

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
INSITUTO DE TECNOLOGÍA
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Diseño de un sensor electroquímico de corrosión y
emulsiones para monitoreo continuo en líneas de
producción (*)**

por Ing. Alexander Mikhail Bischoff

Director

Dr. Walter Morris

Dr. Gustavo Duffo

(*) Tesis para optar al título de Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales

República Argentina

2025

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mi madre, Myriam, quien hizo todo lo que estuvo a su alcance para que sus hijos se convirtieran en la primera generación de profesionales. A mi hermano Fabián y a mi hermana Brigitte, por su cariño y apoyo.

A mis amigos, que fueron y continúan siendo mi refugio y mi sostén. Gracias por entenderme y regalarme su tiempo, su escucha y su compañía. En particular, a Pipi, Gabi, Lucas, Maru y Soli.

A mis compañeros de trabajo, quienes me acompañaron a lo largo de estos años y supieron comprender las dificultades de equilibrar una carrera de maestría con las responsabilidades profesionales.

A mis directores Walter y Gustavo que supieron adaptarse a mis ritmos y posibilidades. Gracias por la paciencia cuando me costaba avanzar, por la agilidad cuando fue necesaria, y por transmitirme la calma indispensable para no desesperar.

A la universidad pública y gratuita, y en particular a la UTN FRLP, casa donde cursé mis estudios de grado y donde se forjaron muchas de las bases que hicieron posible esta tesis.

A todas las personas que, de una forma u otra, me acompañaron a lo largo de estos años.

A YPF, por financiar esta formación, y en especial a Cacho, quien hizo posible que contara con ese apoyo.

Resumen

Una de las problemáticas identificadas en la industria, particularmente en la del *Oil & Gas* (O&G) y aplicable a toda la cadena, desde la extracción hasta refinación y procesos petroquímicos, es la dificultad de contar con herramientas que permitan evaluar la corrosividad y otras características del fluido transportado de manera versátil y sin la necesidad de realizar obras que impliquen modificaciones de carácter metalúrgico con tareas en caliente.

Este trabajo se focaliza en el desarrollo de una plataforma de monitoreo interno (PMI) diseñada en base a una placa tipo anillo de drenaje a la que se le acoplan 4 puertos con sus respectivos sistemas de aislamiento, permitiendo el montaje y desmontaje de distintos tipos de sensores y/o electrodos. La placa se monta entre bridas para facilitar su instalación y los sensores quedan dispuestos de manera de no generar restricciones al pasaje interno (configuración *flush*) de la cañería.

El diseño se realizó basándose en las reglas de cálculo y análisis mediante elementos finitos (FEA) del código *ASME VII sección 2 parte 5*. Además, se consideraron otros estándares de referencia para asegurar que sus componentes mecánicos sean fácilmente implementables (dimensiones de bridas, tuercas y pernos entre otros).

Se diseñó un sistema de aislación y sujeción de varillas retráctiles porta sensores que también fue verificado mediante análisis FEA.

El resultado de la evaluación según el criterio elasto-plástico del código ASME da como resultado que las dimensiones y características de las piezas son aptas para el servicio. El dispositivo permitirá monitorear en forma continua parámetros como la velocidad de corrosión de la instalación, la resistividad y corrosividad del medio y el corte de agua, así como la presencia de emulsiones en caso de transportar fluidos bifásicos (crudo y agua).

Palabras clave: Oil & Gas, plataforma de monitoreo interno, anillo de drenaje, ASME, EIS, FEA, elementos finitos, velocidad de corrosión, emulsiones.

Abstract

One of the challenges identified in the industry, particularly in Oil & Gas (O&G) and applicable across the entire value chain—from extraction to refining and petrochemical processes—is the difficulty of having tools that allow for a versatile evaluation of fluid corrosivity and other characteristics without the need for tasks involving metallurgical modifications or hot works.

This work focuses on the development of an internal monitoring platform (IMP) designed based on a bleed ring type plate to which four ports with their respective isolation systems are attached, enabling the installation and removal of different types of sensors and/or electrodes. The plate is mounted between flanges to facilitate installation, and the sensors are arranged so as not to restrict the internal flow (flush configuration) of the pipeline.

The design was carried out based on the calculation rules and finite element analysis (FEA) of the ASME Code, Section VIII, Division 2, Part 5. In addition, other reference standards were considered to ensure that their mechanical components are easily implementable (dimensions of flanges, nuts, and bolts, among others).

An isolation and clamping system for retractable sensor-holder rods was also designed and verified through FEA analysis.

The evaluation according to the ASME elasto-plastic criterion shows that the dimensions and characteristics of the parts are suitable for service. The device will allow continuous monitoring of parameters such as the corrosion rate of the installation, the resistivity and corrosivity of the medium, and the water cut, as well as the presence of emulsions when transporting biphasic fluids (crude oil and water).

Keywords: Oil & Gas, internal monitoring platform, bleed ring, ASME, EIS, FEA, finite elements, corrosion rate, emulsions.

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Contenido.....	5
1 Introducción	9
1.1 Contexto general del problema	9
1.2 Importancia del monitoreo de corrosión en procesos industriales	9
1.3 Importancia de Medir las Fases en un Fluido de Producción.....	10
1.4 Objetivos de la tesis	11
1.5 Alcances y limitaciones	11
1.5.1 Alcances del Proyecto	11
1.5.2 Limitaciones del Proyecto.....	12
2 Técnicas electroquímicas	13
2.1 Fundamentos de corrosión.....	13
2.1.1 Reacciones de oxidación/reducción	14
2.1.2 Potenciales de electrodo	14
2.1.3 Ley de Faraday	19
2.1.4 Sobrepotencial de transferencia de carga.....	20
2.1.5 Curvas de polarización	21
2.2 Métodos de medición de corrosión	23
2.2.1 Métodos no electroquímicos	23
2.2.2 Métodos electroquímicos	25
2.3 Tipos de sensores aplicables en procesos industriales	37
2.3.1 Ubicación geométrica de la sonda o elemento de medición	37
2.3.2 Cantidad de elementos de la sonda	38
2.3.3 Sondos tipo WBE.....	38
2.3.4 Celda electroquímica	38
2.4 Técnicas de medición de fases O/W y W/O	40
2.4.1 Técnica de EIS	40
3 Introducción al Método de Elementos Finitos (FEM).....	44
3.1 Surgimiento del método de elementos finitos (<i>FEM</i>).....	45

3.2	Conceptos fundamentales del FEM	45
3.2.1	Algunos términos comunes utilizados en FEM	46
3.3	Resolución de problemas estructurales	47
3.3.1	Calculo tensional por FEM	48
3.4	Ventajas y limitaciones del FEM	49
3.5	Modelos 2D y 3D	50
3.5.1	Discretización del continuo	50
3.5.2	Tipos de Elementos	51
3.5.3	Orden de los elementos.....	52
3.5.4	Puntos de integración	53
3.6	Herramientas de mallado	54
3.6.1	<i>Method Control</i>	54
3.6.2	<i>Sizing Control</i>	55
3.6.3	<i>Contact Sizing Control</i>	55
3.6.4	<i>Refinement</i>	56
3.6.5	<i>Inflation Control</i>	56
3.6.6	<i>Element Quality</i>	56
3.7	Contactos.....	56
3.7.1	Tipos más habituales de contactos	56
3.7.2	Resumen de contactos y su comportamiento	58
3.8	Modelado de materiales	58
3.8.1	Elástico lineal	59
3.8.2	Plástico y elasto-plástico.....	59
3.8.3	Hiperelásticos.....	60
4	Diseño de la Plataforma de Medición	63
4.1	Descripción del proceso de diseño	63
4.1.1	Identificación del problema	64
4.1.2	Investigación e ideas conceptuales.....	64
4.1.3	Diseño preliminar	67
4.1.4	Simulación y realimentación.....	68
4.2	Requerimientos de servicio	68
4.2.1	Requerimientos de presión y temperatura	68
4.2.2	Requerimientos por fluidos.....	69

4.2.3	Requerimientos electroquímicos	69
4.2.4	Requerimientos mecánicos	71
4.3	Selección de materiales	71
4.3.1	Material para el límite de presión	72
4.3.2	Material para el sello	74
4.4	Integración de dispositivos de medición	76
4.4.1	Material de los electrodos.....	77
4.4.2	Configuración de electrodos para cada medición	78
4.4.3	Material de la varilla y el relleno	80
4.5	Accesibilidad y mantenimiento	81
4.6	Geometría y configuración de la plataforma	83
4.7	Criterios de diseño según ASME.....	83
4.7.1	Protección contra colapso Plástico	84
4.7.2	Protección Contra Falla Local	87
4.8	Modelos de materiales utilizados.....	88
4.8.1	Modelo utilizado para el metal	88
4.8.2	Modelo utilizado para el elastómero.....	90
5	Análisis por Elementos Finitos	95
5.1	Evolución del diseño	97
5.1.1	Modificaciones realizadas	100
5.2	Metodología general	100
5.2.1	Materiales.....	100
5.2.2	Simetrías y simplificaciones	101
5.2.3	Criterios de mallado y convergencia.....	103
5.2.4	Configuración de contactos <i>frictional</i>	104
5.2.5	Configuraciones particulares de post procesado	104
5.3	Análisis de sellado	105
5.3.1	Modelos evaluados	105
5.3.2	<i>Condiciones de carga y restricciones</i>	107
5.3.3	Características y malla	109
5.3.4	Resultados del modelo de sellado	111
5.4	Análisis de sujeción.....	120
5.4.1	Condiciones de carga y restricciones	121

5.4.2	Características y malla	121
5.4.3	Resultados del modelo de sujeción.....	123
5.5	Análisis estructural	127
5.5.1	Condiciones de carga y restricciones	127
5.5.2	Evaluación de los criterios de aceptación del código ASME.....	129
5.5.3	Análisis de componente brida.....	130
5.5.4	Análisis del componente soporte de sello	136
5.5.5	Análisis del componente tapón de sello	141
5.5.6	Análisis del componente tapón de sujeción.....	145
5.5.7	Resumen de resultados del análisis estructural.....	150
6	Conclusiones y trabajos futuros.....	151
6.1	Síntesis del trabajo realizado	151
6.2	Principales hallazgos.....	151
6.3	Implicancias prácticas	152
6.4	Trabajos futuros	152
6.5	Cierre	153
7	Glosario de símbolos.....	154
8	Referencias.....	159
9	Anexo A – Planos dimensionales	163

1 Introducción

1.1 Contexto general del problema

En la industria del petróleo y gas, la integridad de las líneas de producción representa un factor crítico para garantizar la seguridad operativa, la continuidad del servicio y la optimización de costos. Sin embargo, el monitoreo de corrosión y de las condiciones del fluido en líneas que ya se encuentran en operación presenta importantes desafíos. Tradicionalmente, la instalación de sistemas de medición o sensores requiere intervenciones complejas, costosas y, en muchos casos, la detención parcial o total del proceso, lo que impacta directamente en la productividad.

El tiempo y el costo de quitar de servicio un tanque o cañería para utilizar técnicas intrusivas es una consideración importante que deben tener en cuenta las operadoras de estos activos. [1]

Actualmente, existe la necesidad de contar con soluciones que permitan instalar sensores y equipos de monitoreo en líneas en servicio sin realizar obras mayores, reduciendo riesgos y tiempos de intervención. Estas soluciones deben ser versátiles, es decir, permitir la integración de diferentes tecnologías de medición de la corrosión, así como otros instrumentos que aporten información sobre las características de la corriente, ya que no existe una técnica sola que pueda ser utilizada exclusivamente para monitorear la corrosión y las condiciones operativas. [1]

El desarrollo de una plataforma modular y de fácil instalación representa una oportunidad para mejorar la gestión de integridad, optimizar la toma de decisiones y reducir costos operativos. Esta plataforma debe ser adaptable a diferentes escenarios y condiciones de operación, asegurando la confiabilidad de los datos y la seguridad del personal durante la instalación y el mantenimiento.

1.2 Importancia del monitoreo de corrosión en procesos industriales

La corrosión es una causa relevante de deterioro y fallas en equipos y ductos de la industria del petróleo y gas, generando pérdidas económicas importantes y contribuyendo a una gran proporción de incidentes operativos. Su impacto incluye costos elevados, interrupciones de producción y paradas no programadas, lo que resalta la necesidad de contar con sistemas eficaces de monitoreo y gestión para mantener la integridad y operación segura de las instalaciones. [2]

En el *upstream* (producción y transporte de crudo y gas), las condiciones son especialmente agresivas, debido a la presencia de CO₂, H₂S, agua con gran cantidad de sales, sólidos y microorganismos que aceleran los mecanismos corrosivos. Un monitoreo adecuado permite detectar tendencias tempranas, optimizar la inyección de inhibidores y reducir riesgos de pérdida de contención en líneas críticas.

En el *downstream* (refinación y procesamiento), la corrosión se ve influenciada por las variaciones de composición de las corrientes y variaciones de pH y contaminantes como cloruros o ácidos orgánicos. Aquí, el monitoreo continuo ayuda a prevenir fallas en equipos de alta criticidad como cañerías, intercambiadores, torres y reactores, etc., donde una interrupción puede significar millones en pérdidas.

Más allá del sector O&G, en cualquier proceso industrial donde existan fluidos corrosivos, el monitoreo es clave para:

- Extender la vida útil de los activos mediante mantenimiento predictivo.
- Cumplir normativas de seguridad y medio ambiente.
- Optimizar costos operativos, evitando sobredosificación de químicos o reemplazos prematuros.

1.3 Importancia de Medir las Fases en un Fluido de Producción

En la producción de hidrocarburos, el fluido extraído de un pozo generalmente es una mezcla de petróleo, agua y gas. Conocer la proporción de estas fases (relación agua-petróleo o petróleo-agua) es fundamental por varias razones:

A. Optimización de la Producción

- Permite ajustar estrategias de levantamiento artificial (bombeo mecánico, *gas lift* y otros) para maximizar la extracción de hidrocarburos.
- Ayuda a identificar problemas de producción, como entrada excesiva de agua (*coning*) o gas.

B. Gestión de Agua Producida

- El agua es un subproducto costoso: requiere tratamiento, reinyección o disposición segura.
- Un aumento en el corte de agua puede indicar canalización, fracturas o fallas en la cementación, lo que requiere intervención temprana.

C. Control de Corrosión e Incrustaciones

- El contenido de agua y su composición (salinidad) influyen directamente en la corrosión interna [3] y en la formación de incrustaciones.
- Medir estas fases permite ajustar la dosificación de inhibidores y reducir riesgos de integridad.

D. Balance de Masa y Planificación

- Datos precisos de proporciones son esenciales para balances de producción, cálculo de reservas y planificación de transporte y procesamiento.
- Impacta en la eficiencia de separadores y equipos de superficie.

E. Impacto Económico

- Un pozo con alto corte de agua puede ser económicamente inviable si los costos de manejo superan el valor del crudo producido.
- Medir fases permite decidir cuándo intervenir, reparar o cerrar un pozo.

1.4 Objetivos de la tesis

Por todo lo anterior se plantea desarrollar un sistema de medición para corrientes de recuperación terciaria (*Enhanced Oil Recovery, EOR*) y *flowback* (*etapa de recuperación de fluidos de fractura*) que detecte emulsiones y evalúe la corrosividad del fluido permitiendo:

- Medición en línea, sin necesidad de instalar *by-pass*.
- Diseño mecánico robusto para líneas de producción.
- Diseño sin perturbación de flujo.
- Mantenimiento mínimo.

Para esto, se propone diseñar un dispositivo para una condición operativa específica, que permita la instalación de sensores para evaluar la corrosividad y la relación de fases del fluido transportado, sin requerir trabajos de soldadura en campo.

Se plantea un diseño conceptual que será validado mediante la técnica de elementos finitos.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances del Proyecto

El presente proyecto se centra en el diseño, mediante análisis por elementos finitos (FEA) y bajo los criterios del código ASME, de un dispositivo modular que

permita la instalación de múltiples sensores en líneas de producción en operación. El diseño considera:

- Un sistema de cañerías de 4 pulgadas, clase 600, dado que es uno de los más utilizados en pozos de crudo no convencional en Argentina por su capacidad para soportar presiones elevadas.
- Material base: acero inoxidable tipo dúplex, cuya selección se justifica por su alta resistencia mecánica y excelente comportamiento frente a la corrosión en ambientes agresivos. La elección del material se detalla en la sección correspondiente.
- Integración de sensores para monitoreo de corrosión como Resistencia a la Polarización lineal (LPR), Resistencia Eléctrica (ER), Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), cupones y medición de características del fluido, incluyendo la relación de fases agua-crudo-gas.

1.5.2 Limitaciones del Proyecto

- El diseño se realiza a nivel de ingeniería conceptual y básica, mediante simulación FEA, sin incluir la fabricación ni pruebas experimentales.
- El análisis se limita a condiciones de operación máximas en líneas de conducción (*Gathering*) de YPF con presiones de 100 kg/cm², temperaturas de 100°C y menos de 1000 ciclos operativos.
- El diseño propuesto se evalúa para líneas de 4" serie 600.

No se aborda, en esta tesis, la integración con sistemas de adquisición de datos ni la calibración de sensores, ya que el alcance se centra en el diseño mecánico y estructural del dispositivo.

2 Técnicas electroquímicas

El presente capítulo tiene como objetivo brindar al lector una base teórica sobre los principios de la corrosión electroquímica, con el fin de contextualizar las distintas metodologías disponibles para la medición de velocidad de corrosión en sistemas industriales. Se abordan los fundamentos de las reacciones de oxidación-reducción, los potenciales de electrodo, la ley de Faraday, las curvas de polarización y el concepto de potencial de corrosión, entre otros aspectos clave que permiten comprender el comportamiento de los materiales metálicos en medios agresivos.

A continuación, se presentan las principales técnicas de medición de corrosión, tanto las no electroquímicas (como cupones y sondas de resistencia eléctrica) como las electroquímicas (incluyendo sensores galvánicos, extrapolación de Tafel, resistencia a la polarización lineal, ruido electroquímico, análisis de distorsión armónica, espectroscopía de impedancia electroquímica —EIS— y matrices de electrodos múltiples acoplados —CMEA—). Para cada técnica se describen sus principios de funcionamiento, configuración de electrodos y algunas ventajas, limitaciones y aplicaciones típicas.

Asimismo, se analizan aspectos como la geometría de montaje, la cantidad de elementos requeridos y la posibilidad de integración en plataformas de monitoreo en línea. Se destaca especialmente el potencial de la técnica EIS, no solo para evaluar la corrosividad del medio, sino también para caracterizar la proporción de fases en fluidos bifásicos (agua/crudo), lo que la convierte en una herramienta versátil para el diseño del dispositivo propuesto en esta tesis.

Este capítulo busca, en definitiva, establecer un marco conceptual y tecnológico que permita seleccionar y justificar las metodologías más adecuadas para el desarrollo de una plataforma de monitoreo interno (PMI).

2.1 Fundamentos de corrosión

La corrosión es el proceso de deterioro de un material, en general de un metal, debido a una reacción con el medioambiente. [4]

Si bien existen diversas clasificaciones de la corrosión, en este trabajo nos enfocaremos en las características fundamentales de la corrosión electroquímica ya que son las que nos conciernen.

Considerados desde el punto de vista de la participación de iones metálicos, todos los procesos de corrosión serían electroquímicos. Sin embargo, es usual designar como corrosión electroquímica aquella que se produce con un transporte simultáneo de electricidad a través de un electrolito. De los diversos solventes que pueden contener iones metálicos, el agua es el más estudiado, el

más extendido en la naturaleza, y el que, por lejos, se encuentra con mayor frecuencia en los casos de corrosión. [5]

Los tipos de corrosión pueden ser clasificados por su forma tal como se muestra en la Figura 2.1.

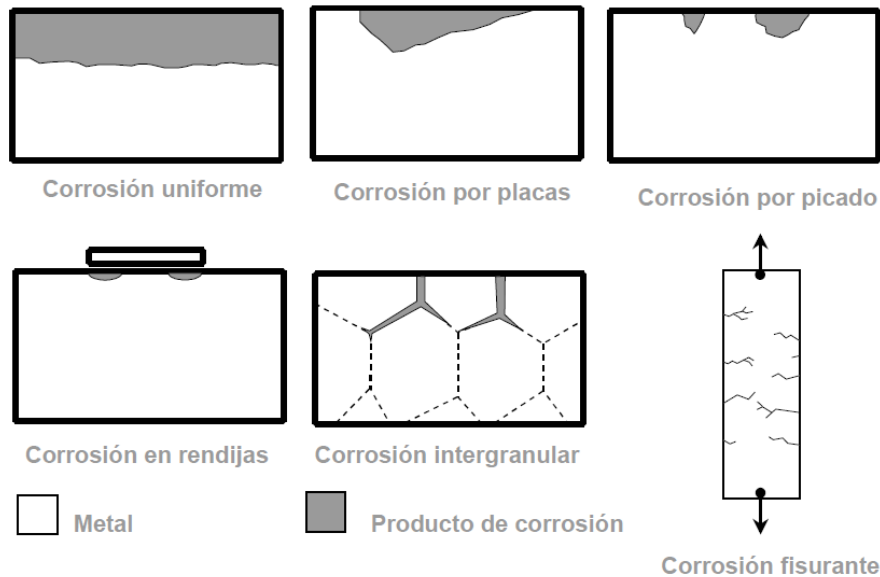


Figura 2.1 Representación esquemática de las diferentes formas de corrosión. En todos los casos el metal es visto en corte. Tomado de [5].

2.1.1 Reacciones de oxidación/reducción

Las reacciones electroquímicas involucran reacciones de oxidación y reducción que ocurren mediante el intercambio de electrones. En las reacciones de corrosión, estos intercambios se producen en sitios específicos. La oxidación ocurre en sitios llamados ánodos y la reducción en sitios llamados cátodos [4]. Es decir, el ánodo es el sitio donde el metal pierde electrones y se disuelve en el medio mientras que el cátodo es el sitio donde estos electrones son transferidos y aceptados por las especies que se reducen. La cinética de estas reacciones y del proceso corrosivo en sí puede ser medido cuantificando los electrones transferidos entre sitios anódicos y catódicos.

2.1.2 Potenciales de electrodo

La Figura 2.2 muestra la experiencia electroquímica más simple. Consiste en sumergir una lámina del metal Me en una solución 1M de sus iones Me^+ . [5]

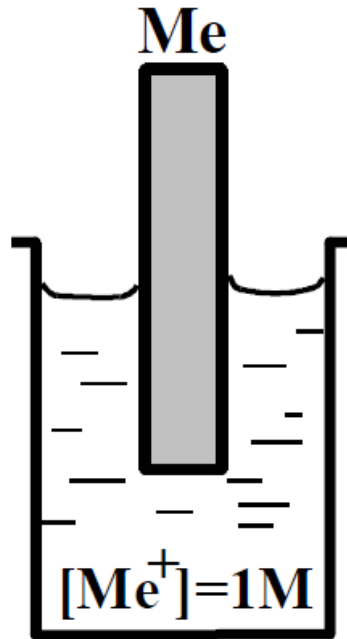


Figura 2.2 Experiencia electroquímica en la que se sumerge un metal Me en una solución 1M de iones Me+. Tomado de [5].

