerando consecuencias de la falla altas y probabilidad de ocurrencia de la carga alta.

$$j_m = 2,0$$

$$j_p = 1,5$$

$$j_{mt} = 1,5$$

$$j_{pt} = 1,0$$

El factor de carga j_S se considera igual a la unidad, dado que se conoce con mucha precisión el estado de carga durante el ensayo hidrostático.

13. Factores de temperatura:

$$K_{T,m} = K_{T,p} = 1 - 1,2e - 3\frac{T}{^\circ C} \quad (40)$$

Donde T es la temperatura de servicio, la cual se asume como la máxima para la cual está calificado el equipo $T = 121^\circ C$.

$$K_{T,m} = K_{T,p} = 0,85$$

Los factores $K_{Tt,m}$ y $K_{Tt,p}$ contemplan la seguridad a la falla por creep. No se consideró dicho efecto, por lo que estos valores se toman igual a la unidad.

14. Factor de seguridad total:

$$j_{ges} = j_S \text{ MAX} \left(\frac{j_m}{K_{T,m}} \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_p}{K_{T,p}}; \frac{j_{mt}}{K_{Tt,m}} \frac{R_p}{R_m}; \frac{j_{pt}}{K_{Tt,p}} \right) \quad (41)$$

$$j_{ges} = 1,91$$

15. Grado de utilización:

$$a_{SK} = \frac{\sigma_V}{\sigma_{SK}/j_{ges}} \leq 1 \quad (42)$$

$$a_{SK} = 0,464$$