Inmediatamente después de la inmersión, el metal —si se trata de un metal activo como podría ser el magnesio o el zinc— tenderá a disolverse y pasar a la solución como iones (reacción de oxidación), tomando el metal un potencial negativo respecto de la solución. Esto se representa mediante la siguiente ecuación:



Tratándose de partículas cargadas, el pasaje de cargas hacia uno y otro lado de la interfase metal-solución, creará una diferencia de potencial $\Delta\Phi$ que, al ir aumentando, se opondrá al pasaje de nuevas cargas hasta llegar a una situación que impide el posterior pasaje neto de cargas. Se alcanza así el potencial de equilibrio donde la reacción de la ecuación 2.1 ocurre a igual velocidad en ambos sentidos. Ver ec. 2.2.



En este sistema, toda la diferencia de potencial del electrodo estará concentrada en la interfase metal/electrolito en una región que se denomina *doble capa eléctrica* y que actúa como un condensador de placas planas. En todo momento las cargas eléctricas en el electrodo y en la solución serán iguales y de signo opuesto, $q^M = -q^S$. La carga del metal q^M corresponde, según el signo de la carga, a un exceso o defecto de electrones, y está radicada en una capa muy delgada en la superficie del metal. La carga en la solución q^S está determinada por un exceso ya sea de cationes o de aniones en la cercanía del electrodo. Todo este conjunto de cargas y dipolos orientados que existe en la interfase metal/solución se conoce como *doble capa eléctrica*.

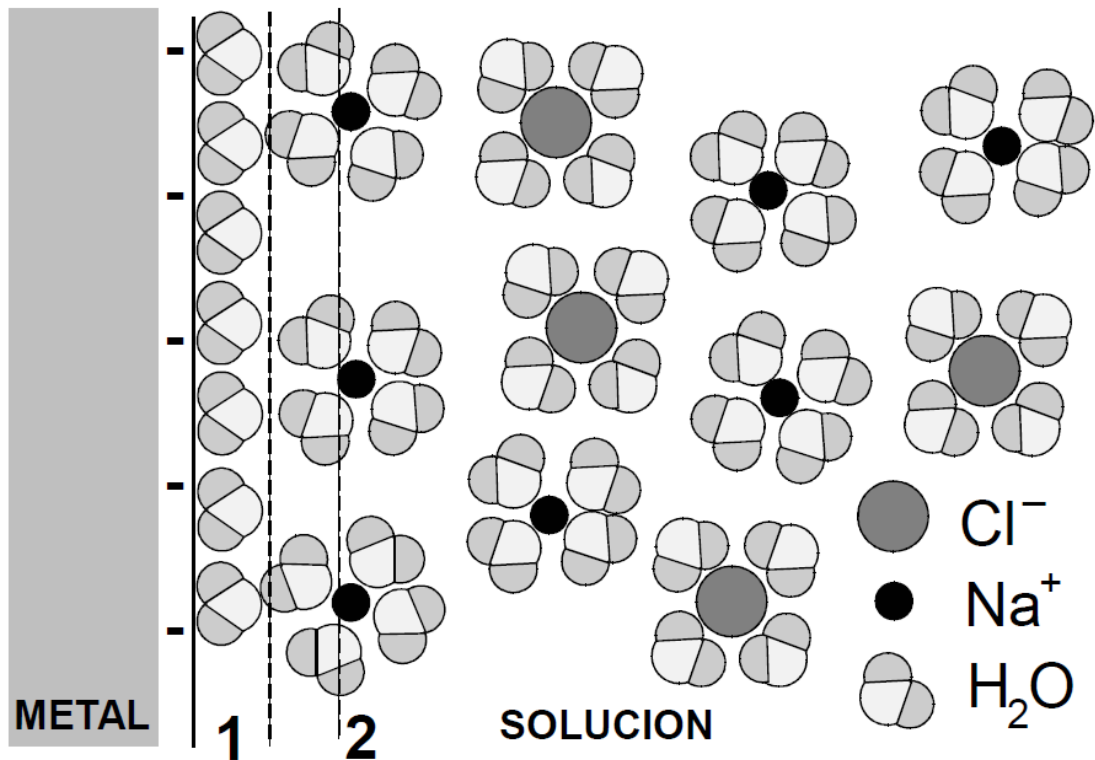


Figura 2.3 Esquema de doble capa eléctrica. Tomado de [5].

En la Figura 2.3 se muestra una descripción esquemática sencilla de la doble capa eléctrica, tal como se la describe en electroquímica. La capa más cercana al electrodo, 1, es una capa interna que contiene moléculas del solvente (generalmente agua), y la línea 2 indica la distancia mínima a la que pueden acercarse los iones solvatados. Debido a la agitación térmica en la solución los otros iones que componen la doble capa se encuentran relativamente dispersos.

Si quisiéramos medir el valor absoluto de la diferencia de potencial en la interfase electrodo-solución, resultaría imposible.

Esto se hace evidente con la siguiente experiencia, en la que intentamos medir la caída de potencial en la interfase metal-solución del electrodo A con un voltímetro (ver Figura 2.4 a). Es decir, para medir el potencial entre la solución y el electrodo A, necesitamos introducir otro electrodo de un metal B en la solución para cerrar el circuito y permitir la circulación de una pequeña corriente (ver Figura 2.4 b).

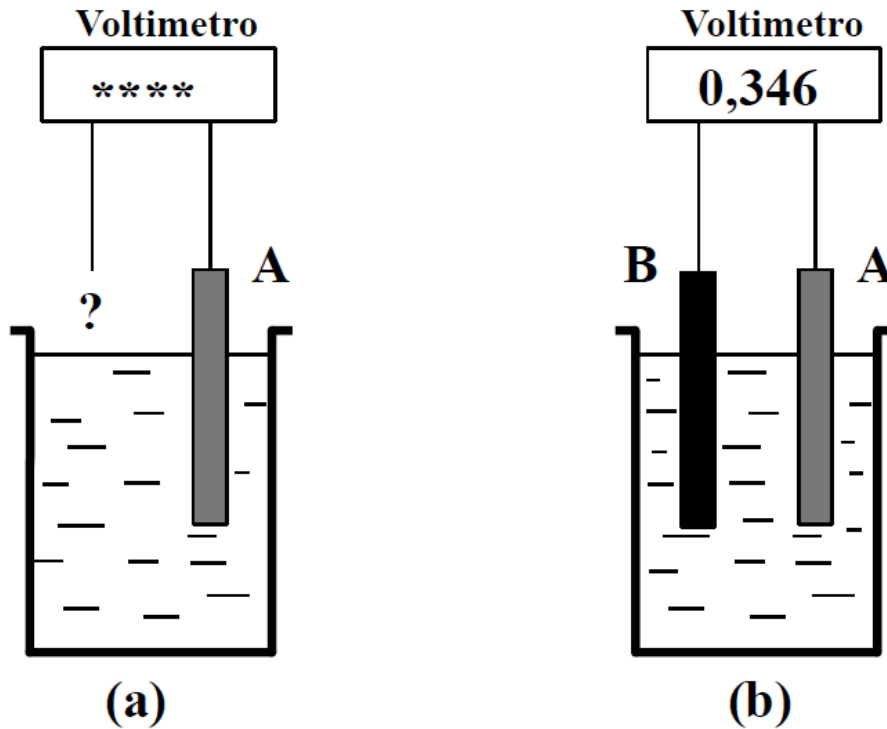


Figura 2.4 Dos posibles mediciones electroquímicas: (a) Intento de medir el potencial del electrodo A empleando una sola interfase electrolítica; (b) Medición del potencial del electrodo A empleando un electrodo de referencia B. Tomado de [5].

Expresando matemáticamente la lectura del voltímetro será,

$$\Delta\Phi = (\Phi_{\text{Metal A}} - \Phi_{\text{Solución}}) - (\Phi_{\text{Metal B}} - \Phi_{\text{Solución}}) = \Phi_{\text{Metal A}} - \Phi_{\text{Metal B}} \quad \text{ec. 2.3}$$

El electrodo B que se utiliza para medir el potencial entre el metal A y la solución será un electrodo de referencia.

$$\Delta\Phi = (\Phi_{\text{Metal A}} - \Phi_{\text{Solución}}) - (\Phi_{\text{Referencia}} - \Phi_{\text{Solución}}) \quad \text{ec. 2.4}$$

Si se elige un electrodo de referencia de manera que $(\Phi_{\text{Referencia}} - \Phi_{\text{Solución}})$ sea constante obteniendo:

$$\Delta\Phi = (\Phi_{\text{Metal A}} - \Phi_{\text{Solución}}) + \text{Constante} \quad \text{ec. 2.5}$$

Se tendrá que, si bien no se podrá medir directamente el potencial del sistema de interés, cualquier variación del potencial medido corresponderá a este.

El electrodo de referencia típico es el denominado electrodo normal de hidrógeno (o electrodo estándar de hidrogeno) que consiste en un electrodo de platino sobre el cual se ha depositado electrolíticamente platino, sumergido en una solución de HCl cuya actividad de iones H^+ es 1M, y sobre la que se burbujea hidrogeno gaseoso a 1 atmosfera. Por convención, se le asigna a este electrodo un potencial de 0,0 Volts a todas las temperaturas. Es decir $(\Phi_{\text{Referencia}} - \Phi_{\text{Solución}}) = 0,0$ Volts.

Por lo tanto, la lectura del voltímetro con este electrodo de referencia será directamente $\Delta\Phi = (\Phi_{\text{Metal A}} - \Phi_{\text{Solución}})$.

De esta manera, disponiendo de un electrodo de referencia estándar, es posible determinar el valor de $(\Phi_{\text{Sistema de interés}} - \Phi_{\text{Solución}})$ para cualquier equilibrio electroquímico. Estos valores así determinados, y cuando las concentraciones de especies iónicas son igual a 1M, se denominan potenciales normales de electrodo que se simbolizan con E^0 y se encuentran habitualmente tabulados en libros de electroquímica y corrosión.

Como regla general, cuando se unen dos electrodos con potenciales diferentes, el que tenga el potencial más bajo actuará como ánodo (se corroerá, dando la reacción de oxidación) mientras que el que tenga el potencial más alto actuará como cátodo (dará la reacción de reducción).

Para evaluar el potencial de equilibrio E_{eq} a distintas temperaturas o concentraciones se utiliza la ecuación de Nernst.

$$E_{eq} = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[oxid]}{[red]} \quad \text{ec. 2.6}$$

Donde,

E^0 es el potencial normal de electrodo (obtenido de la tabla correspondiente), R la constante de los gases, T la temperatura de trabajo, n el número de electrones intercambiados en la reacción, F la constante de Faraday, [oxid] y [red] son las concentraciones de las especies oxidadas y reducidas respectivamente (usar las concentraciones es una aproximación, lo más acertado sería utilizar las actividades, pero a bajas concentraciones, la actividad y la concentración son similares).

El significado práctico de esto es que teniendo el sistema al potencial de equilibrio E_{eq} las velocidades de las reacciones de la ecuación de equilibrio 2.2 será igual de izquierda a derecha como de derecha a izquierda, por lo que no existirá generación neta de ningún producto. Si se aplica al sistema un potencial por encima del de equilibrio $E > E_{eq}$, la termodinámica —según se deduce de la ecuación 2.6— indica que el sistema reaccionará aumentando el contenido de iones M^{n+} en solución, por lo que se disolverá el metal M. Por el contrario, si se aplica un potencial menor debe disminuir el valor de M^{n+} produciéndose la deposición del metal M (Figura 2.5). A potenciales por sobre el de equilibrio, las especies oxidadas son las estables (por favorecerse el proceso de oxidación), mientras que a potenciales por debajo del de equilibrio, las especies reducidas son las estables (al favorecerse el proceso de reducción).

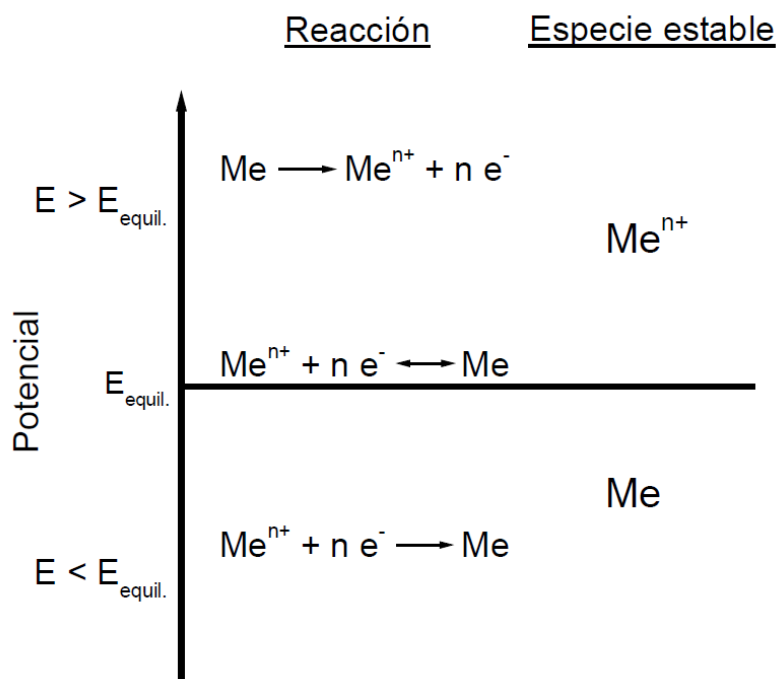


Figura 2.5 Reacciones termodinámicamente posibles y especies estables en función del potencial de electrodo respecto del de equilibrio. Tomado de [5].

2.1.3 Ley de Faraday

Como vimos, las reacciones electroquímicas “producen” o “consumen” electrones, por lo que la velocidad del flujo electrónico desde o hacia la interfase que reacciona es una medida de la velocidad de corrosión. El flujo electrónico es medido frecuentemente como corriente, I , en Amperes, donde 1 Ampere es igual a 1 coulomb de carga (6.2×10^{18} electrones) por segundo. La proporcionalidad entre la velocidad de reacción, r , (en moles/segundo) está dada por la Ley de Faraday:

$$r = \frac{I}{nF} \quad \text{ec. 2.7}$$

Que afectado por el área y haciendo un cambio de unidades resulta:

$$r = \frac{PM}{nF} i_{corr} \quad \text{ec. 2.8}$$

Donde i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión (A/cm^2), n es el número de electrones intercambiados en la reacción, PM es el peso atómico del metal por lo que r se expresa en $gr.año^{-1}.cm^{-2}$. Agregando la densidad del material, ρ , se tiene la velocidad de corrosión del material “VC”. que puede expresarse, por ejemplo, en $mm.año^{-1}$ o mpy (milésima de pulgada año) [6]

$$VC = \frac{PM}{nF\rho} i_{corr} \quad \text{ec. 2.9}$$

Por otro lado, considerando que la velocidad de una reacción química depende del valor de la energía de activación del proceso (ΔG^*), de acuerdo con la ecuación de Arrhenius esta relación, para un ámbito moderado de temperaturas, es igual a:

$$VC = A_i e^{-\frac{\Delta G^*}{RT}} \quad \text{ec. 2.10}$$

Donde A_i , es el denominado factor preexponencial que depende de la actividad iónica R es la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

Reemplazando la ec. 2.7 en la ec. 2.10 se llega a que:

$$i = nFA_i e^{-\frac{\Delta G^*}{RT}} \quad \text{ec. 2.11}$$

2.1.4 Sobrepotencial de transferencia de carga

En el potencial de equilibrio no existe flujo neto de corriente ya que la velocidad de generación de electrones por oxidación es igual a la de consumo de electrones por reducción. [5]

A la densidad de corriente de equilibrio se la denomina densidad de corriente de intercambio i_0 que puede expresarse según la ec. 2.11 como:

$$i_0 = nFA_i e^{-\frac{\Delta G^*}{RT}} \quad \text{ec. 2.12}$$

Si ahora se perturba el equilibrio, circulará un flujo de corriente neto en alguna dirección (anódica o catódica), que producirá un desplazamiento en el potencial de electrodo (que ya no se encontrará a su potencial de equilibrio) cuya magnitud y signo dependerá de la corriente que circula (y viceversa).

El desplazamiento del potencial de electrodo desde su potencial de equilibrio se denomina *polarización* y su valor se denomina *sobrepotencial* (η):

$$\eta = E - E_{eq} \quad \text{ec. 2.13}$$

Al aplicar un sobrepotencial al metal se produce un incremento de la energía de este de $nF\eta$, mientras que la energía de activación para el sistema polarizado ($\Delta G_{polarizado}^*$) se incrementa en $\alpha nF\eta$, siendo α el factor de simetría cuyo valor está comprendido entre 0 y 1 y que generalmente se asume como $\alpha=0,5$.

Por lo tanto, para el sistema polarizado, teniendo en cuenta la ecuación 2.11 y 2.12, la corriente anódica puede escribirse como:

$$i_{anod} = i_0 e^{\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}} \quad \text{ec. 2.14}$$

Realizando el mismo razonamiento para la corriente catódica y teniendo en cuenta que al aplicar un sobrepotencial la densidad de corriente total que circulará por el sistema será la diferencia entre las corrientes anódicas y catódicas llegamos a lo siguiente:

$$i = i_{anod} - i_{catod} \quad ec. 2.15$$

$$i = i_0 \left[e^{\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}} - e^{-\frac{\alpha nF\eta}{RT}} \right] \quad ec. 2.16$$

Esta ecuación es denominada de Butler-Volmer y expresa la relación entre la densidad de corriente y el sobrepotencial aplicado.

2.1.5 Curvas de polarización

A la gráfica de la densidad de corriente en función del sobrepotencial se la denomina curva de polarización. El sobrepotencial, que puede mantenerse arbitrariamente en cualquier valor, es el que define el comportamiento del metal. Cuando es positivo circulará por la interfase metal-solución una corriente positiva, y el metal se corroerá.

La relación entre la corriente y el potencial está vinculada a diversos factores, como la difusión de productos o de reactantes, la acumulación de productos de corrosión, formación de óxido, etc.

Las gráficas de polarización de las reacciones catódicas en función del sobrepotencial catódico (η) dependerán fuertemente de la abundancia y movilidad de los iones.

2.1.5.1 Potencial de corrosión

Si tomamos ahora un caso en el que tenemos en simultáneo reacciones anódicas y catódicas, debemos aplicar el principio de conservación de la carga sobre todas las reacciones que están ocurriendo sobre la superficie conductora de electrones de un metal que se corroe. [5]

La velocidad total de oxidación debe ser igual a la velocidad total de reducción.

Supongamos un sistema con un trozo de zinc sumergido en una solución ácida, las dos hemi reacciones que pueden ocurrir son:



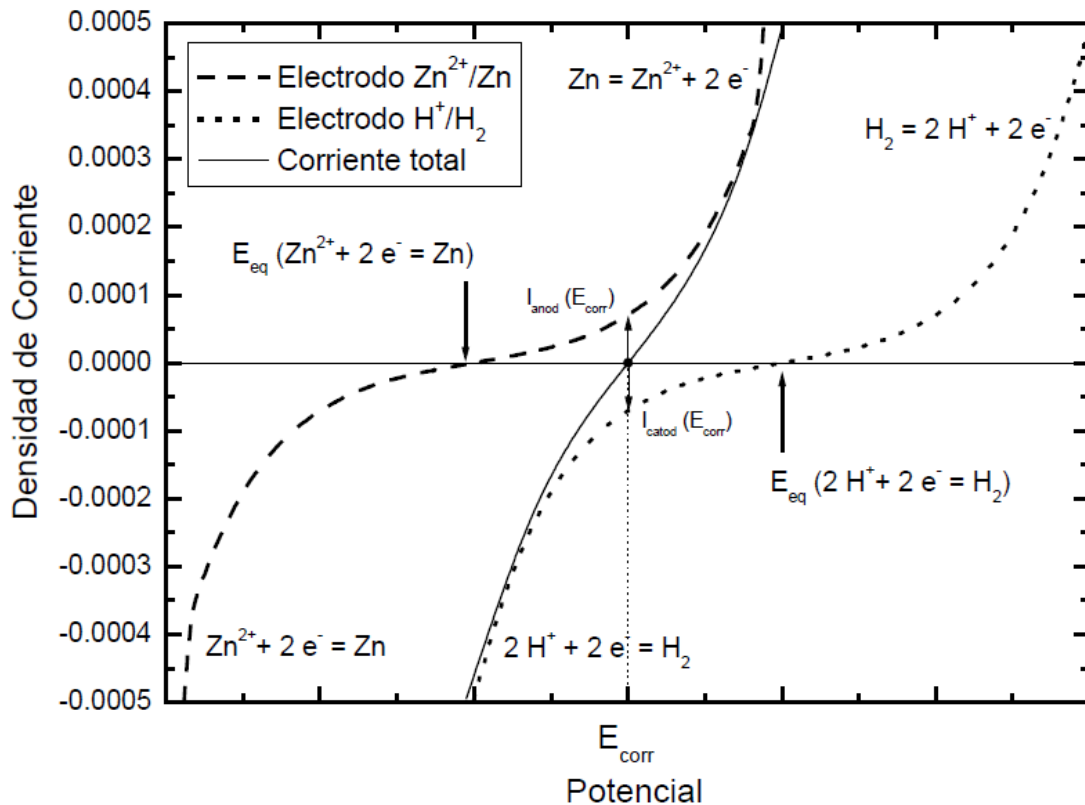


Figura 2.6 Curvas de polarización parciales y total para un par de reacciones acopladas. Tomado de [5].

La curva de polarización del sistema será la suma de las curvas de polarización independientes de los componentes aislados (Figura 2.6). Como espontáneamente no puede haber circulación de corriente, la corriente anódica debe ser exactamente igual a la corriente catódica. Esto ocurre en el llamado potencial de corrosión E_{corr} . A este valor de potencial ocurren dos reacciones: la disolución del zinc a una velocidad dada por i_{anod} y la reducción de los protones a una velocidad dada por i_{catod} . Los valores absolutos de estas corrientes serán iguales y a ese valor se lo denomina densidad de corriente de corrosión (i_{corr}).

Externamente la corriente que circula es cero. Sin embargo se está produciendo la disolución del cinc y la reducción de los protones.

Si ahora graficamos la densidad de corriente en escala logarítmica y todas las corrientes en el mismo cuadrante, independientemente de su signo, obtendremos el denominado diagrama de Evans (Figura 2.7).

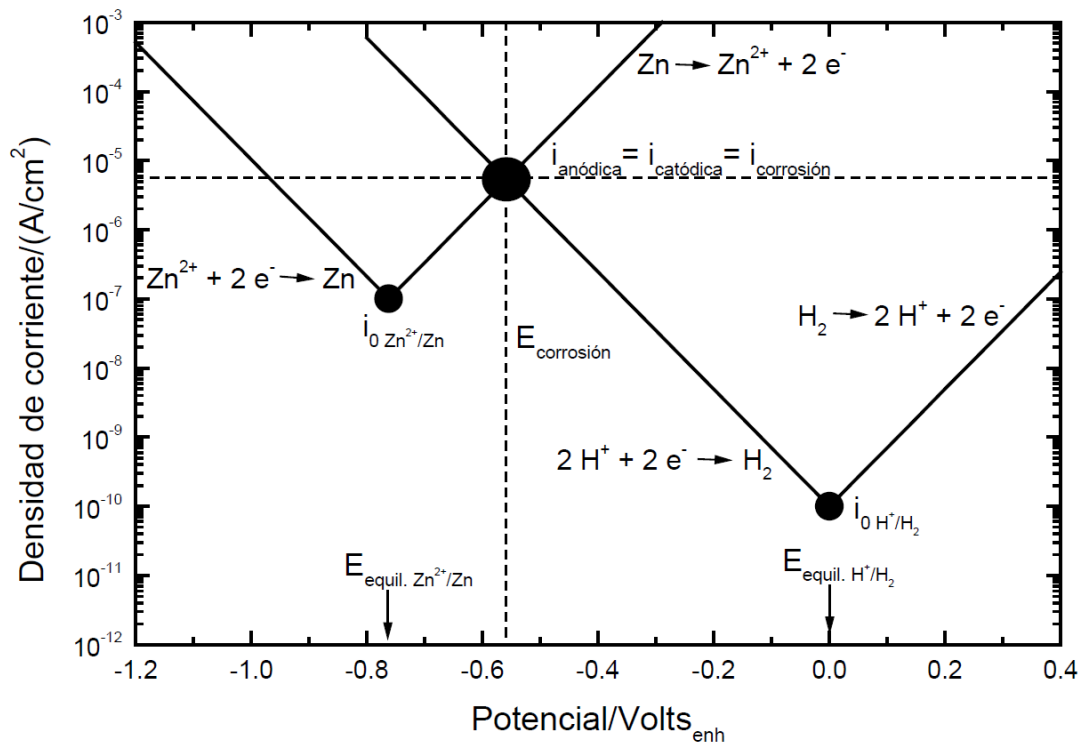


Figura 2.7 Superposición de las curvas de polarización del Zn y del H₂ para demostrar la aparición de un potencial de corrosión ($E_{\text{corrosión}}$) y una corriente de corrosión ($i_{\text{corrosión}}$). Tomado de [5].

Podemos ver que en la intersección entre la rama anódica del cinc y la catódica de la reducción de protones se obtienen el correspondiente potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}).

2.2 Métodos de medición de corrosión

2.2.1 Métodos no electroquímicos

Entre las técnicas no electroquímicas más utilizadas se encuentran:

2.2.1.1 Cupones

Es el método más simple y largamente establecido para estimar la velocidad de corrosión en plantas y equipos en servicio. Consiste en introducir una muestra metálica (cupón) que puede ser tipo tira (ver Figura 2.8), cuyo peso y área es previamente determinado, expuesto a la corriente de proceso, luego de un intervalo de tiempo razonable (al menos 1 semana), es extraído y acondicionado, removiendo los productos de corrosión de su superficie y repesado.

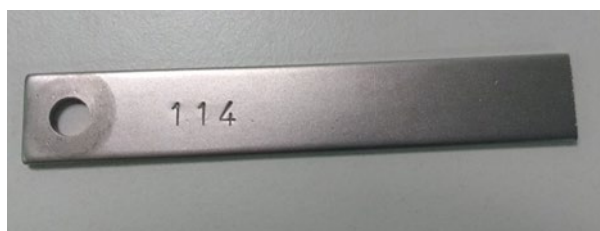


Figura 2.8 Cupón tipo tira o fleje luego de su exposición y limpieza

La pérdida de peso es convertida a una velocidad de corrosión (VC). [7]

$$VC = \frac{\Delta m \cdot K}{\rho t A_c} \quad \text{ec. 2.19}$$

Donde,

Δm es la pérdida de peso en g.

ρ es la densidad de la aleación en g/cm³.

t es el tiempo de exposición en h.

A_c es el área cuya unidad depende del sistema utilizado y K un factor de cambio de unidades que depende de la unidad de velocidad de corrosión deseada y de las unidades del área (ver Tabla 2-1).

Unidad de Velocidad de Corrosión	Unidad del Área	Factor K
milésima de pulgada por año (mpy)	pulg ²	5,34 x 10 ⁵
milésima de pulgada por año (mpy)	cm ²	3,45 x 10 ⁶
milímetro por año (mm/año)	cm ²	8.75 x 10 ⁴

Tabla 2-1 Factores de cambio de unidades para cálculo de velocidad de corrosión mediante cupones y la ecuación 2.19.

2.2.1.2 Sondas de resistencia eléctrica (ER)

Este método puede considerarse como un método “on-line” de monitoreo de la velocidad de corrosión. Esta técnica permite evaluar tanto los efectos de la corrosión electroquímica como los mecanismos de pérdida de espesor mecánicos como la erosión o cavitación. [8]

Un sistema de monitoreo por resistencia eléctrica (ER) consiste en un instrumento conectado a una sonda que puede tener un registrador para coleccionar información continua o bien ser medido periódicamente.

Su principio de operación consiste en medir la variación de la resistencia del elemento o probeta debido a la disminución de su sección.

$$R = r_m \frac{L}{A_{ER}} \quad \text{ec. 2.20}$$

Donde,

L = largo del elemento.

A_{ER} = sección transversal del elemento.

R = resistencia específica del elemento.

r_m = resistividad del elemento.

Habitualmente las sondas están equipadas con un elemento que está libremente “expuesto” al fluido corrosivo y un elemento “de referencia” sellado dentro del cuerpo de la sonda. Se mide la relación de resistencia entre el elemento expuesto y el de referencia. Dado que los cambios de temperatura afectan por igual la

resistencia de ambos elementos, medir la relación de resistencias minimiza la influencia de los cambios en la temperatura ambiente ver esquemático en Figura 2.9.

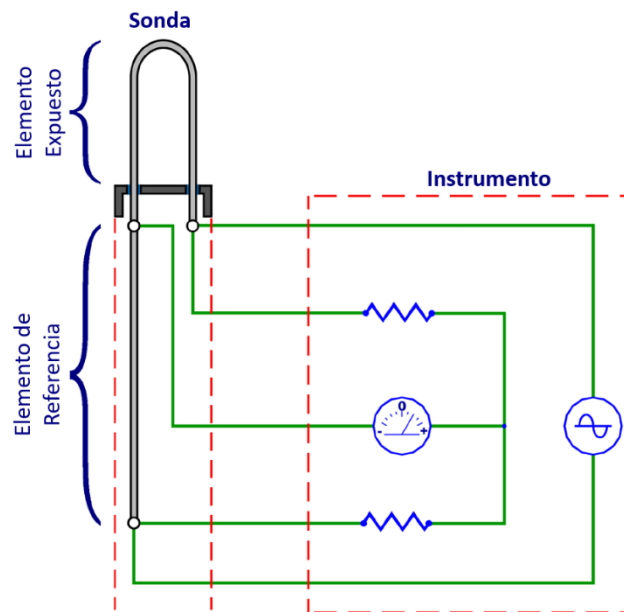


Figura 2.9 Esquemático de interconexión. Las líneas rojas a trazos de la izquierda representan la sonda y sus elementos, las de la derecha el instrumento de medición.

Por lo tanto, cualquier cambio neto en la relación de resistencias se atribuye únicamente a la pérdida de metal del elemento expuesto, una vez que se ha establecido el equilibrio térmico.

También suelen tener un elemento de verificación, el que se mide para conocer la integridad de la sonda. Si este valor se mantiene aproximadamente constante, la sonda se encuentra en buenas condiciones. Si este valor cambia, es probable que haya perdido estanqueidad y se estén dañando los circuitos internos por lo que ya no es confiable y debe ser reemplazada o reparada.

La medición del dato en campo se puede hacer manualmente o mediante un registrador automático.

2.2.2 Métodos electroquímicos

2.2.2.1 Sensores Galvánicos

En este método se utilizan dos sensores basados en las reglas de corrosión galvánica. Cuando dos sensores de materiales disímiles conectados eléctricamente mediante un amperímetro de resistencia cero se colocan en un electrolito, estos se corroerán al potencial de corrosión del par E_{corr} debido al par galvánico generado (ver Figura 2.10) [9].

El electrodo activo, el que se corroe, será el ánodo y el otro de un metal más noble el cátodo. Como existe un electrolito y un contacto eléctrico entre los dos

electrodos, se genera un flujo de corriente entre ellos. La magnitud del flujo de corriente entre los dos electrodos depende del grado de corrosividad del ambiente.

Las sondas suelen reflejar los cambios en el nivel de corrosión ambiental en pocos minutos.

Las sondas galvánicas se han utilizado con éxito en estructuras de concreto. Se ha encontrado que el par acero al carbono/cobre es especialmente prometedor siendo el más sensible, pero esto también acorta su vida útil, por otro lado, el par acero al carbono/titanio es el de mayor vida útil esperada. Estos pares son recomendables en ambientes con cloruros ya que no sufren picado. Es importante tener en cuenta la relación de áreas entre electrodos [10].

A pesar de esto el método ha tenido un éxito limitado en la predicción de cambios en el sistema de temperatura, el nivel de pH, el contenido de oxígeno y la conductividad, ya que estos factores pueden afectar la corriente de salida de la sonda sin afectar necesariamente la velocidad de corrosión. Por lo tanto, el sistema de sensores galvánicos creado no siempre puede expresar numéricamente la velocidad de corrosión, sino que puede proporcionar información sobre la presencia de corrosión.

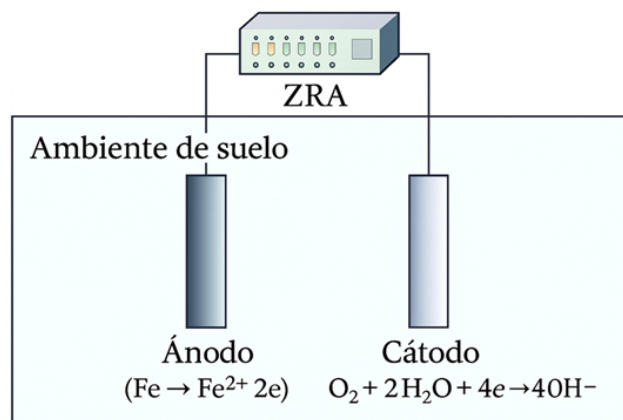


Figura 2.10 Representación esquemática de un sensor de sonda galvánica conectadas a un amperímetro de resistencia cero (ZRA). Modificado de [9].

2.2.2.2 Método de extrapolación de rectas de Tafel

Este método consiste en extrapolar las pendientes de las curvas de polarización anódica y catódicas que se obtienen al aplicar sobrepotenciales y graficar el potencial respecto del logaritmo de la corriente.

Usando la ecuación de Butler-Volmer (ec. 2.16) para un metal que se corroe —es decir, que se encuentra a E_{corr} — podemos ver que al aplicar altos sobrepotenciales anódicos el termino catódico se hace despreciable por lo que puede expresarse:

$$i = i_{corr} e^{\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT}} \quad \text{ec. 2.21}$$

Tomando logaritmos a ambos miembros y acomodando, se llega a:

$$\eta = a + b_{anod} \log i \quad \text{ec. 2.22}$$

Donde:

$$b_{anod} = \frac{2,303RT}{(1 - \alpha)nF} \quad \text{ec. 2.23}$$

La ecuación 2.22 es conocida como ecuación de Tafel y el valor b_{anod} se denomina pendiente de Tafel anódica.

Haciendo el mismo razonamiento para altos sobrepotenciales catódicos la ecuación de Tafel toma la siguiente forma:

$$\eta = a - b_{catod} \log i \quad \text{ec. 2.24}$$

Y b_{catod} es la denominada pendiente catódica.

De esta forma se puede obtener mediante su intersección la densidad de corriente de corrosión o i_{corr} (Figura 2.11).

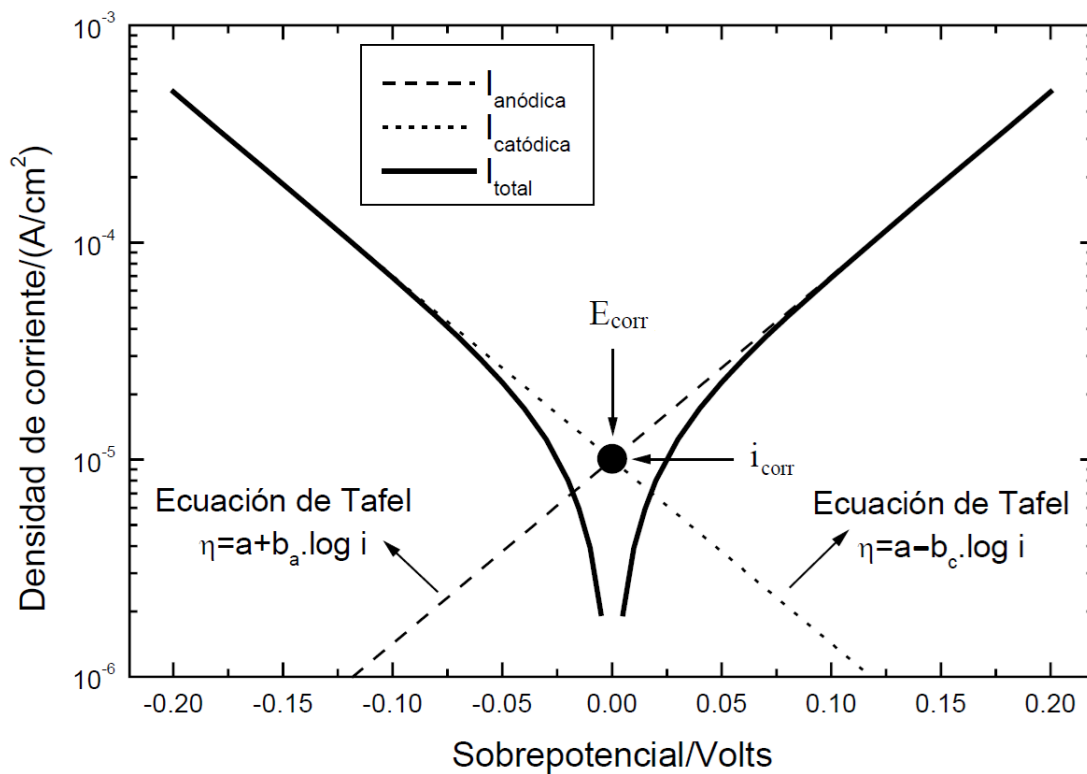


Figura 2.11 Representación logarítmica de la ecuación de Butler-Volmer donde se aprecia las zonas correspondientes a la ecuación de Tafel y su intersección que determina la densidad de corriente de de corrosión i_{corr} . Modificado de [5].

2.2.2.3 Método de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)

Ya hemos visto que la i_{corr} no puede medirse directamente porque al potencial de corrosión no existe un flujo neto de electrones, sin embargo, si podemos medir una corriente asociada a leves perturbaciones del sistema, de manera similar al método de Tafel. Cuanto mayor sea la corriente medible para un mismo

sobrepotencial aplicado, más fácil resulta el proceso de corrosión. Además, para pequeños valores de sobrepotencial, la variación de la corriente será proporcional a la i_{corr} y por lo tanto a la tasa de corrosión. Esta relación se pone de manifiesto en la ecuación de Stern-Geary [11] [6]:

$$i_{corr} = \frac{b_{anod}b_{catod}}{2.303(b_{anod} + b_{catod})} \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad ec. 2.25$$

Donde b_a y b_c son las pendientes de Tafel.

Llamando R_p a la pendiente de la línea recta en las proximidades de E_{corr} :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad ec. 2.26$$

Llamando B al termino constante:

$$B = \frac{b_{anod}b_{catod}}{2.303(b_{anod} + b_{catod})} \quad ec. 2.27$$

Resulta:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad ec. 2.28$$

La constante B, se obtiene de la literatura para cada sistema en particular. Se puede determinar a partir de [6]:

- Pendientes de Tafel obtenidas de las rectas de Tafel de experiencias separadas para el mismo sistema bajo las mismas condiciones.
- Pendientes de Tafel tomadas de la literatura para sistemas idénticos o similares.
- Pendientes de Tafel por el método de modelización de la curva experimental.
- Por correlación entre datos de pérdida de peso y R_p .

Una de las principales restricciones de este método es que para medir en flujos bifásicos necesita una gran fracción de agua ya que con contenidos menores al 30% el método no es eficiente y confiable. [9]

2.2.2.4 Ruido electroquímico (ECN)

Este método mide y monitorea las fluctuaciones naturales en la corriente electroquímica generada por actividades de corrosión. Permite determinar el tipo de corrosión (uniforme o localizada). [9]

El ruido de potencial es medido mediante el monitoreo de la diferencia de potencial entre dos electrodos similares y el ruido de corriente se mide monitoreando las fluctuaciones de corriente con un amperímetro de resistencia cero (ZRA) conectado entre dos electrodos similares (Figura 2.12).

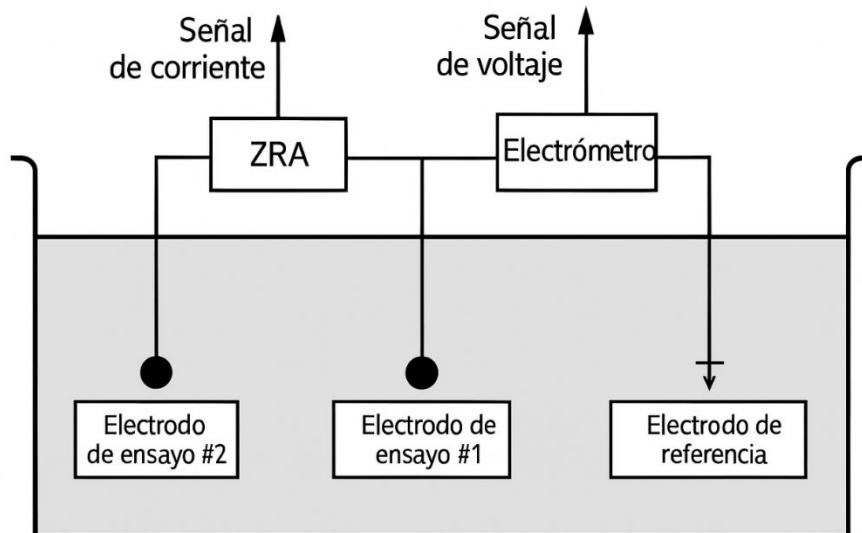


Figura 2.12 Esquema de medición mediante ZRA. Modificado de [12].

El ruido debido a las fluctuaciones ocurre como resultado de cambios espontáneos en la velocidad de corrosión instantánea. Estas fluctuaciones pueden deberse a distintos fenómenos como: iniciación y propagación de corrosión localizada, corrientes faradaicas, descarga de la capacitancia de la doble capa, formación de burbujas de gas, procesos de adsorción/desorción, difusión, variación del espesor de la película, ruptura de la pasivación, y variaciones de temperatura. [12]

Esta técnica puede ser utilizada al potencial de corrosión o en condiciones de polarización. Dado que el ruido medido es ajeno a influencias externas, la primera es utilizada para investigar las características de los procesos de corrosión, ya que el ruido provee mucha información sobre el proceso en sí. La segunda metodología —en condiciones de polarización— se utiliza para monitorear si existe corrosión y estimar su velocidad. [9]

Del análisis de los datos se obtiene la desviación estándar de potencial, σ_E , que multiplicada por el área de la sonda, A_n , y dividido por la desviación estándar de la corriente, σ_i , da como resultado la llamada resistencia electroquímica de ruido, R_n , que es análoga a la resistencia del método LPR. Modificado de [12].

$$R_n = \frac{\sigma_E A_n}{\sigma_i} \quad \text{ec. 2.29}$$

2.2.2.5 Análisis de Distorsión Armónica (HDA)

Este método se basa en introducir desorden en el sistema estudiado mediante una señal eléctrica de corriente alterna (AC) y en el análisis secuencial de su respuesta en función de la frecuencia. Dado que los procesos electroquímicos y

de corrosión estudiados son naturalmente no lineales, su respuesta al desorden es una señal poli armónica. A partir de esta señal, se pueden separar los componentes armónicos individuales y calcular los parámetros cinéticos requeridos con base en un modelo matemático apropiado. [9]

Si el electrodo es polarizado por un voltaje sinusoidal con frecuencia angular ω y amplitud U_0 alrededor del potencial de equilibrio por un tiempo t , entonces basado en el modelo de la doble capa de Stern-Geary la densidad de corriente obtenida será [13]:

$$i = i_{corr} \left(e^{2,3U_0 \sin \frac{\omega t}{b_a}} - e^{2,3U_0 \sin \frac{\omega t}{b_c}} \right) \quad \text{ec. 2.30}$$

Esta densidad de corriente será una onda sinusoidal distorsionada debido a la naturaleza no lineal de los procesos parciales anódico y catódico. Las amplitudes de los componentes armónicos se obtienen mediante la expansión en serie de Fourier de los términos exponenciales.

Hallando los valores de las amplitudes de las componentes armónicas i_1, i_2, i_3 , a través de la expansión en series de Fourier de la ecuación 2.30. Devay and Mézáros (citados en [13]) proponen las siguientes ecuaciones para determinar la corriente.

$$i_{corr} = \frac{i_1^2}{\sqrt{45} \sqrt{2i_1 i_3 - i_2^2}} \quad \text{ec. 2.31}$$

$$\frac{1}{b_{a,c}} = \frac{1}{4.6U_0} \left(\frac{i_1}{i_{corr}} \pm 4 \frac{i_2}{i_1} \right) \quad \text{ec. 2.32}$$

Esta técnica es relativamente compleja. Para realizar mediciones correctas, es necesario considerar muchos factores que han sido ignorados hasta la fecha en otras mediciones electroquímicas.

El método de interpretación de los resultados obtenidos presenta muchos problemas. Se han evaluado varios métodos matemáticos hasta ahora; sin embargo, la mayoría no son de carácter público y solo pueden utilizarse para sistemas seleccionados debido a las simplificaciones aplicadas. [9]

2.2.2.6 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

Este método permite determinar la velocidad de corrosión a partir de la resistencia de polarización. En este caso es aplicada una señal de corriente alterna con una pequeña amplitud de potencial en un espectro de frecuencias determinado y se mide la respuesta de la corriente. A partir del análisis de la respuesta en frecuencia se obtiene la impedancia asociada al proceso electroquímico de corrosión del metal en el medio al que se encuentra expuesto.

Una de las ventajas de este método es que puede ser utilizado para caracterizar la respuesta de metales que tengan revestimientos pudiéndose evaluar su uniformidad y eficiencia.

Se modela la respuesta en frecuencia de la impedancia y luego se determina la resistencia a la polarización (R_p), resistencia de la solución (R_s) y del revestimiento (R_r), en el caso de que exista, utilizando un circuito equivalente que incluya estos componentes, así como el capacitor de doble capa y otros elementos para simular fenómenos difusivos, de distribución de corriente, entre otros.

Se aplica una señal de potencial sinusoidal de pequeña amplitud, de manera que la corriente responda en forma sinusoidal a la misma. El ángulo de fase entre el potencial y la corriente, así como el módulo de la impedancia se grafican en función del logaritmo de la frecuencia. [9]

Usualmente se utilizan dos representaciones de los resultados de este ensayo, los diagramas de Nyquist y de Bode (Figura 2.13).

En el gráfico de Nyquist, $-Z'' = f(Z')$, la componente imaginaria del vector impedancia, usualmente representada como $-Z''$, se grafica frente a la parte real de la impedancia, Z' , para cada frecuencia de excitación.

El gráfico de Bode muestra dos curvas: $\log |Z| = f(\log f)$, y $-\text{fase} = f(\log f)$, proporcionando así una fácil correspondencia entre la frecuencia de excitación con el módulo de la impedancia y los valores de fase. Además, dado que $|Z|$ y los datos de frecuencia se presentan en escala logarítmica, los datos de impedancia en un amplio rango de frecuencias se visualizan claramente.

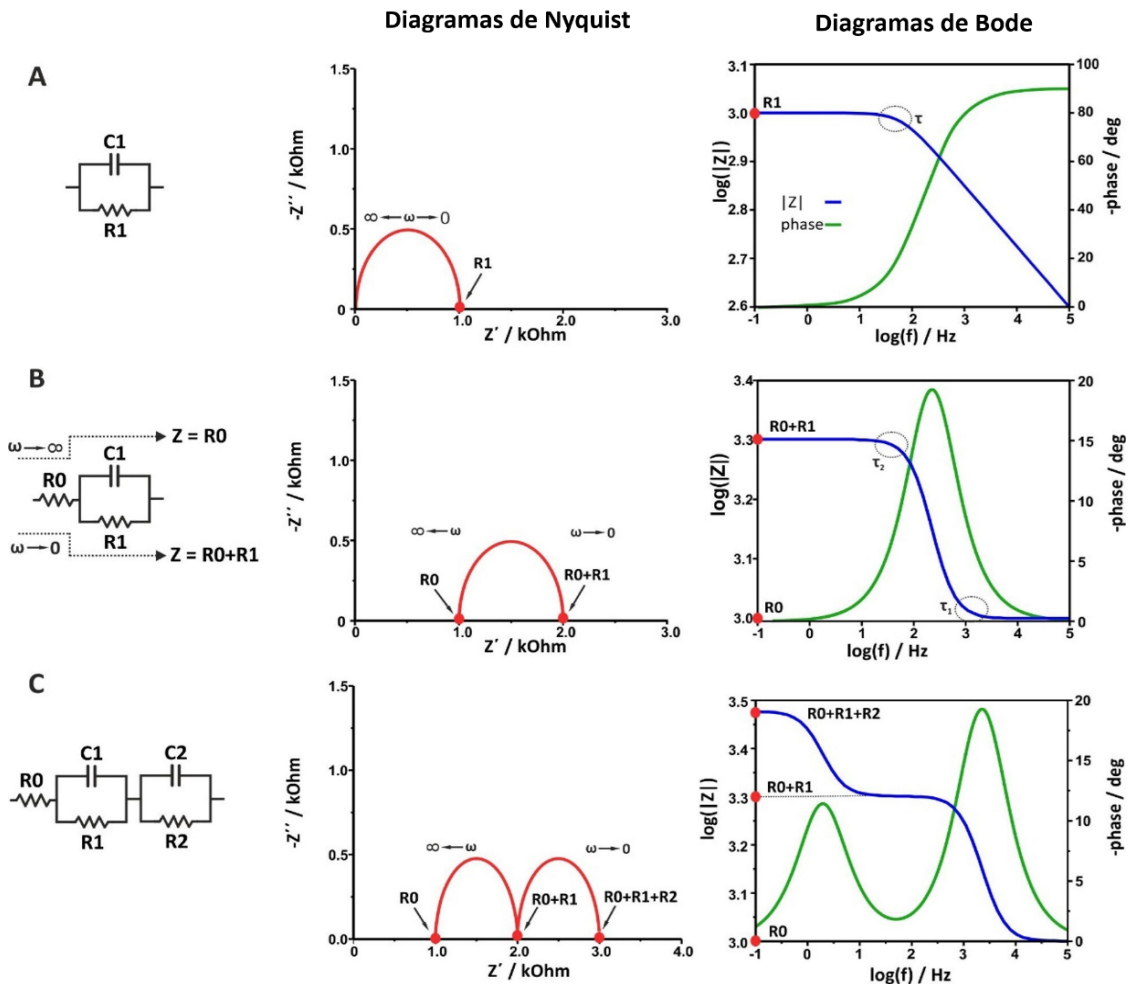


Figura 2.13 Diagramas de Nyquist y Bode para distintos circuitos equivalentes $R_0=R_1=R_2=1\text{ kOhm}$. Donde $\omega=2\pi f$. Modificado de [14].

La configuración de la celda electroquímica más común es la de 3 electrodos, electrodo de trabajo, electrodo de referencia y contraelectrodo. En este tipo de configuración –al aplicar un pequeño voltaje– la impedancia al flujo de corriente dependerá de;

- (i) La resistencia óhmica del electrolito entre el electrodo de referencia y el de trabajo. A esta se la suele llamar resistencia descompensada R_u . Para un determinado electrolito, R_u , queda definida por la distancia entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia y la resistividad del medio.
- (ii) La carga y descarga de la doble capa eléctrica, ya que bajo corriente alterna la doble capa formada entre electrodo/electrolito se comporta como un capacitor y se simboliza como C_{dl} .
- (iii) La resistencia a la polarización, R_p , la que se define como la pendiente de la curva voltaje/corriente $R_p = \Delta V/\Delta i$ en estadios

estacionarios. En EIS las condiciones se aproximan a estacionarias cuando la frecuencia tiende a cero ($f \rightarrow 0$).

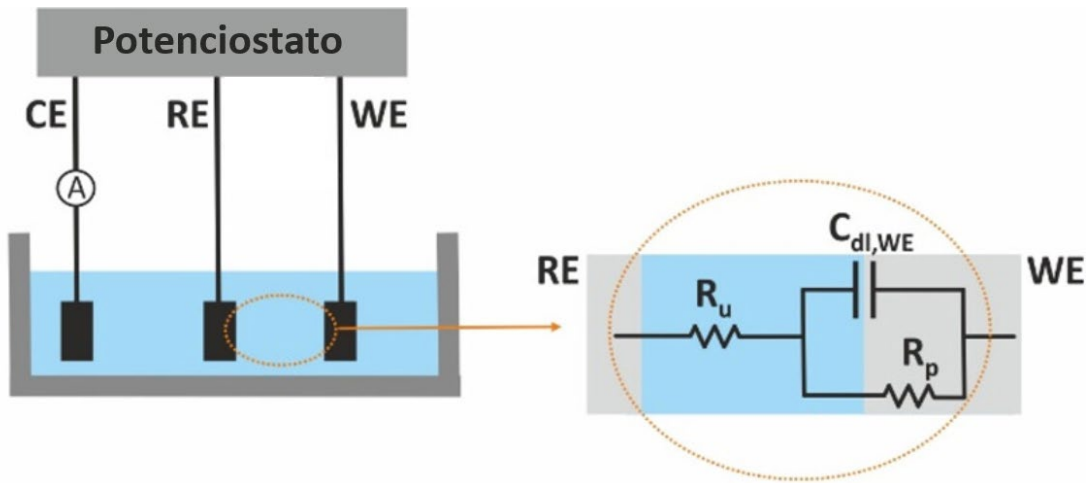


Figura 2.14 izq: representación de celda de 3 electrodos compuesta por el contraelectrodo (CE), electrodo de referencia (RE) y electrodo de trabajo (WE) y la derecha: su circuito equivalente simple que representa la interfaz electroquímica. Modificado de [14].

La impedancia del circuito equivalente de la Figura 2.14 puede escribirse de la siguiente manera:

$$Z(\omega) = R_u + \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C_{dl})^2} - j \frac{\omega R_p^2 C_{dl}}{1 + (\omega R_p C_{dl})^2} \quad \text{ec. 2.33}$$

Donde, $\omega = 2\pi f$.

De la ecuación 2.33 podemos ver que a muy altas y muy bajas frecuencias el comportamiento del circuito es puramente resistivo. Cuando $\omega \rightarrow \infty$, Z , toma el valor de la resistencia del electrolito R_u . Por otro lado, cuando $\omega \rightarrow 0$, $Z = R_u + R_p$. En la Figura 2.13 B, podemos ver que el diagrama de Nyquist para este circuito tiene forma de semicircunferencia en el cual R_u se corresponde con R_0 y a altas frecuencias es la intersección de la semicircunferencia con el eje real en R_0 . De igual manera que R_1 representa R_p y a bajas frecuencias resulta en la intersección del semi círculo con el eje real en $R_0 + R_1$ o bien, $R_u + R_p$.

Si consideramos que el electrodo de trabajo es un electrodo idealmente polarizable y que, por lo tanto, la transferencia de carga entre el electrodo y el electrolito ocurre a una tasa infinitesimal y que por esto la resistencia de polarización es infinita. Entonces, toda la corriente pasa a través de R_u y C_{dl} y la impedancia de la celda puede simularse como un circuito eléctrico con R_u y C_{dl} conectados en serie.

2.2.2.6.1 Elementos de fase constante (CPE)

En los casos reales los diagramas de Nyquist no siempre representan un semi círculo perfecto tal como se observa para un capacitor puro, en estos casos es necesario reemplazar al capacitor (C) por un elemento de fase constante (CPE) para compensar la depresión o inclinación de los resultados experimentales que ocurre debido a las irregularidades de la superficie, rugosidad de la superficie, porosidad del electrodo, distorsión de la superficie, discontinuidades geométricas, etc. [15]

La impedancia de un capacitor viene dada por la siguiente expresión:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_{dl}} \quad \text{ec. 2.34}$$

La impedancia de un CPE será:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n} \quad \text{ec. 2.35}$$

Donde Y_0 en $F.s^{n-1}$ (o bien, en $Ohm^{-1}.s^n$) es el parámetro que contiene la información de la capacitancia y n es una constante que va de 0 a 1 y define la desviación respecto del comportamiento ideal. Está relacionada con el ángulo de desviación de fase respecto del caso ideal (90°). En la figura 2.15 se puede ver cómo afecta al diagrama de Nyquist.

$$\theta = 90^\circ(1 - n) \quad \text{ec. 2.36}$$

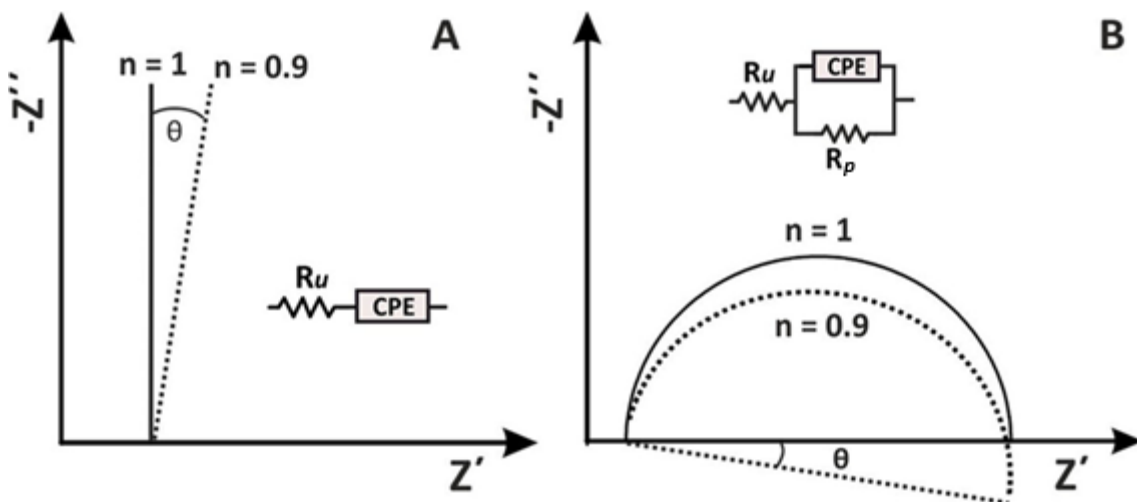


Figura 2.15 Diagramas de Nyquist representados con CPE. A) inclinado respecto del ideal y B) deprimido respecto del ideal. Modificado de [14].

Se observa en la Figura 2.16 un diagrama de Nyquist y el circuito equivalente del sistema de cañería de acero al carbono con agua potable sintética.

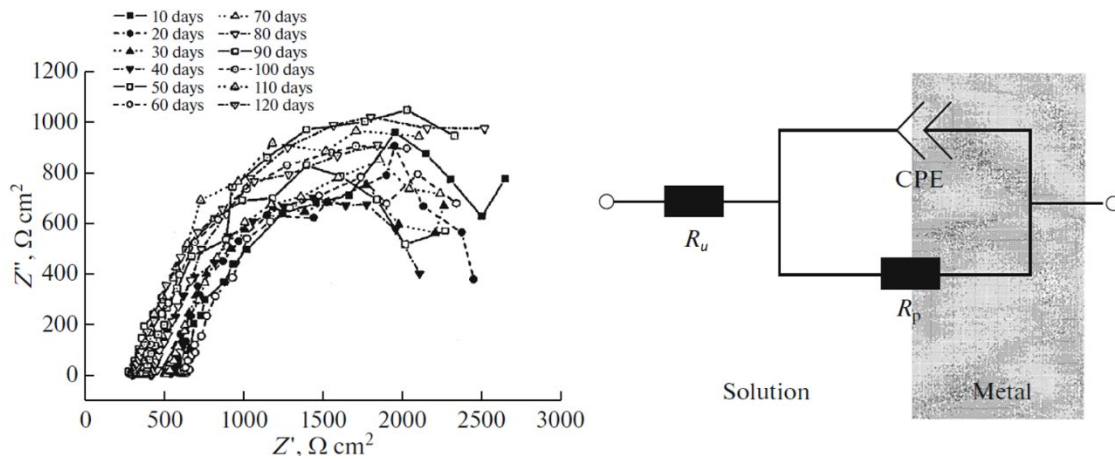


Figura 2.16 Diagrama de Nyquist y su equivalente circuito para una cañería de acero en agua potable sintética. Tomado de [9].

El circuito equivalente incluye los siguientes elementos: Resistencia de la solución (R_u), capacitancia de la doble capa (CPE) y resistencia de polarización (R_p).

2.2.2.7 Matriz de electrodos múltiples acoplados (CMEA)

En este método existen múltiples sensores de tamaño reducido y del mismo material a ser evaluado, montados en una sonda y expuestos al medio en estudio (Figura 2.17). Estadísticamente, alguno de estos electrodos tendrá las propiedades de estar cerca de un sitio anódico mientras que otro tendrá las propiedades de estar cerca de un sitio catódico.

Cuando estos pequeños electrodos que se encuentran aislados entre sí son acoplados conectándose externamente a través de un circuito, los electrodos que están cerca de las zonas anódicas se comportaran anódicamente y los que están cerca de las zonas catódicas se comportaran de esta manera. Por esto, los electrones liberados en las zonas anódicas estarán forzados a circular a través del circuito hasta los electrodos catódicos. De esta forma se miden las corrientes resultantes y se calculan mediante un analizador las velocidades de corrosión de las zonas de corrosión localizada o no uniforme. [16]

Existen dos configuraciones típicas de sondas, tipo *flush* y tipo *finger* o dedos (Figura 2.18).

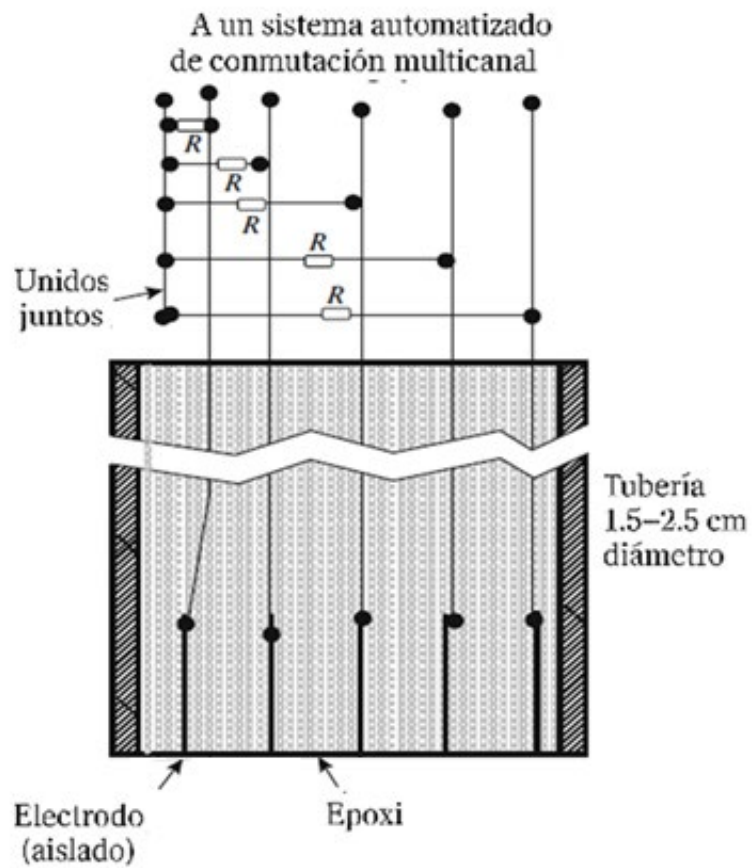


Figura 2.17 Diagrama esquemático del multielectrodo acoplado.



Figura 2.18 Sondas de múltiples elementos. Tipo finger, izquierda. Tipo flush, derecha. Modificado de [16].

2.3 Tipos de sensores aplicables en procesos industriales

Además del método de medición existen distintos tipos de sensores o disposiciones de los elementos que pueden ser empleados en cada método. Muchos de estos conceptos son generales.

2.3.1 Ubicación geométrica de la sonda o elemento de medición

Esta puede ser de tipo penetrante o al ras (*flush*).

Tanto los cupones (Figura 2.19), las sondas de resistencia eléctrica (Figura 2.20), las sondas de resistencia de polarización lineal, etc. pueden hallarse en estas dos presentaciones.

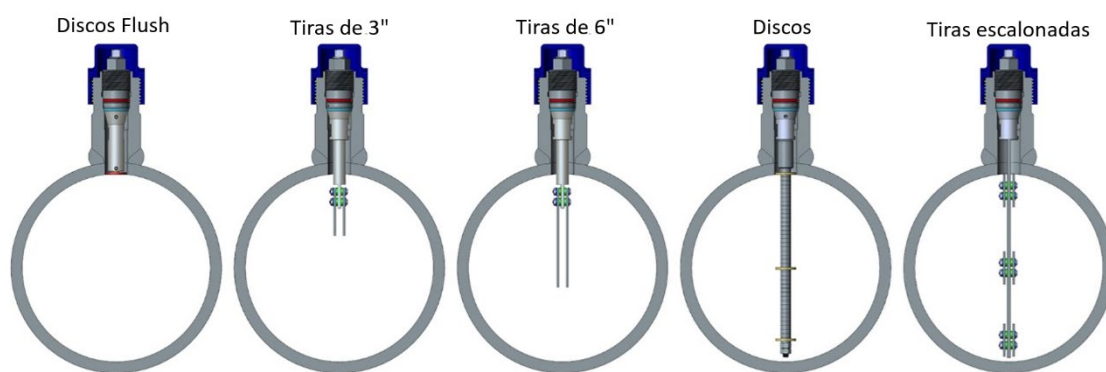


Figura 2.19 Tipos de montaje de cupones tipo discos o tiras. Modificado de [17].

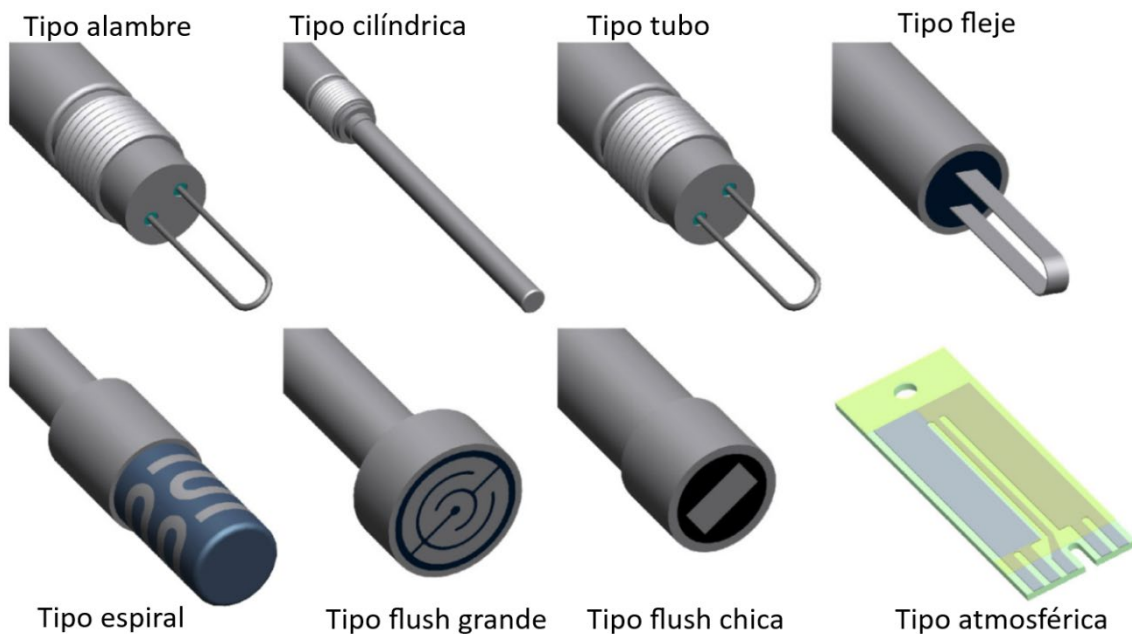


Figura 2.20 Sondas de resistencia eléctrica. Modificado de [8].

Los diseños tipo *flush* se considera que son más representativos de lo que realmente ocurre en la superficie del caño, debido a que las características del fluido en la superficie pueden variar respecto del centro.

2.3.2 Cantidad de elementos de la sonda

Es habitual que el elemento de medición se trate de una pequeña pieza del material a evaluar. Existen configuraciones de cupones en las que se puede colocar más de 1 pero la cantidad es limitada.

En la técnica CMEA se utilizan matrices de pequeños elementos que pueden ser de 9, 16, 25 o más elementos [16]. Este tipo de sensores si se configura de manera adecuada, puede comportarse como un grupo de elementos que podrían actuar en conjunto simulando una pieza de mayor área anódica o bien aplicar las distintas técnicas electroquímicas elemento a elemento como en la *Wired Beam Electrode* (WBE), identificando la velocidad de corrosión de cada uno. Para esto se podría utilizar LPR o EIS.

Por otro lado, cada una de estas técnicas electroquímicas debe contar con su correspondiente celda electroquímica.

2.3.3 Sondos tipo WBE

Estas son similares a las sondas utilizadas para CMEA con la particularidad que se dispone cada elemento como electrodo de trabajo para aplicar alguna otra técnica electroquímica, pudiendo medir con datos de distribución espacial. Lo que permite obtener información de corrosión localizada con técnicas que, en primer lugar, no podrían.

Esto, además, podría ser una ventaja cuando se trata de la evaluación de los datos, si bien el volumen será mayor que evaluar el resultado de una sola sonda, este será más fácil de interpretar que el de la técnica CMEA. [9]

2.3.4 Celda electroquímica

Cada técnica electroquímica mencionada necesita de una serie de elementos además del electrodo de trabajo (WE) para poder medir.

En la Tabla 2-2 se presenta un resumen de todas las técnicas descritas previamente [14] [16] [9] [12]:

Técnica	Cantidad de Electrodo(s)/Puertos	Tipo de Electrodo(s)	Notas
Matriz de electrodos múltiples acoplados (CMEA)	1 puerto, múltiples electrodos.	Múltiples electrodos que pueden acoplarse eléctricamente.	Se miden corrientes entre pares de electrodos.
Resistencia de polarización lineal (LPR)	3	Electrodo de trabajo, referencia, contraelectrodo	Técnica clásica para medir velocidad de corrosión.
Ruido electroquímico (EN)	3	2 electrodos de trabajo idénticos, 1 referencia	Mide fluctuaciones espontáneas de corriente y potencial.
Análisis de distorsión armónica (HDA)	3	Trabajo, referencia, contraelectrodo	Se analiza la respuesta a señales sinusoidales para estudiar no linealidades.
Sensores galvánicos	2	Electrodo de medida y contraelectrodo	No se requiere referencia; mide corriente generada espontáneamente.
Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	2, 3 o 4	Trabajo, referencia, contraelectrodo (y opcionalmente uno adicional)	Depende del nivel de precisión requerido; 3 electrodos es lo más común.
Wired Beam Electrode (WBE)	3 puertos, múltiples electrodos	Múltiples microelectrodos de trabajo, 1 referencia, 1 contraelectrodo	Se pueden utilizar distintas técnicas de 3 electrodos tomando cada uno o todos juntos como electrodo de trabajo.

Tabla 2-2 Resumen de técnicas de monitoreo de corrosión descritas.

2.4 Técnicas de medición de fases O/W y W/O

Existen diversas técnicas no destructivas disponibles para la medición de la fracción de agua en emulsiones. Estas, según Pal (citado en [18]) pueden agruparse en técnicas basadas en electricidad, microondas, dispersión de radiación, espectroscopía, ultrasonido, densidad y viscosidad. Entre ellas, las más comunes en aplicaciones comerciales en línea son las técnicas eléctricas y la espectroscopía en el infrarrojo cercano (*NIR*). [18]

La técnica NIR es precisa y se basa en las diferencias de absorción de luz infrarroja entre hidrocarburos y agua para realizar la medición, pero requiere sistemas ópticos sofisticados y análisis de patrones para obtener buenos resultados. Las técnicas eléctricas son muy populares y ampliamente utilizadas en la industria del petróleo. El método de capacitancia se basa en la diferencia de permitividad entre el agua y el petróleo, mientras que el método de conductancia se basa en la transferencia de carga dentro del fluido.

Los sensores eléctricos son simples y económicos; las sondas son adecuadas para las exigencias de robustez en la producción y transporte de petróleo, y pueden utilizarse en tuberías y conectarse en red para medir fracción de agua de forma rápida y eficiente.

En este trabajo haremos foco en la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS): técnica basada en principios capacitivos y conductivos que permite estudiar fluidos bifásicos (agua en petróleo o petróleo en agua) y debido a que, además, esta técnica tiene alto potencial para estudiar la velocidad de corrosión del medio.

2.4.1 Técnica de EIS

Las emulsiones son dispersiones entre dos o más líquidos inmiscibles o parcialmente miscibles, en las que la fase dispersa consiste en gotas con tamaños que varían entre 0,1 y 100 μm . Según Karcher (citado en [18]) la mayoría de las emulsiones tienen una fase acuosa y una fase oleosa. La dispersión que contiene petróleo como fase continua y agua como fase dispersa se denomina emulsión agua-en-petróleo (W/O); y la dispersión que contiene petróleo como fase dispersa y agua como fase continua se denomina emulsión petróleo-en-agua (O/W). [18]

La conductividad eléctrica $G(\omega)$ de las emulsiones petróleo-en-agua (O/W) es una función fuertemente dependiente de la concentración de la fase dispersa (petróleo). Maxwell (citado en [18]), en 1881, desarrolló un modelo para la conductividad de una dispersión de esferas en un medio continuo. Este modelo es adecuado para emulsiones O/W.

$$\sigma_m = \sigma_c \frac{1 + 2\alpha_d \left(\frac{\sigma_d - \sigma_c}{\sigma_d + \sigma_c} \right)}{1 - \alpha_d \left(\frac{\sigma_d - \sigma_c}{\sigma_d + \sigma_c} \right)} \quad \text{ec. 2.37}$$

Si $\sigma_c \gg \sigma_d$, entonces:

$$\sigma_m \cong \sigma_c \frac{2(1 - \alpha_d)}{2 + \alpha_d} \quad \text{ec. 2.38}$$

En él, σ_m , σ_d y σ_c representan las constantes de conductividad de la mezcla, la fase dispersa y la fase continua, respectivamente. α_d es la fracción volumétrica de la fase dispersa.

Maxwell Garnett (citado en [18]), en 1904, derivó una expresión similar aplicada a propiedades dieléctricas. Wagner (citado en [18]), en 1914, extendió el modelo de Maxwell al dominio complejo, y desde entonces según Bonanos et al. (citado en [18]) este modelo ha sido conocido como el modelo de Maxwell-Wagner. Este modelo es adecuado para emulsiones agua-en-petróleo (W/O).

$$\varepsilon_m = \varepsilon_c \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_d - 2\alpha_d(\varepsilon_c - \varepsilon_d)}{2\varepsilon_c + \varepsilon_d + \alpha_d(\varepsilon_c - \varepsilon_d)} \quad \text{ec. 2.39}$$

Si $\varepsilon_d \gg \varepsilon_c$, entonces:

$$\varepsilon_m \cong \varepsilon_c \frac{1 + 2\alpha_d}{1 - \alpha_d} \quad \text{ec. 2.40}$$

Donde ε_m , ε_d , ε_c son las constantes dieléctricas de la mezcla, la fase dispersa y la fase continua, respectivamente.

Distintos estudios han demostrado la validez de la técnica. La impedancia eléctrica en las emulsiones agua en petróleo (W/O) ajustan con un error menor al 3% a la fracción de agua predicha por el modelo de Maxwell-Wagner. El efecto de la temperatura y la salinidad son despreciables. [18]

La conductividad de emulsiones de petróleo en agua (O/W) dependen de la salinidad de la fase continua y de la temperatura, por lo tanto, es necesario conocer estos datos para que los valores de conductancia coincidan con el modelo de Maxwell.

Los espectros de Nyquist para muestras de petróleo presentan una semicircunferencia y el circuito equivalente se corresponde a una resistencia R_o y un capacitor C_o en paralelo (Figura 2.21), mientras que las muestras de emulsiones agua en petróleo, presentan dos semicircunferencias en un diagrama de Nyquist con tiempos de relajación muy diferentes (Figura 2.22). Su circuito equivalente está formado por una resistencia R_o y un elemento de fase constante CPE_o en paralelo (que representan al petróleo) y en serie con una resistencia $R_{w/o}$ y un $CPE_{w/o}$ (que representan a la emulsión w/o). [19]

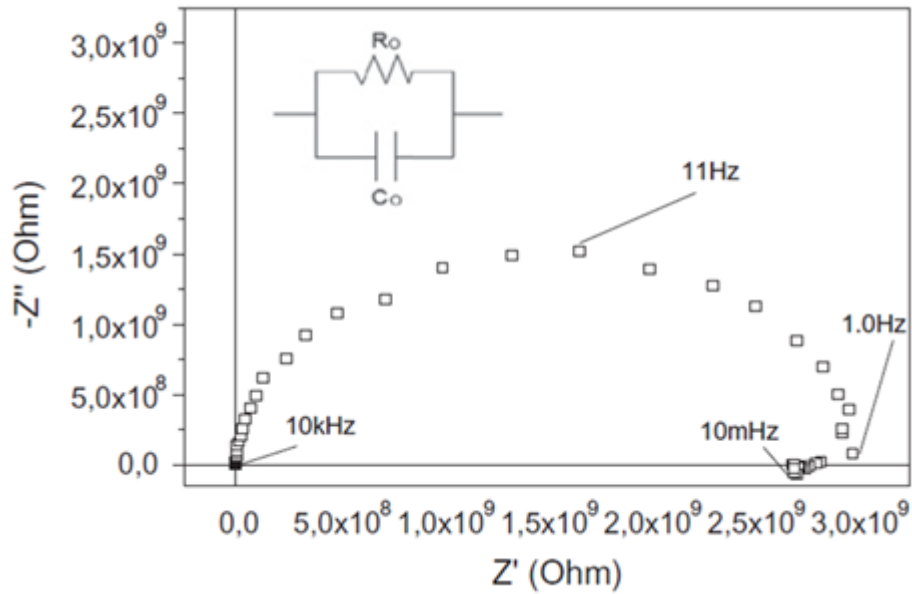


Figura 2.21 Diagrama de Nyquist para el sistema Pt/Petróleo, deshidratado, intervalo de frecuencias entre 10.0 KHz y 10 mHz y el circuito equivalente utilizado para ajustar la curva. Donde CPE_o y R_o corresponden a la resistencia y al elemento de fase constante del petróleo. Modificado de [19].

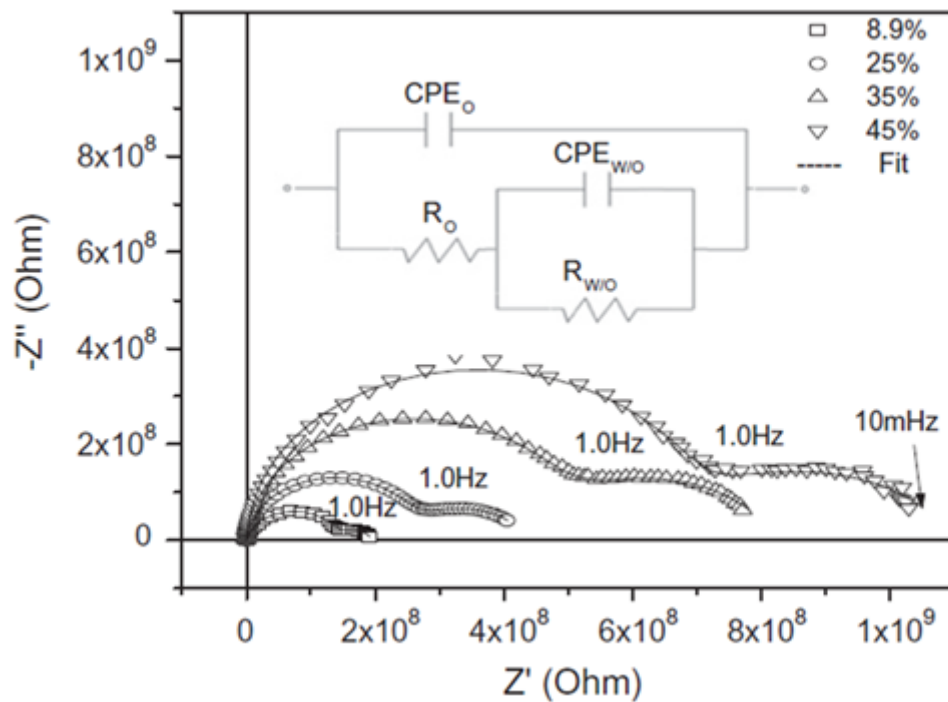


Figura 2.22 Diagrama de Nyquist para emulsiones agua en petróleo en varias proporciones y el circuito equivalente utilizado para ajustar la curva. Modificado de [19].

La resistencia del petróleo y de la emulsión (R_o y $R_{w/o}$ respectivamente) aumentan al aumentar el contenido de agua. Esto muestra que la emulsión se vuelve más estable con el agregado de agua. La acumulación de asfaltenos junto con algunas resinas y la presencia de partículas sólidas produce una película estancada mecánicamente fuerte, rígida y viscoelástica que estabiliza la emulsión agua-en-

petróleo, impidiendo la coalescencia de las gotas. Al agregar agua al petróleo, los compuestos iónicos y polares difunden desde la fase oleosa hacia la fase acuosa, disminuyendo su concentración en el petróleo. Esta disminución de compuestos iónicos y polares en el petróleo provoca un aumento en R_o (fase continua) aumentando la resistencia de la emulsión $R_{w/o}$. [19]

Respecto de medir en un sistema dinámico se identificó que la fuerza de corte tiene influencia en los parámetros eléctricos especialmente en la capacitancia, observable por una tendencia positiva con el aumento de la velocidad en las muestras de mayor contenido de agua. [20]

2.4.1.1.1 Configuración de electrodos

Para este tipo de mediciones se utilizan dos electrodos entre los que se aplica el potencial y permiten medir ya sea la constante de conductividad o la constante dieléctrica de la mezcla en estudio. Estos serán el electrodo de flujo (FE) y el contra electrodo (CE).

Los posibles materiales para estos electrodos se mencionan en el capítulo 4.

3 Introducción al Método de Elementos Finitos (FEM)

Este capítulo tiene como objetivo introducir al lector en los fundamentos del Método de Elementos Finitos (*FEM*), herramienta que será utilizada para realizar las verificaciones mecánicas del dispositivo de monitoreo propuesto.

Si bien en esta tesis no se profundiza en el código ni en los algoritmos de resolución dado que se empleó la interfaz gráfica del software para definir las características del modelo, se presentan los principios esenciales del método para comprender qué ocurre más allá de dicha interfaz.

Se incluye una visión general del contexto histórico del *FEM*, desde sus orígenes en el análisis estructural hasta su consolidación como técnica numérica ampliamente utilizada en ingeniería. A lo largo del capítulo se explican conceptos básicos del método, se describen los tipos de elementos, su orden y los puntos de integración utilizados para calcular tensiones y deformaciones.

Asimismo, se organizan los pasos típicos para llevar a cabo un análisis por elementos finitos, con el fin de ofrecer una explicación concisa de los procesos que subyacen en un software moderno de *FEM*, aunque no se ejecuten explícitamente en esta tesis. Además, se detallan algunas de las herramientas disponibles en la interfaz gráfica del software Ansys, utilizado en este trabajo para el modelado y simulación del dispositivo, incluyendo controles de mallado, refinamiento, evaluación de calidad de elementos y configuración de contactos entre cuerpos.

Finalmente, se introducen los modelos de materiales disponibles en la plataforma, tanto los utilizados en este trabajo como otros potencialmente aplicables, tales como elástico lineal, plástico, elasto-plástico e hiperelásticos, junto con sus parámetros característicos y ecuaciones constitutivas.

Esta base teórica y práctica permitirá al lector comprender el enfoque adoptado para el análisis estructural del diseño propuesto y las consideraciones particulares del estudio, tales como aproximaciones en la representación de materiales, efectos de no linealidad por deformación y contacto, procesos de refinamiento y análisis de convergencia de mallas, entre otros aspectos relevantes de esta tesis.

Las primeras cuatro secciones de este capítulo fueron adaptadas de [21], mientras que las secciones 3.5, 3.6 y 3.7 fueron adaptadas de [22].

3.1 Surgimiento del método de elementos finitos (*FEM*)

El Método de Elementos Finitos es una técnica numérica para resolver de manera aproximada ecuaciones diferenciales que describen fenómenos físicos.

El nombre de Método de Elementos Finitos (MEF) o en inglés, *Finite Element Method (FEM)* es algo relativamente nuevo; pero, el concepto en si se ha usado desde hace varios siglos. El empleo de métodos de discretización espacial y temporal y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde épocas anteriores. El método de elementos finitos parte de esa idea.

La historia del método de elementos finitos (*FEM*) se inicia en la década del cincuenta, a partir del surgimiento la computadora digital que hacía posible el cálculo automático de estructuras reticuladas sin recurrir a tediosos procedimientos. Surgiendo así el cálculo matricial de estructuras.

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural, fundamentalmente en el campo aeroespacial.

Varios autores consideran el nacimiento del *FEM* con la publicación, en 1956, de un artículo en una revista relacionada con la industria aeronáutica (*Stiffness and Deflection of Complex Structures*, M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp, *Journal of the Aeronautical Sciences* 1956 23:9, 805-823).

La idea básica del *FEM* es la discretización del objeto (dominio) de cálculo en fragmentos más pequeños (subdominios) y la aproximación en ellos de la magnitud física que queremos determinar (variables de campo) en función de su valor en puntos privilegiados de estos fragmentos más pequeños (nodos).

Hoy en día el *FEM* está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada.

En los problemas de ingeniería mecánica relacionados con el diseño mecánico estructural, el problema consiste en estudiar las tensiones y deformaciones que ocurren en el interior de un elemento o sucesión de cuerpos o elementos estructurales.

3.2 Conceptos fundamentales del FEM

Muchos fenómenos de ingeniería pueden ser expresados por medio de “ecuaciones que gobiernan el comportamiento del continuo (ecuaciones constitutivas)” y “condiciones de frontera”. Estas ecuaciones de gobierno o de estado están a menudo en la forma de ecuaciones diferenciales parciales o de ecuaciones diferenciales ordinarias. Desde el punto de vista matemático el FEM es un método numérico que se usa para resolver el conjunto de ecuaciones

diferenciales tales como las ecuaciones de movimiento en mecánica del continuo:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x = m\ddot{u}_x \quad \text{ec. 3.1}$$

$$\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_y = m\ddot{u}_y \quad \text{ec. 3.2}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z = m\ddot{u}_z \quad \text{ec. 3.3}$$

Estas ecuaciones describen cómo las fuerzas internas (tensiones) y externas (fuerzas de cuerpo) afectan el desplazamiento de un material.

Desde el punto de la ingeniería el FEM es un método numérico para resolver ecuaciones relacionadas por aproximación de variables de campo continuas. Como un conjunto de variables de campo en puntos discretos (nodos).

Si logramos obtener un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos estaremos en el caso de problemas discretos. Si la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema solo puede definirse haciendo uso del infinitésimo que nos conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados, a tales sistemas los denominamos continuos. Atendiendo a estos criterios, se define el FEM como un procedimiento general de discretización de los problemas continuos planteados por expresiones definidas matemáticamente.

El uso de elementos finitos para el análisis de sistemas físicos es comúnmente conocido como Análisis por elementos finitos (FEA).

3.2.1 Algunos términos comunes utilizados en FEM

Dominio: en el análisis por elementos finitos un dominio es un sistema continuo (región) sobre la cual gobiernan las leyes de la física. Por ejemplo, en el diseño mecánico el dominio podría ser partes de una pieza de maquina o un campo térmico.

Ecuaciones constitutivas: son las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del continuo. Son las derivadas de la física del sistema.

Condiciones límites o de frontera: son los valores de una función en los ejes del rango de alguna de sus variables. Necesitamos conocer las condiciones límites de manera de resolver un problema de ingeniería o encontrar una función desconocida.

Contactos: estos representan la interfaz física entre dos cuerpos o partes de un modelo. Pueden ser lineales o no lineales. Definen el comportamiento entre superficies, por ejemplo, si estarán pegadas (sin deslizamiento), con fricción entre las superficies, sin fricción, con separación permitida, etc.

Elemento: un elemento es una parte del dominio del problema y sus formas típicas son como el triángulo o el cuadrilátero en 2D; o un tetraedro o hexaedro en 3D.

Nodo: un nodo es un punto del dominio, y es a menudo el vértice de muchos elementos.

Punto de integración: son puntos dentro de un elemento donde se evalúan las funciones de forma y sus derivadas para calcular integrales como rigidez, masa, fuerzas internas.

Función de forma: son funciones matemáticas que describen cómo varía una variable (por ejemplo, desplazamiento, temperatura, presión) dentro de un elemento en función de los valores en sus nodos. En general, la solución o el modelo de interpolación es tomado en la forma de un polinomio, aunque podrían utilizarse otro tipo de funciones.

Malla (Mesh): los elementos y nodos, juntos, forman una malla, la que es la estructura de datos central en el Análisis por Elementos Finitos (FEA).

Mallado: la mayoría de los softwares de FEM pueden generar automáticamente el mallado. Además, existen muchas herramientas para trabajar sobre distintos factores de la malla como el tipo de elementos, tamaño, transiciones, etc.

3.3 Resolución de problemas estructurales

En el caso de problemas estructurales, la solución consiste en encontrar los desplazamientos de los nodos y a partir de ellos las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos están dadas por el material asignado al elemento, éste define la rigidez del mismo y la geometría de la estructura a modelar.

Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. Para un régimen elástico, las ecuaciones que definen el sistema pueden expresarse de forma matricial según la siguiente ecuación.

$$[K_p] \vec{u} = \vec{F} \quad \text{ec. 3.4}$$

En la expresión anterior;

$[K_p]$ es la matriz de rigidez del sistema

\vec{u} es el vector desplazamiento

\vec{F} es el vector de cargas

Para determinar el valor del vector desplazamiento tendremos que resolver la siguiente expresión:

$$\vec{u} = [K_p]^{-1} \vec{F} \quad \text{ec. 3.5}$$

Por otro lado, los nodos generalmente se encuentran en las fronteras del elemento donde los elementos adyacentes se consideran que están conectados. Ya que la variable de campo (es decir: desplazamientos, tensiones, deformaciones, etc.) dentro del continuo es desconocida, asumimos que la variación de dicha variable dentro del elemento finito puede ser aproximada por una función. Estas funciones aproximadas (también llamadas modelos de interpolación o funciones de forma) se definen en términos de los valores de las variables de campo en los nodos. Cuando se escriben las ecuaciones de campo (por ejemplo, las ecuaciones de equilibrio) para el continuo, las nuevas incógnitas serán los valores nodales de la variable de campo. Resolviendo las ecuaciones de campo, las cuales generalmente se encuentran en forma de ecuaciones matriciales, se obtienen los valores nodales de la variable de campo. Una vez que estos son conocidos, la función de forma define a la variable de campo a través del ensamblaje de elementos.

3.3.1 Cálculo tensional por FEM

Dentro del cálculo de tensiones hay que distinguir entre dos tipos generales de aplicaciones: el lineal y el no lineal.

El cálculo lineal de tensiones, tanto estático como dinámico, se utiliza sobre todo en la fase de diseño o de proyecto, donde se busca hacer un uso eficiente del material y, en ocasiones, justificar el cumplimiento de una normativa o código de buena práctica. Su uso está muy difundido en el proyecto de elementos mecánicos y estructuras complejas. Se utiliza mucho también en el estudio de vibraciones.

En general, los cálculos lineales tienden a representar de manera más pobre la realidad del problema. A su favor, esto requiere menos recursos computacionales.

El cálculo y la visualización de los resultados permiten al ingeniero entender mejor el funcionamiento de sus diseños y, en consecuencia, optimizarlos.

El cálculo no lineal de tensiones comienza a tener un peso grande dentro de las aplicaciones prácticas del FEM. La industria ha impulsado mucho la investigación

en esta línea tanto para el diseño como para las verificaciones de sistemas ya en servicio. Existe una mejor representación de la física del problema.

El cálculo no lineal de tensiones se utiliza, entre otras cosas, para la determinación de cargas últimas o límites resistentes de estructuras. Esta clase de estudios busca una descripción lo más ajustada posible del comportamiento real.

3.3.1.1 Pasos para una solución

Paso 1 - Discretización del cuerpo o sistema en estudio: el primer paso es dividir la pieza o región de solución en subdivisiones o elementos finitos.

Paso 2 - Selección de una interpolación apropiada o modelo de desplazamiento: en una pieza compleja, la solución de los desplazamientos bajo una carga específica no es predecible exactamente y se asume una solución adecuada dentro del elemento para aproximar la solución desconocida.

Paso 3 - Construcción de las matrices de rigidez y vectores de carga: a partir del modelo de desplazamiento se construyen las matrices de rigidez y los vectores de carga del elemento usando condiciones de equilibrio.

Paso 4 - Ensamblaje de las ecuaciones del elemento para obtener las ecuaciones totales de equilibrio: como la estructura está compuesta de muchos elementos finitos, las matrices de rigidez y los vectores de carga se ensamblan de una manera efectiva y adecuada.

Paso 5 - Solución de los desplazamientos nodales desconocidos: las ecuaciones globales de equilibrio tienen que ser modificadas teniendo en cuenta las condiciones límites o de frontera del problema. Después de la incorporación de las condiciones de frontera, las ecuaciones de equilibrio se expresan como la ec 3.1.

Para problemas lineales, el vector desplazamientos, \vec{u} , puede ser resuelto fácilmente. No obstante, para problemas no lineales, la solución tiene que obtenerse en una secuencia de pasos, donde cada uno incluye una modificación de la matriz de rigidez $[K_p]$ y/o del vector de carga \vec{F} .

Paso 6 - Solución computacional de tensiones y deformaciones en el elemento: de la resolución de los desplazamientos se obtiene luego los desplazamientos y tensiones integrando en los puntos de integración del elemento y extrapolando, interpolando o en algunos casos copiando estos valores a los nodos.

3.4 Ventajas y limitaciones del FEM

Como todo método aproximado de solución de problemas posee ventajas y limitaciones que deben ser conocidas por quienes apliquen el método.

Ventajas:

- Permite analizar elementos de geometría y restricciones complejas.
- Puede trabajar con solicitudes complejas de cargas.
- Puede resolver varios problemas de ingeniería desde mecánica del sólido, transferencia de calor, campos electrostáticos y problemas no lineales.

Limitaciones:

- Las soluciones por FEM son aproximadas. Pero, a más refinamiento de la malla, mayor exactitud en las soluciones.
- Las soluciones por FEM pueden contener errores propios de la computación como resultado de la acumulación de errores durante la computación numérica.
- Las soluciones del FEM pueden contener grandes errores como resultado de una incorrecta modelación de estructuras, cargas o de las condiciones límites.

3.5 Modelos 2D y 3D

3.5.1 Discretización del continuo

Como ya se mencionó, el método de elementos finitos se caracteriza por la discretización del continuo.

El modelo puede ser categorizado como un modelo 2D o 3D y ser compuesto por elementos puntuales, elementos de línea, elementos de área o elementos sólidos. Además, se pueden mezclar elementos.

Modelos de línea: pueden representar estructuras de vigas o tuberías en 2D o 3D, así como modelos 2D de estructuras tipo cáscaras cuando son axisimétricas en 3D.

Modelos sólidos 2D: se utilizan para estructuras planas delgadas (esfuerzo plano), estructuras “infinitamente largas” con sección transversal constante (deformación plana) o estructuras sólidas axisimétricas. En la Figura 3.1 podemos ver la discretización de una superficie.

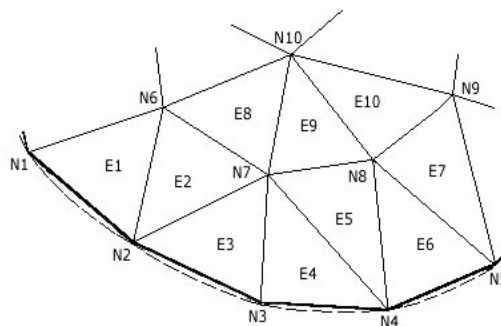


Figura 3.1 Discretización del dominio de una superficie. $E1$ representa el elemento 1. $N1$ representa el nodo 1 y la línea a trazos el límite real del dominio. Modificado de [21].

Modelos de cáscaras 3D: se utilizan para estructuras delgadas en el espacio 3D.

Modelos sólidos 3D: se utilizan para estructuras volumétricas en el espacio 3D que no tienen ni una sección transversal constante ni un eje de simetría. En la Figura 3.2 podemos ver la discretización de una pieza tridimensional.

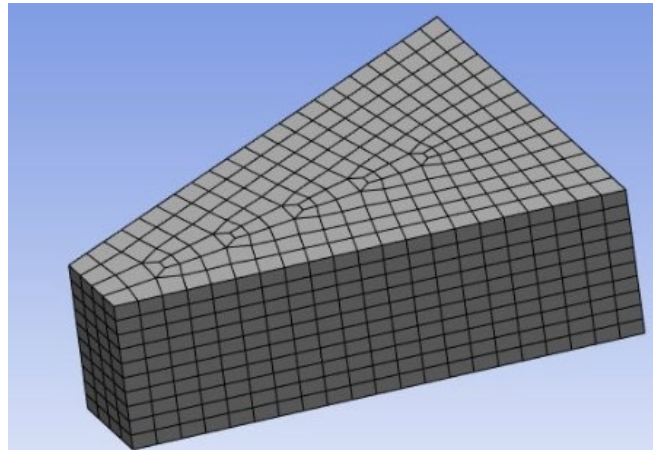


Figura 3.2 Discretización de dominio en 3D. Modificado de [22].

3.5.2 Tipos de Elementos

Los elementos utilizados en la resolución a través de FEM son:

Elementos de tipo lineal (1D)

En la Figura 3.3 podemos ver el elemento lineal más simple con un nodo en cada extremo.



Figura 3.3 Elemento lineal de 2 nodos. Modificado de [22].

Estos pueden ser resortes, barras, vigas.

Elementos planos (2D)

En la Figura 3.4 podemos ver elementos planos de 4 nodos (de primer orden) y de 8 nodos (de segundo orden) el orden de los elementos se explica en mayor detalle en la próxima subsección. En la Figura 3.5 podemos ver la obtención de elementos de las mismas características para un modelo axisimétrico.



Figura 3.4 Elementos planos de 4 nodos (izquierda) y 8 nodos (derecha). Modificado de [22].



Figura 3.5 Elementos de sólidos axisimétricos. De 4 a 48 nodos (izq.) Y de 8 a 96 nodos (der.). Modificado de [22].

Estos pueden ser membranas, placas, sólidos de revolución.

Elementos sólidos (3D)

En la Figura 3.6 se observa un elemento tridimensional de primer orden y uno de segundo orden.

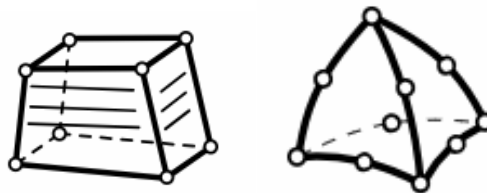


Figura 3.6 Hexaedro de 8 nodos (izq.) y Tetraedro de 10 nodos (der.). Modificado de [22].

Son utilizados para todo tipo de sólidos volumétricos en general.

3.5.3 Orden de los elementos

En general existen dos tipos de elementos de área y volumen: de primer y de segundo orden.

3.5.3.1 Elementos de primer orden

Son aquellos que no poseen nodos intermedios. Para análisis estructurales, estos elementos con nodos en las esquinas suelen proporcionar una solución precisa en un tiempo razonable de cómputo. Al utilizar estos elementos, es importante evitar sus formas degeneradas en regiones críticas. Es decir, se debe evitar el uso de elementos de primer orden triangulares en 2D y de elementos tipo cuña o tetraédricos en 3D en regiones con altos gradientes de resultados o en otras zonas de especial interés.

3.5.3.2 Elementos de segundo orden

Son aquellos elementos con nodos intermedios. En regiones críticas, los elementos triangulares en 2D y tipo cuña o tetraédricos en 3D pueden presentar limitaciones de precisión, especialmente si están mal mallados o si se usan en su

forma de primer orden. En estos casos, se recomienda el uso de elementos de segundo orden o de geometría más regular. Los elementos de segundo orden suelen ofrecer mejores resultados que los elementos de primer orden, aunque con un mayor costo computacional. No obstante, pueden requerirse menos elementos para alcanzar una precisión similar, lo que compensa parcialmente dicho costo.

3.5.4 Puntos de integración

Los puntos de integración (o puntos de Gauss) se usan para integrar numéricamente las matrices (rigidez, masa, etc.) y calcular las tensiones en el elemento. Estos puntos no necesariamente coinciden con los nodos.

Es en los puntos de integración donde las funciones de forma y los resultados de los campos derivados (obtenidos en base los resultados primarios), como la deformación y tensión, son más precisos. Estos resultados pueden extrapolarse o interpolarse a los nodos para visualizar un campo continuo, sin embargo, cuando existen no linealidades, se representan los valores de los puntos de integración en los nodos para evitar introducir errores que no representen el estado real.

La cantidad de puntos de integración depende del orden de los elementos y de la función de forma empleada. A mayor cantidad de puntos de integración mayor exactitud y mayor costo computacional. En la Figura 3.7 se observan elementos triangulares (2D) con distintas cantidades de puntos de integración. De igual manera, en la Figura 3.8 se observan elementos tetraédricos con distintas cantidades de puntos de integración.

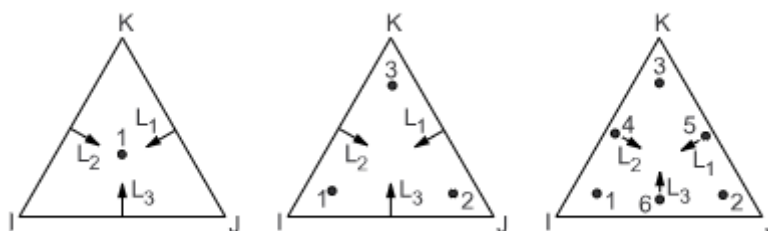


Figura 3.7 Puntos de integración para Triángulos. 1, 3 y 6 puntos de integración respectivamente. Modificado de [22].

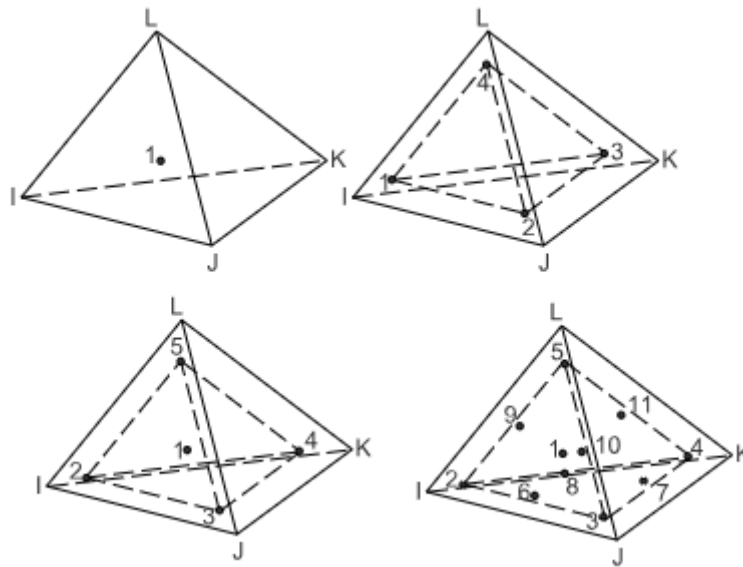


Figura 3.8 Puntos de integración para elementos tetraédricos. 1, 4, 5 y 11 puntos de integración. Modificado de [22].

3.6 Herramientas de mallado

Si bien todos los softwares poseen herramientas de mallado automático queda a criterio del usuario valerse de esta herramienta o bien aplicar controles específicos sobre la malla.

Son muchos los controles posibles, estos pueden aplicarse a nivel global para todo el conjunto en análisis o bien para selecciones o cuerpos en particular.

La mayoría de los controles generales o locales son similares, uno de los controles generales más importantes es la verificación automática de parámetros de calidad de mallado (como la relación de aspecto de los elementos).

Algunos de los controles más habituales —tanto para control global como local— en Ansys son:

3.6.1 Method Control

El *Method Control* o control de método de mallado proporciona los algoritmos utilizados para malla cuerpos sólidos y de lámina. Algunos de los métodos de mallado pueden ser:

Tetraédrico: este método crea una malla tetraédrica para el cuerpo o dominio indicado. Además, se pueden definir otras características como el tipo de algoritmo de mallado y el orden de los elementos.

Predominantemente Hexaédrico: este método crea una malla hexaédrica con cuadriláteros extrudados y luego rellena los espacios restantes con elementos no estructurados. Se puede establecer que el espacio remanente sea ocupado por elementos triangulares. También se puede definir el orden de los elementos.

De barrido (sweep): este método se utiliza en geometrías que permiten extruir o barrer una sección a lo largo de un camino (por ejemplo, una barra de sección constante). Se define una cara donde se generará la malla que será barrida a lo largo del cuerpo y se selecciona la contracara para indicar la dirección del barrido. También se pueden establecer tipos preferenciales de elementos y orden de estos.

Multizona: el control Multizona proporciona una descomposición automática de la geometría en regiones barribles (*sweepable*) y regiones libres. En general todas las regiones se mallan con una malla puramente hexaédrica si es posible. Para manejar casos en los que no sea posible una malla completamente hexaédrica, se puede ajustar la configuración para generar una malla por barrido en las regiones estructuradas y una malla libre en las regiones no estructuradas. Este control posee muchas variables para permitir establecer una mejor forma de generar la malla en cuerpos irregulares.

3.6.2 Sizing Control

Este control sirve para establecer los siguientes aspectos:

- El tamaño del elemento para un cuerpo, cara o arista seleccionada.
- El número de divisiones a lo largo de una arista.
- El tamaño del elemento dentro de un "cuerpo o esfera de influencia" definido por el usuario, que puede incluir un cuerpo, cara, arista o vértice seleccionados.
- El tamaño mínimo de malla utilizado para un cuerpo, cara o arista seleccionada.

Cuando se establece este control de manera local, en una cara o arista, se hará una transición suave de tamaño entre los elementos cercanos a los controlados.

3.6.3 Contact Sizing Control

Este control crea elementos de tamaño relativamente uniforme en los cuerpos a partir de las caras de una región de contacto cara a cara o cara a arista. Permite ajustar las características de tamaño en las inmediaciones de un contacto.

3.6.4 Refinement

Este control especifica el número de veces que una malla inicial será refinada. Se puede aplicar sobre caras, aristas y vértices. En Ansys este control permite refinar entre 1 y 3 veces el tamaño original del elemento.

3.6.5 Inflation Control

Este control permite definir la expansión progresiva de elementos desde una cara o arista seleccionada mediante la configuración del espesor total, el número de capas y parámetros adicionales como el factor de crecimiento. Su aplicación resulta útil para obtener una mayor resolución en superficies o aristas sin necesidad de refinar la malla global del componente.

3.6.6 Element Quality

Si bien no constituye un control de mallado propiamente dicho, este parámetro permite evaluar la necesidad de aplicar ajustes adicionales para mejorar la calidad de la malla y, por ende, la confiabilidad de los resultados. En esta tesis se emplea la métrica compuesta de calidad —*Element Quality*— definida por Ansys, la cual varía entre 0 y 1. Este índice se calcula en función de la relación entre el volumen del elemento y la suma del cuadrado de las longitudes de sus aristas: para elementos 2D (cuadriláteros o triángulos) se utiliza la relación directa, mientras que para elementos 3D se considera la raíz cuadrada del cubo de dicha suma. Un valor de 1 indica un elemento ideal (cubo o cuadrado perfecto), mientras que un valor próximo a 0 refleja un elemento degenerado con volumen nulo o negativo.

Ansys recomienda evitar elementos con valores inferiores a 0,05 en zonas donde existan grandes gradientes de tensión o deformación, ya que podrían comprometer la precisión del análisis. No obstante, en regiones donde solo se evalúan desplazamientos, valores menores pueden ser aceptables sin afectar significativamente la interpretación global.

3.7 Contactos

Los contactos definen como interactúan dos o más cuerpos en contacto durante la simulación. Es decir, definen las características de contacto y por lo tanto el movimiento relativo entre estos.

3.7.1 Tipos más habituales de contactos

3.7.1.1 Bonded

Contacto de tipo “unido”. Si las regiones de contacto están unidas, no se permite deslizamiento ni separación entre caras o aristas. Este tipo de contacto permite una solución lineal, ya que la longitud/área de contacto no cambiará durante la

aplicación de la carga. Si se determina este tipo de contacto, en el modelo matemático, cualquier separación entre piezas en contacto *bonded* se cerrará y cualquier penetración inicial se ignorará.

3.7.1.2 *No Separation*

Contacto “sin separación”. Esta configuración solo se aplica a regiones de caras (para sólidos 3D) o aristas (para placas 2D). No se permite la separación de las geometrías en contacto, pero a diferencia del *Bonded*, si se permite deslizamiento sin fricción.

3.7.1.3 *Frictionless*

Contacto “sin fricción”. Este ajuste modela un contacto unilateral estándar; es decir, la presión normal es cero si ocurre separación. Por lo tanto, pueden formarse separaciones entre cuerpos en el modelo, dependiendo de la carga. Esta solución es no lineal porque el área de contacto puede cambiar a medida que se aplica la carga. Se asume un coeficiente de fricción cero y se permite el deslizamiento libre. El modelo debe estar bien restringido al usar este ajuste.

3.7.1.4 *Rough*

Contacto “rugoso”. Similar al ajuste sin fricción, este ajuste modela un contacto perfectamente rugoso donde no hay deslizamiento. Solo se aplica a regiones de caras (para sólidos 3D) o aristas (para placas 2D). De forma predeterminada, no se realiza cierre automático de huecos. Este caso corresponde a un coeficiente de fricción infinito entre los cuerpos en contacto.

3.7.1.5 *Frictional*

Contacto con fricción. En este ajuste, las dos geometrías en contacto pueden soportar esfuerzos cortantes hasta cierta magnitud en su interfaz antes de comenzar a deslizarse entre sí. Este estado se conoce como de “adherencia” (*sticking*). El modelo define un esfuerzo cortante equivalente en el que comienza el deslizamiento como una fracción de la presión de contacto. Una vez superado el esfuerzo cortante, las dos geometrías se deslizarán entre sí. El coeficiente de fricción puede ser cualquier valor no negativo.

3.7.2 Resumen de contactos y su comportamiento

A modo resumen se presentan en la Tabla 3-1 el comportamiento y las características de deslizamiento y separación de los contactos mencionados.

Tipo de contacto	Comportamiento	Deslizamiento	Separación
Bonded (Unido)	Las superficies quedan “pegadas”; se mueven juntas.	No	No
No Separation (Sin separación)	Similar a <i>Bonded</i> en la normal: no se permite separación una vez en contacto.	Sí, sin resistencia	No
Frictionless (Sin fricción)	Contacto unilateral estándar: presión normal = 0 si hay separación.	Sí, sin resistencia	Sí (pueden formarse <i>gaps</i>)
Rough (Rugoso)	Contacto perfectamente rugoso: no hay deslizamiento; resistencia tangencial “infinita”.	No, resistencia infinita	Sí (no cierra <i>gaps</i> por defecto)
Frictional (Con fricción)	Soporta esfuerzo cortante hasta un umbral (estado de adherencia); luego desliza con μ definido.	Sí, con fricción (<i>sticking</i> → <i>sliding</i>)	Sí (unilateral)

Tabla 3-1 Resumen de contactos mencionados y comportamiento de cada uno.

3.8 Modelado de materiales

Los modelos de material (también llamados modelos constitutivos) son la representación matemática de la respuesta de un material ante una carga aplicada.

Para el caso de esta tesis la relación que nos interesa es entre esfuerzo y deformación. Pero también abarcan comportamientos más generales como la respuesta debida a cambios en el entorno físico, como ser la expansión térmica e hinchamiento.

En los modelos estructurales de Ansys, todas las propiedades del material son evaluadas en los puntos de integración.

Para análisis que incluyen grados de libertad de desplazamiento, la entrada es una función de la deformación, como la deformación específica (*strain*) o el

desplazamiento, y la respuesta se expresa en cantidades similares a fuerzas, como tensión (*stress*) o las fuerzas normales y tangenciales. A continuación, se presentan los principales modelos utilizados para describir distintos comportamientos de materiales.

3.8.1 Elástico lineal

La respuesta son esfuerzos directamente proporcionales a las deformaciones, y el material recupera completamente su forma original al descargar. Para materiales isótropos, la relación está dada por la ley de Hooke y puede generalizarse para definir comportamiento anisótropo. [22]

Para un material isotrópico los datos de entrada para modelar el material serán:

- Módulo de Young.
- Coeficiente de Poisson.

También existen modelos para materiales ortotrópicos y anisotrópicos.

3.8.2 Plástico y elasto-plástico

La deformación del material incluye un componente permanente (plástico) que no regresa a la configuración original si se retira la carga, y evoluciona según la historia de deformación. Estos materiales también suelen tener un comportamiento elástico, por lo que la deformación combinada incluye una parte recuperable al descargar.

3.8.2.1 *Material con endurecimiento isotrópico bilineal*

Se describe mediante una curva bilineal de tensión efectiva frente a deformación efectiva. La pendiente inicial de la curva es el módulo elástico del material (E_y). Más allá de la tensión de fluencia inicial especificada (σ_0), se desarrolla deformación plástica y la relación tensión vs. deformación total continúa a lo largo de una línea con pendiente igual al módulo tangente (E_T). Este modelo se representa en la Figura 3.9. Considerando σ_y la tensión máxima a la tracción o tensión última, el módulo tangente se simplifica como el módulo secante.

Se puede definir conociendo el módulo elástico, la tensión de fluencia, la tensión última y su deformación. De manera de obtener con estos datos las pendientes de ambas rectas y el punto de intersección. [22]

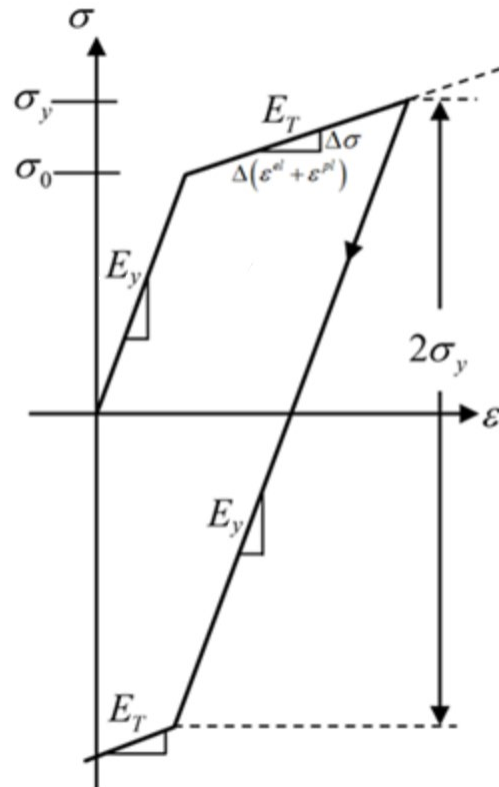


Figura 3.9 Tensión versus deformación total para un endurecimiento bilineal isotrópico. Modificado de [22].

Existen además muchos otros modelos de endurecimiento isotrópico, como multilineal y no lineal. Además, existen otros criterios de plasticidad, que pueden ser independientes de la velocidad de aplicación del esfuerzo tal como el visto o también dependientes.

3.8.3 Hiperelásticos

El comportamiento se define mediante un potencial de energía de deformación, que es la energía almacenada en el material debido a la deformación. La formulación matemática es conveniente para análisis de grandes deformaciones como el caso de los elastómeros (polímeros de gran capacidad de deformación elástica).

Para describir el comportamiento mecánico de los elastómeros se han desarrollado varios modelos teóricos (Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, entre otros). Estos modelos se basan en ensayos simples, como tracción uniaxial, compresión y corte. Actualmente se trabaja en la normalización de estos ensayos y en reemplazar algunos por pruebas más precisas, como el ensayo biaxial en lugar del de compresión, ya que permite obtener un estado tensional puro bajo compresión. A continuación, se presentan las ecuaciones de los diferentes modelos hiperelásticos. [23]

Existen diversos modelos que parten de considerar que la función de densidad de energía de deformación (W) se puede expresar como un polinomio de las invariantes de deformación (I) o alargamiento λ .

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{l_1 - l_0 + l_0}{l_0} = \varepsilon + 1 \quad \text{ec. 3.6}$$

De manera análoga a las tres deformaciones principales en la ley de Hook, se pueden obtener los tres alargamientos principales ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$). Las tres invariantes de alargamiento son independientes del sistema de coordenadas y se definen como [24]:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad \text{ec. 3.7}$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad \text{ec. 3.8}$$

$$\lambda = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 = J^2 \quad \text{ec. 3.9}$$

Donde J , es el cociente volumétrico total, que vale 1 para materiales incompresibles con coeficiente de Poisson 0,5.

Para los modelos hiperelásticos la ecuación general de la función de energía de deformación es la siguiente:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad \text{ec. 3.10}$$

Donde C_{ij} y D_k son constantes de los materiales que se determinan mediante ensayos. La función tiene una forma polinomial. Dependiendo del orden, podrán aparecer uno o más puntos de inflexión en la curva. [24]

3.8.3.1 Modelo de hiperelasticidad Neo-Hookeano

Es el más simple de los modelos de hiperelasticidad (citado en [24]). Es función de un solo invariante de alargamiento. Se define como:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + \frac{1}{D_1} (J - 1)^2 \quad \text{ec. 3.11}$$

Las constantes C_{10} y D_1 están relacionadas al módulo de corte y módulo de compresibilidad inicial por las siguientes expresiones:

$$G_0 = 2C_{10} \quad \text{ec. 3.12}$$

$$G_0 = \frac{2}{D_1} \quad \text{ec. 3.13}$$

3.8.3.2 Modelo de hiperelasticidad Mooney-Rivlin

Es el primer modelo de hiperelasticidad, utiliza el primer y segundo invariante de alargamiento (citado en [24]). El modelo Neo-Hookeano es un caso particular de este modelo.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad \text{ec. 3.14}$$

En este modelo, el módulo de corte inicial resulta:

$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad \text{ec. 3.15}$$

3.8.3.3 Modelo de hiperelasticidad Ogden

Ogden define la función de densidad de energía de deformación en termino de los coeficientes de alargamiento principales (citado en [24]). El modelo se expresa de la siguiente forma:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^2 \quad \text{ec. 3.16}$$

3.8.3.4 Modelo de hiperelasticidad Yeoh

Yeoh (citado en [24]) propuso no utilizar el segundo invariante porque es más difícil de medir y proporciona un ajuste de datos menos preciso cuando se cuenta con pocos puntos de prueba. Esta forma especial del modelo polinómico reducido se expresa como:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J - 1)^6 \quad \text{ec. 3.17}$$

Existen diversos modelos hiperelásticos, en este trabajo se citan de manera simplificada los que se consideraron más importantes para introducir al lector en el modelado “ideal” de elastómeros.

4 Diseño de la Plataforma de Medición

Este capítulo presenta de manera estructurada el proceso de diseño del dispositivo propuesto para el monitoreo interno en líneas de producción. Se parte de la identificación del problema que se busca resolver, junto con los requerimientos de servicio que condicionan tanto las funcionalidades esperadas como las características geométricas y constructivas del sistema.

A lo largo del capítulo se describe la integración prevista de técnicas electroquímicas —principalmente espectroscopía de impedancia electroquímica (*EIS*)— y cómo estas influyen en la configuración del dispositivo. Se detallan los criterios normativos y de diseño aplicados, especialmente aquellos establecidos por el código ASME y las prácticas recomendadas de la industria, que guían la validación estructural del sistema mediante análisis por elementos finitos (*FEA*).

Asimismo, se indican los criterios de selección de materiales para los componentes del dispositivo, en particular, el cuerpo metálico sometido a presión y el sistema de sellado elastomérico. Finalmente, se presentan los modelos constitutivos adoptados para representar el comportamiento mecánico de estos materiales, haciendo especial énfasis en la aproximación bilineal isotrópica utilizada para modelar el elastómero.

4.1 Descripción del proceso de diseño

El proceso de diseño del dispositivo de monitoreo se desarrolló de forma iterativa, combinando etapas de investigación, conceptualización, simulación y ajuste, con el objetivo de alcanzar una solución técnica robusta, funcional y adaptable a condiciones reales de operación.

Inicialmente, se identificaron los requerimientos funcionales y operativos del sistema, considerando tanto las condiciones de servicio como las limitaciones impuestas por la instalación en líneas existentes. A partir de esta información, se propuso un diseño conceptual basado en un anillo de drenaje modificado, el cual sirvió como base para la integración de sensores electroquímicos.

La evolución del diseño se dio en ciclos sucesivos de mejora, donde cada iteración incluyó:

- **Evaluación de características geométricas y normativas** (ASME B31.3, B16.5, PCC-1).
- **Revisión de la configuración de sensores** y su compatibilidad con técnicas electroquímicas, principalmente *EIS*.
- **Simulación estructural mediante análisis por elementos finitos (*FEA*)** para validar esfuerzos, deformaciones y sellado.

- **Optimización de componentes mecánicos** como el sistema de sellado y sujeción retráctil y el diseño de los puertos de acceso.

Este enfoque permitió detectar y corregir problemas como concentraciones de tensiones en zonas críticas y dificultades de sellado.

La validación final se realizó bajo los criterios de diseño establecidos por el código ASME VIII Div. 2 Parte 5, asegurando que el dispositivo cumpla con los requisitos de seguridad y desempeño esperados. Además, se verificaron los requisitos impuestos por el usuario, relacionados a la deformación máxima de la cara de la brida para asegurar el sellado, conforme ASME PCC-1.

En resumen, el diseño se consolidó como una solución modular, versátil y técnicamente viable para el monitoreo en línea de corrosión y emulsiones en sistemas de producción.

4.1.1 Identificación del problema

En el contexto de producción de hidrocarburos, particularmente en pozos de recuperación terciaria (*Enhanced Oil Recovery, EOR*) y en procesos de *flowback*, se presentan desafíos operativos significativos relacionados con la presencia de residuos poliméricos y emulsiones estables. Estos compuestos dificultan la separación eficiente de fases (agua, crudo y gas) y promueven mecanismos de corrosión acelerada en las instalaciones de superficie.

La interacción entre estos fluidos complejos y los materiales metálicos de las líneas de producción genera condiciones altamente agresivas, que comprometen la integridad estructural de los activos.

Frente a esta problemática, se plantea la necesidad de desarrollar un sistema de monitoreo capaz de detectar en línea la presencia de emulsiones y evaluar la corrosividad del medio sin requerir intervenciones intrusivas ni modificaciones estructurales en la cañería existente. Este sistema debe ser compatible con condiciones de alta presión y temperatura, y permitir la integración de técnicas electroquímicas avanzadas para la caracterización del fluido y del comportamiento del material expuesto.

4.1.2 Investigación e ideas conceptuales

Para establecer los criterios de diseño del dispositivo, se realizó una recopilación sistemática de información técnica y normativa, considerando tanto las condiciones operativas del sistema como las restricciones impuestas por la infraestructura y los objetivos del proyecto.

En primer lugar, se definió el entorno de instalación del sensor, identificando el límite entre las configuraciones típicas de cabezales de pozo en instalaciones de

crudo no convencional (NoC) y el sistema de cañerías aguas abajo del cabezal. Se analizaron las condiciones típicas de operación en términos de presión, temperatura y características del fluido, con el fin de establecer los requerimientos del sistema.

Desde el punto de vista normativo, se delimitó el alcance de aplicación de los códigos de diseño. Se identificó que:

- Desde el cabezal hasta el último dispositivo regulador de presión, el diseño debe cumplir con la norma API 6A, aplicable a equipos de producción en boca de pozo.
- Aguas abajo del cabezal, el diseño de sistemas de cañerías debe regirse por el código ASME B31.3, correspondiente a procesos de plantas químicas y petroquímicas.

Se estableció que la ubicación más adecuada para el montaje es aguas debajo del cabezal, luego del sistema de regulación típicamente instalado luego del cabezal.

Asimismo, se identificaron los anillos de drenaje (Figura 4.1), como componentes industriales existentes que presentan similitudes geométricas y funcionales con el concepto de plataforma de monitoreo propuesto. Se evaluaron sus características constructivas y se revisó la normativa aplicable para su cálculo y verificación estructural.

Este relevamiento permitió establecer una base técnica sólida para el desarrollo conceptual del dispositivo, asegurando su compatibilidad con las prácticas industriales y los estándares de seguridad vigentes.



Figura 4.1 Anillo de drenaje (bleed ring) o anillo de limpieza (flushing ring). Tomado de [25].

A partir del relevamiento técnico y normativo, se comenzó a delinear el diseño conceptual del dispositivo. La propuesta inicial consistía en una modificación de un anillo de drenaje convencional al cual se le acoplaban niples de acceso y bridas con tapas de bridas en sus extremos (Figura 4.2). Estas tapas permitirían la instalación de conectores para la transmisión de señales desde los sensores hacia el exterior.

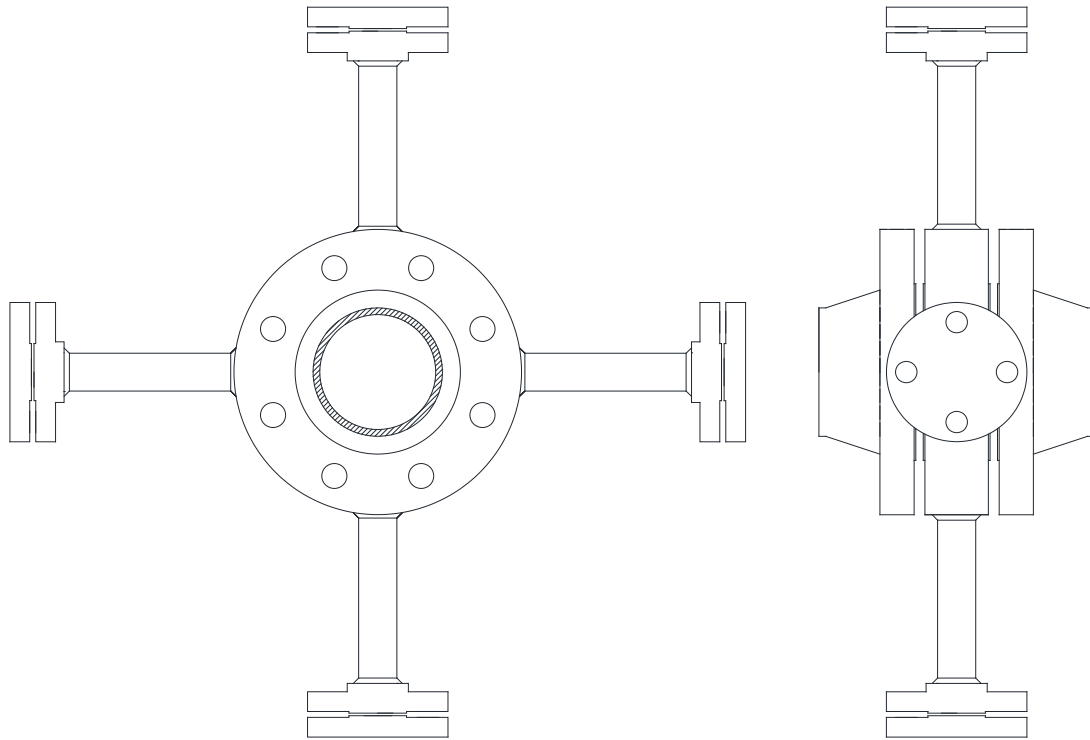


Figura 4.2 Primer modelo conceptual, dispositivo ubicado entre bridas. Sin juntas ni espárragos para una mejor visualización.

Sin embargo, durante el análisis funcional, se identificaron limitaciones en términos de accesibilidad, mantenimiento y capacidad de sellado. Esto motivó la evolución del diseño hacia un sistema de conectores retráctiles, soldados sobre bridas de 1”, capaces de permitir la inserción y extracción de sensores en servicio (Figura 4.3). Esta configuración incorpora elementos de sellado por compresión de elastómeros, mejorando la integridad frente a presión y facilitando el mantenimiento sin necesidad de detener el proceso.

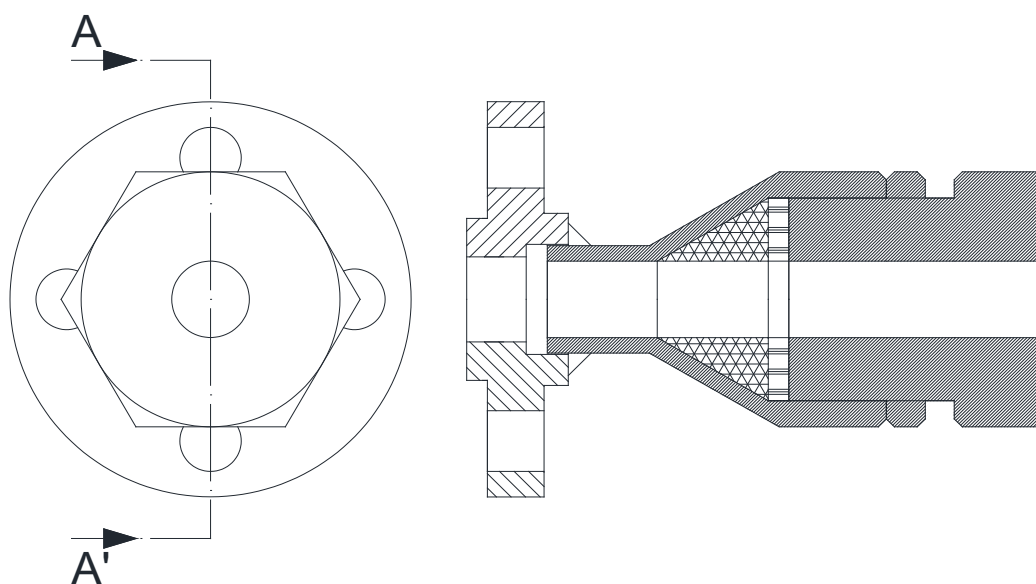


Figura 4.3 primer modelo de conector retráctil soldado sobre brida 1", a la izquierda vista superior a la derecha corte A-A'.

A medida que se avanzó en el análisis funcional y estructural, se identificaron más oportunidades de mejora en aspectos como el sellado, la accesibilidad y la integración de sensores, las sollicitaciones mecánicas, etc.

4.1.3 Diseño preliminar

Esta etapa fue abordada en múltiples ocasiones durante el desarrollo, dado que el proceso de diseño se planteó de forma iterativa. A partir de la idea conceptual inicial, se avanzó hacia un diseño preliminar con dimensiones definidas, las cuales fueron sometidas a simulaciones estructurales o análisis funcionales. En cada iteración surgieron nuevas observaciones, limitaciones o mejoras potenciales que requerían ajustes tanto en el concepto como en el modelo preliminar.

Estas observaciones motivaron la evolución del diseño hacia un modelo preliminar más robusto, el cual incorporó conectores retráctiles, sistemas de sujeción mecánica y elementos de sellado por compresión entre otras modificaciones de la primera idea conceptual.

Tal como se muestra en la Figura 4.2, el primer modelo conceptual no contemplaba sistemas de sellado; se preveía sujetar el sensor directamente sobre la tapa brida. Para resolver el pasaje de cables y garantizar la estanqueidad, se propuso incorporar un sistema de sellado mediante la compresión de un elastómero.

Este componente, que inicialmente se consideró únicamente como un elemento de sellado, también debía cumplir funciones estructurales, reteniendo mecánicamente la varilla porta-sensor frente a las presiones de operación. Esto

llevó a la inclusión de un sistema de sujeción mecánica adicional, capaz de soportar las cargas inducidas por el proceso.

Una vez que las primeras simulaciones arrojaron resultados prometedores en términos de esfuerzos y deformaciones, se procedió a consolidar el diseño preliminar y avanzar hacia una etapa de mayor nivel de detalle, incorporando los aprendizajes obtenidos en cada ciclo de análisis.

4.1.4 Simulación y realimentación

Durante esta etapa se realizaron ajustes específicos sobre el modelo preliminar, enfocados en optimizar aquellos aspectos que, durante las simulaciones, presentaban oportunidades de mejora. Una de las tareas con mayor número de iteraciones fue la definición de las características geométricas y mecánicas del sistema de sellado. Este aspecto debía resolverse en primer lugar, ya que las cargas generadas por la compresión del elastómero constituyen una variable de entrada en las verificaciones estructurales posteriores. Entre los cambios realizados se destacan la modificación de la geometría del sello de goma y el ajuste de radios en zonas de concentración de tensiones.

Otra corrección relevante fue la modificación en la unión entre el niple y el anillo. Inicialmente se había planteado una soldadura tipo *socket*, pero las simulaciones revelaron una elevada triaxialidad de tensiones en esa región. Como respuesta, se adoptó una configuración de soldadura a tope, que permitió mejorar la distribución de esfuerzos y reducir los picos de triaxialidad localizados.

La verificación final del diseño, realizada conforme a los criterios de aceptación establecidos por el código ASME VIII Div. 2 Parte 5, confirmó que las dimensiones y características del conjunto final son aptas para el servicio. Este resultado marcó el cierre del proceso iterativo y la consolidación del modelo definitivo.

4.2 Requerimientos de servicio

El diseño del dispositivo debe responder adecuadamente a las condiciones operativas del entorno en el que será instalado. Para ello, se establecen los siguientes requerimientos técnicos, agrupados en función de los factores que afectan su desempeño: presión y temperatura, características del fluido, requerimientos electroquímicos y mecánicos.

4.2.1 Requerimientos de presión y temperatura

El diseño del dispositivo y de todos los componentes sometidos a presión se realizó considerando una presión máxima de operación de 100 kg/cm^2 y una temperatura máxima de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Estos valores fueron definidos en función de las condiciones observadas en pozos de crudo no convencional (NoC), particularmente en etapas de producción y *flowback*.

La presión interna no solo influye en la presión de diseño del dispositivo, sino que además afecta factores como el sellado entre bridas y cada puerto de acceso a los sensores.

La temperatura de operación, aunque moderada en comparación con otros entornos industriales, influye directamente en el comportamiento de los materiales seleccionados, especialmente en lo que respecta a la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional y la compatibilidad química de los elastómeros utilizados en el sistema de sellado.

4.2.2 Requerimientos por fluidos

La selección de materiales para el diseño del dispositivo debe considerar las características químicas del fluido de proceso, dado que estas condicionan directamente la resistencia a la corrosión, la compatibilidad química y el desempeño mecánico de los componentes expuestos.

El sistema opera en contacto con una corriente trifásica compuesta por gas natural, petróleo y agua, con presencia de contaminantes agresivos como dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S). La fase acuosa, que actúa como electrolito en los procesos electroquímicos, presenta un elevado contenido de sales y compuestos corrosivos, lo que incrementa significativamente el riesgo de degradación de los materiales metálicos. Se observan en la Tabla 4-1 los parámetros químicos obtenidos del muestreo anual del agua:

Variable	UNIDAD	Extremos muestreo anual
pH in situ	-----	6,05 – 7,07
SULFUROS in situ	mg/l	<0,1 – 2
CO₂ in situ	mg/l	218 – 612
CLORUROS	mg/l	38000 - 58000
SULFATOS	mg/l	130 – 225
CARBONATOS in situ	mg/l	>0,1
BICARBONATOS in situ	mg/l	88 – 771
SOLIDOS EN SUSPENSION	mg/l	156 - 512

Tabla 4-1 caracterización fisicoquímica de la fase acuosa en corrientes de NoC, Argentina.

Estos valores reflejan un entorno altamente agresivo, con potencial para inducir mecanismos de corrosión localizada, fisuración por sulfuros (SSC), fisuración por cloruros (Cl-SCC), picado y corrosión bajo depósitos o rendijas. En consecuencia, se requiere la utilización de materiales específicos que tengan buena resistencia a este medio.

4.2.3 Requerimientos electroquímicos

Desde el punto de vista electroquímico, uno de los requisitos del diseño es la capacidad del sistema de mantener aislamiento eléctrico respecto del resto de la

traza de cañería. Si bien los electrodos no estarán en contacto directo con el cuerpo del dispositivo, dicho aislamiento podría ser útil para evitar interferencias en las mediciones y garantizar que las señales obtenidas correspondan exclusivamente al sistema bajo análisis.

Adicionalmente, se contempla la posibilidad de utilizar el cuerpo del anillo como electrodo auxiliar en procesos de limpieza catódica. Esta estrategia consiste en aplicar un potencial negativo al sensor *WE* (electrodo de trabajo), generando evolución de hidrógeno sobre su superficie. Simultáneamente, se aplica un potencial positivo al anillo, que actúa como contraelectrodo. El desprendimiento de burbujas de H_2 en el sensor puede facilitar la remoción de crudo adherido, mejorando la calidad de la medición sin necesidad de intervención mecánica.

Este enfoque requiere que el diseño permita la conexión eléctrica controlada del anillo, sin comprometer la integridad estructural ni el aislamiento del resto del sistema.

Para esto se propone utilizar juntas dieléctricas ya que este tipo de juntas aíslan eléctricamente las piezas bridadas. En la Figura 4.4, se muestra un esquema de este tipo de sistemas de aislamiento:

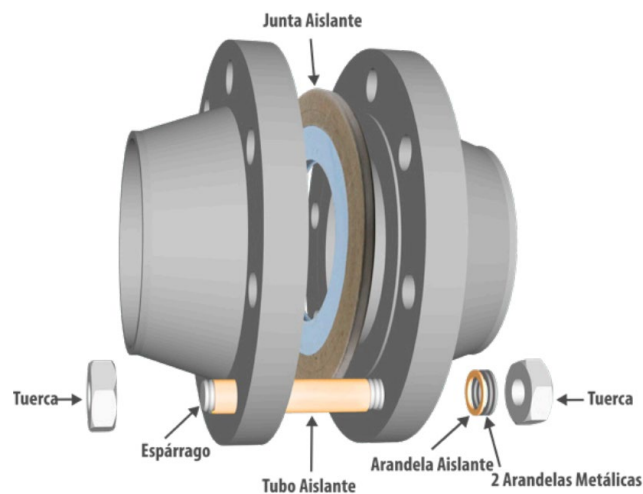


Figura 4.4 Conjunto de unión bridada con sistema de junta dieléctrica. El conjunto incluye, además de la junta, arandelas y tubos aislantes. Tomado de [26].

Este tipo de juntas permite, además, montar bridas tipo *Ring Type Joint (RTJ)* junto a bridas *Raised Face (RF)* aportando flexibilidad al diseño, ya que permite montar el dispositivo en cualquiera de estas configuraciones de cañerías.

Podemos ver en la Tabla 4-2 los principales datos técnicos (proveídos por el fabricante) de este tipo de juntas.

Bridas Tipo/Clase:	RF y RTJ ASME 150-2.500# y API 6A 2-10K
Resistencia eléctrica:	> 100 MΩ (1.500 Vcc)
Rigidez dieléctrica:	5 kV (60 Hz Vca por 1 minuto)
Absorción de agua:	< 0,1 %
Límite de aplastamiento:	350 MPa (50.000 psi)
Temperatura máxima:	260 °C (500 °F)

Tabla 4-2 Datos técnicos junta dieléctrica de referencia. Tomados de [26].

De estos datos, toma especial relevancia para el cálculo mecánico la verificación del límite máximo de presión en el sistema de sellado que estará limitado por la flexión de la brida, el aplastamiento de la junta o la fluencia de los espárragos.

4.2.4 Requerimientos mecánicos

El diseño del dispositivo debe garantizar la integridad estructural frente a las sollicitaciones mecánicas propias del entorno operativo. Además de la presión interna del fluido, se debe considerar la presión de sellado ejercida por las bridas, dado que el dispositivo se instala como una placa intermedia entre estas.

La presión de sellado de las bridas será establecida como la máxima admisible por los elementos de la unión bridada.

Para asegurar la estanqueidad en los elementos que atraviesan el límite de presión (en los puertos de acceso a sensores), se establece como criterio de diseño que la presión de contacto en las superficies de sellado sea al menos el doble de la presión máxima de operación. Este enfoque permite compensar posibles imperfecciones geométricas, deformaciones locales y variaciones que puedan comprometer el sellado. Para realizar esta verificación se plantean distintas condiciones de sellado, y se busca lograr esta relación en régimen, es decir, con el dispositivo operando a presión y temperatura de diseño.

Asimismo, se contempla que las cargas inducidas por la compresión del elastómero en el sistema de sellado serán transmitidas al cuerpo del dispositivo.

Todos los requerimientos mecánicos específicos serán abordados en detalle en el capítulo de análisis por elementos finitos, donde se presentan las condiciones de carga, restricciones, contactos y los resultados en contraste con los criterios de aceptación según el código ASME VIII Div. 2 Parte 5.

4.3 Selección de materiales

Basado en el concepto de diseño propuesto, se prevé la utilización de dos tipos de materiales con funciones diferenciadas: uno para conformar el límite de presión del dispositivo, y otro para el sistema de sellado elastomérico.

Para la elección del material metálico que constituye el límite de presión, se analizaron las propiedades y composiciones según especificaciones de

materiales equivalentes, complementadas con la susceptibilidad a los mecanismos de daño propios del ambiente y su costo.

En paralelo, se definió un material para el sello elastomérico, cuya función principal es asegurar la estanqueidad en los puertos de acceso a sensores. La elección de este material se basó en su compatibilidad química con los fluidos de proceso, su capacidad de deformación controlada bajo compresión, su resistencia térmica y su costo.

4.3.1 Material para el límite de presión

Con el objetivo de diseñar un dispositivo de espesores reducidos, capaz de soportar elevadas tensiones en un entorno químicamente agresivo, se evaluaron distintas alternativas de materiales que ofrecieran un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, comportamiento frente a la corrosión y disponibilidad industrial.

Uno de los parámetros a evaluados es el *PREN* del inglés *pitting resistance equivalent number* o número equivalente de resistencia al picado. El *PREN* es un parámetro de la aleación que relaciona el contenido de aleantes con la resistencia relativa al picado y a la corrosión por rendijas. En general, a mayor *PREN* mayor es la resistencia a estos mecanismos.

Si bien fue pensado para poder comparar aceros inoxidable y aleaciones de níquel, en esta tesis se presenta el *PREN* del acero de baja aleación a fin de contrastar con las demás aleaciones.

Cabe aclarar que el *PREN* solo contempla el efecto de los aleantes y no el de los microconstituyentes que puedan tener efectos negativos. [27]

$$PREN = \%Cr + 3,3 \%Mo + 16 \%N \quad \text{ec. 4.1}$$

Se consideraron cuatro materiales comúnmente utilizados en la industria de procesos. Su composición de aleantes relevantes para el *PREN* se especifica en la Tabla 4-3.

Material	Cromo %	Molibdeno %	Nitrógeno %
Acero de baja aleación - 4140 [28]	0,8	0,15	
Inoxidable austenítico - 317 [29]	18,0	3,0	
Aleación de níquel - 625 [30]	20,0	8,0	
Dúplex - 2205 [29]	22,0	3,0	0,14

Tabla 4-3 Composición mínima de aleantes que afectan al *PREN* según especificaciones [30] [28] [30].

A continuación, se consolidan características halladas en la bibliografía [5] [31] [32] [33] [34]:

a) *Aceros de baja aleación (SAE 4140)*

- Ventajas: alta resistencia mecánica, bajo costo, amplia disponibilidad y compatibilidad con estándares industriales.
- Desventajas: baja resistencia a la corrosión, elevada susceptibilidad a fisuración por sulfuros (SSC), picado y corrosión bajo depósitos.

b) *Inoxidables Austeníticos (tipo 316/317)*

- Ventajas: buena resistencia a la corrosión generalizada, precio moderado frente a aleaciones de níquel.
- Desventajas: resistencia mecánica limitada, susceptibilidad a la fisuración por cloruros (Cl-SSC), picado y corrosión por rendijas. La adición de molibdeno mejora el número equivalente de resistencia al picado (PREN), pero no elimina completamente los riesgos en ambientes severos.

c) *Aleaciones de Níquel (Inconel 625)*

- Ventajas: excelente resistencia a la corrosión, inmunidad frente a Cl-SSC y SSC, alto PREN, buena resistencia mecánica.
- Desventajas: costo significativamente elevado.

d) *Aleaciones Dúplex (tipo 2205)*

- Ventajas: alta resistencia mecánica, buena resistencia a la corrosión generalizada, elevado PREN, precio competitivo respecto a inoxidables tipo 316.
- Desventajas: susceptibilidad moderada a Cl-SSC y SSC en zonas de alta deformación plástica.

Resumiendo las características de cada material propuesto en la Tabla 4-4.

Material	YS [32] (MPa)	PREN	Cl-SSC	SSC	USD/kg*
4140	415	1	Inmune	Mala	0,5-1,0
317	205	28	Regular	Inmune	1,0-2,5
Alloy 625	414	46	Inmune	Inmune	18,0-22,0
2205	450	34	Buena	Buena	2,0-3,5

Tabla 4-4 Comparación semicuantitativa de los materiales evaluados. PREN calculado según mínimo de especificación. *Los precios de referencia fueron obtenidos de proveedores online para productos semielaborados de características similares.

Considerando el entorno operativo del dispositivo, que incluye presiones de hasta 100 kg/cm², temperaturas del orden de 100 °C y presencia de contaminantes agresivos como CO₂, H₂S y cloruros, se seleccionó la aleación dúplex tipo 2205 como material óptimo para el límite de presión. Esta elección permite cumplir con los requisitos mecánicos y de resistencia a la corrosión, manteniendo una viabilidad económica y técnica para su implementación industrial.

La especificación de material para el diseño será SA-182 F60 2205. A su vez, se especifica tratamiento térmico de la pieza luego de finalizado su conformado y

soldado de componentes de manera de eliminar tensiones residuales que puedan favorecer la aparición de mecanismos de fisuración bajo tensiones.

Si bien el tamaño de la pieza es relativamente reducido y el impacto económico del material podría parecer menor, se optó por trabajar con una alternativa más equilibrada en términos de costo y desempeño. Esto responde a una lógica de diseño orientada a facilitar su adopción en entornos industriales reales, donde los procesos de adquisición suelen estar condicionados por criterios económicos. En este sentido, aunque la aleación *Alloy 625* presenta propiedades superiores en cuanto a resistencia a la corrosión y similares en comportamiento mecánico, su elevado costo podría limitar su competitividad. No obstante, se reconoce que sus características lo convierten en un candidato relevante para futuras evaluaciones, especialmente en aplicaciones críticas o ambientes aún más agresivos.

4.3.2 Material para el sello

En este apartado se analizan las alternativas disponibles en la industria para aplicaciones de sellado en ambientes agresivos, considerando factores como la compatibilidad química, la resistencia térmica, la capacidad de deformación y la estabilidad dimensional. El objetivo es identificar un elastómero que ofrezca un equilibrio adecuado entre desempeño técnico y viabilidad industrial, asegurando que el sistema de sellado cumpla con los requerimientos de presión, temperatura y exposición química definidos en el capítulo anterior.

Las propiedades y características de los elastómeros en estudio fueron tomados de [35].

La selección del elastómero más adecuado es una tarea relativamente compleja. Se analizaron los elastómeros más utilizados en la industria del Oil & Gas, estos son los indicados en la Tabla 4-5.

Elastómero	Abreviación	Nombres comerciales
Caucho de acrilonitrilo butadieno	NBR	KRYNAC®, Nipol®
Caucho de acrilonitrilo butadieno hidrogenado	HNBR	Elasto-Lion®
Fluoroelastómeros	FKM	Viton®, Fluorel®, Daiel®, Tecnoflon®
Elastómeros perfluorados	FFKM	Kalrez®, Tecnoflon®, Chemraz®
Copolímeros de propileno y tetrafluoroetileno	FEPM	Alfas®, Viton® Extreme™

Tabla 4-5 Nombres y referencias comerciales de algunos de los elastómeros más utilizados en la industria del O&G. [35][36]

A continuación, se describen sus principales características:

El **FKM (fluoroelastómero)** se caracteriza por su excelente resistencia química frente a hidrocarburos, aceites y compuestos aromáticos. Su rango de operación térmica se extiende hasta los 204 °C, con tolerancia a bajas temperaturas entre -30 °C y -8 °C. Sin embargo, presenta limitaciones frente a medios fuertemente cáusticos, aminas ligeras y compuestos oxigenados como el metanol. Es más adecuado para temperaturas superiores a 150 °C, pero menos adecuado en condiciones de gas ácido, presencia de inhibidores de corrosión de alto pH, y tratamientos ácidos si está curado con bisfenol. La compresión permanente está entre 12 y 40% a máxima temperatura de operación continua (ensayo de 70 h).

El **FEPM (copolímero de propileno y tetrafluoroetileno)** ofrece una destacada resistencia a ácidos y bases fuertes, vapor y aminas. Puede operar hasta 230 °C, e incluso hasta 260 °C en presencia de vapor, con un límite inferior de temperatura entre -12 °C y -3.6 °C. Es más adecuado para temperaturas superiores a 150 °C y en presencia de inhibidores de corrosión de alto pH, tratamientos ácidos y condiciones de gas ácido. Sin embargo, es menos adecuado para temperaturas superiores a 280 °C, exposición a solventes carbonílicos ligeros y temperaturas bajo cero. La compresión permanente está entre 35 y 40% a máxima temperatura de operación continua (ensayo de 70 hr.).

El **FFKM (elastómero perfluorado)** ofrece el mayor rango térmico entre los materiales evaluados, soportando temperaturas entre 220 °C y 327 °C. Su resistencia química es superior, siendo compatible con alcoholes, cetonas, ácidos minerales y bases. Es el más adecuado para temperaturas superiores a 280 °C (especialmente si está curado con triazina), y también se desempeña bien en condiciones de gas ácido, tratamientos ácidos y exposición a solventes aromáticos y carbonílicos. No obstante, es menos adecuado para temperaturas bajo cero y puede presentar limitaciones frente al agua caliente y ciertas aminas. La compresión permanente esta entre 14 y 29% a máxima temperatura de operación continua (ensayo de 70 h).

El **NBR (caucho de acrilonitrilo butadieno)** presenta un desempeño térmico más limitado, operando hasta 100 °C y tolerando temperaturas mínimas entre -50 °C y -35 °C. Es más adecuado para temperaturas bajo cero, pero menos adecuado para temperaturas superiores a 100 °C, presencia de inhibidores de corrosión de alto pH, tratamientos ácidos, condiciones de gas ácido, y exposición a solventes aromáticos y carbonílicos. La compresión permanente esta entre 2 y 20% a máxima temperatura de operación continua (ensayo de 70 h).

El **HNBR (caucho de acrilonitrilo butadieno hidrogenado)** es similar al NBR, pero con mejor resistencia térmica (hasta 150 °C). También es compatible con aceites alifáticos y alcoholes. Es más adecuado para temperaturas superiores a 100 °C,

tratamientos ácidos y temperaturas bajo cero. Sin embargo, es menos adecuado para temperaturas superiores a 150 °C, condiciones de gas ácido, y exposición a solventes aromáticos y carbonílicos. La compresión permanente es de un 20% a máxima temperatura de operación continua (ensayo de 70 h).

En la Tabla 4-6 se resumen y califican algunas de las características consideradas a fin de facilitar su comparación.

	Resistencia química	Máxima temperatura	Costo	Módulo de compresión
FKM	Muy buena	204	Medio	Intermedio
FEPM	Muy buena	230	Medio	Mayor
FFKM	Excelente	327	Muy Alto	Menor
NBR	Buena	100	Bajo	Intermedio
HNBR	Buena	150	Medio	Intermedio

Tabla 4-6 Comparación semicuantitativa de distintos elastómeros utilizados en la industria del O&G.

En función de este muy breve análisis técnico y económico y basado en la alta experiencia de la industria con el mismo, se seleccionó el fluoroelastómero FKM-90 (dureza 90 Shore A) como material adecuado para el sistema de sellado. Esta variante ofrece una adecuada resistencia química frente a hidrocarburos, buena estabilidad térmica hasta 204 °C, y un módulo de compresión y dureza que permiten mantener la forma bajo presión sin extrusión. Su disponibilidad comercial y compatibilidad con los fluidos típicos del proceso lo convierten en una opción equilibrada para aplicaciones industriales exigentes. No obstante, se realizará una comprobación con HNBR-90 que se plantea como un candidato más económico y en caso de ser necesario se podrán realizar con el mismo modelo simulaciones futuras con los materiales FFKM, FEPM, etc.

4.4 Integración de dispositivos de medición

Para lograr la integración efectiva de los dispositivos de medición, es necesario que el diseño base del anillo —concebido para ser instalado entre bridas existentes— incorpore todos los sensores y elementos requeridos para la aplicación de las técnicas electroquímicas seleccionadas.

En esta tesis se ha definido que la técnica principal para evaluar tanto la velocidad de corrosión como la proporción de fases del fluido y la presencia de emulsiones es la espectroscopía de impedancia electroquímica (*EIS*). Esta elección condiciona el diseño, ya que exige prever una cantidad mínima de puertos que permitan la instalación de los electrodos necesarios para cada medición.

Como se detalló en el capítulo 2, la configuración típica para monitoreo de corrosión mediante *EIS* requiere tres electrodos: el electrodo de trabajo (*WE*), el electrodo de referencia (*RE*) y el contraelectrodo (*CE*). Para la medición de la

proporción de fases (% corte de agua) y la presencia de emulsiones, se necesitan al menos dos electrodos, que pueden ser el *WE* y el *CE* ya utilizados en la medición de corrosión, o bien incluir un cuarto electrodo específico — denominado electrodo de flujo (*FE*)— que permita cerrar el circuito entre el *CE* y el *FE*, optimizando la caracterización de las emulsiones presentes en el fluido.

A su vez, se ideó el sistema de montaje para facilitar el montaje tipo *flush* de los elementos sensores, evitando así interferencias con el flujo y logrando una lectura en condiciones similares a las paredes de las cañerías.

4.4.1 Material de los electrodos

A continuación, se presentan las consideraciones realizadas para la selección del material de los electrodos. Este análisis deberá profundizarse en etapas posteriores mediante pruebas experimentales que validen su aptitud, especialmente en el caso del electrodo de referencia, que representa el mayor desafío en este tipo de sistemas.

4.4.1.1 Material del electrodo de referencia (RE)

La función principal del electrodo de referencia es mantener un potencial estable durante el tiempo en que se realiza la medición de EIS.

Teniendo en cuenta que el potencial de corrosión (E_{corr}) del *WE* no será utilizado para evaluar la *VC* o para caracterizar el fluido, se prioriza la sencillez y practicidad del electrodo de referencia (*RE*). Para la configuración de electrodos que se propone en esta plataforma sería muy complejo utilizar electrodos convencionales como Calomel saturado (*SCE*) o Cu/CuSO_4 .

En los últimos años se han desarrollado electrodos denominados pseudo-referencia, cuyo potencial puede variar, pero se mantiene aproximadamente estable bajo ciertas condiciones.

Entre estos se destacan los electrodos de *MMO* (óxidos metálicos mixtos), como el electrodo de Ti/TiO recubierto con óxidos basados en iridio. Este tipo de electrodos es sensible a variaciones de pH [37] pero poco dependiente de la presión parcial de oxígeno en medios acuosos [38]. En el ambiente de producción el pH suele permanecer cercano a la neutralidad.

Otra alternativa es el electrodo de platino o titanio platinizado [39], cuya estabilidad depende principalmente del contenido de oxígeno y del pH del medio [38].

Por el contrario, se descarta el uso de electrodos de pseudo referencia tipo Ag/AgCl debido a su dependencia con la concentración de cloruros [37], los que podrían presentar variaciones más significativas en las corrientes de producción.

4.4.1.2 Material del electrodo de trabajo (WE)

Este electrodo debe ser del mismo material que la metalurgia a evaluar, generalmente aceros al carbono. En sistemas donde se desee evaluar la respuesta de aleaciones alternativas que presenten mayor resistencia a la corrosión (CRA), el WE puede fabricarse de aceros inoxidables martensíticos, austeníticos o dúplex. La selección final quedará a criterio del ingeniero en corrosión responsable del proyecto.

4.4.1.3 Material del contraelectrodo (CE)

En celdas de laboratorio se utilizan metales nobles que no participen en la reacción de corrosión. Sin embargo, en condiciones reales puede aprovecharse la superficie del anillo de la plataforma como contraelectrodo, fabricado en acero inoxidable dúplex 2205.

4.4.1.4 Material del electrodo de flujo (FE)

Este electrodo debe presentar una mínima interacción con el medio, al igual que el contraelectrodo. Si bien es habitual utilizar platino [19], cobre [20] o titanio [40]. Se considera viable emplear el mismo material del anillo para simplificar el diseño y reducir costos. Esto deberá evaluarse en profundidad durante las pruebas del dispositivo.

4.4.2 Configuración de electrodos para cada medición

La disposición de los electrodos dependerá tanto de la técnica electroquímica empleada como de la posición que el ingeniero en corrosión considere más representativa para el sistema. A continuación, se presenta una configuración recomendada para un esquema mixto con junta dieléctrica, diseñado para medir mediante EIS la velocidad de corrosión y, simultáneamente, la proporción de fases agua/petróleo o petróleo/agua.

Esta configuración consiste en ubicar el electrodo de trabajo (WE) en la zona inferior y, en sentido opuesto, colocar el electrodo de flujo (FE). Ambos electrodos se utilizarán para medir la proporción de fases entre las posiciones de las 12 y las 6 horas. En los puertos laterales se instalará el electrodo de referencia (RE), mientras que el puerto restante podrá destinarse al contraelectrodo (CE), siempre que la brida no esté aislada mediante juntas dieléctricas. En caso contrario, este puerto puede emplearse para instalar un segundo electrodo de trabajo, permitiendo mediciones adicionales en otro punto.

Como alternativa, dicho puerto puede alojar un cupón tipo *flush* o una sonda ER, lo que posibilita contrastar los resultados obtenidos por EIS con un método no electroquímico, aportando redundancia y validación cruzada (Figura 4.5).

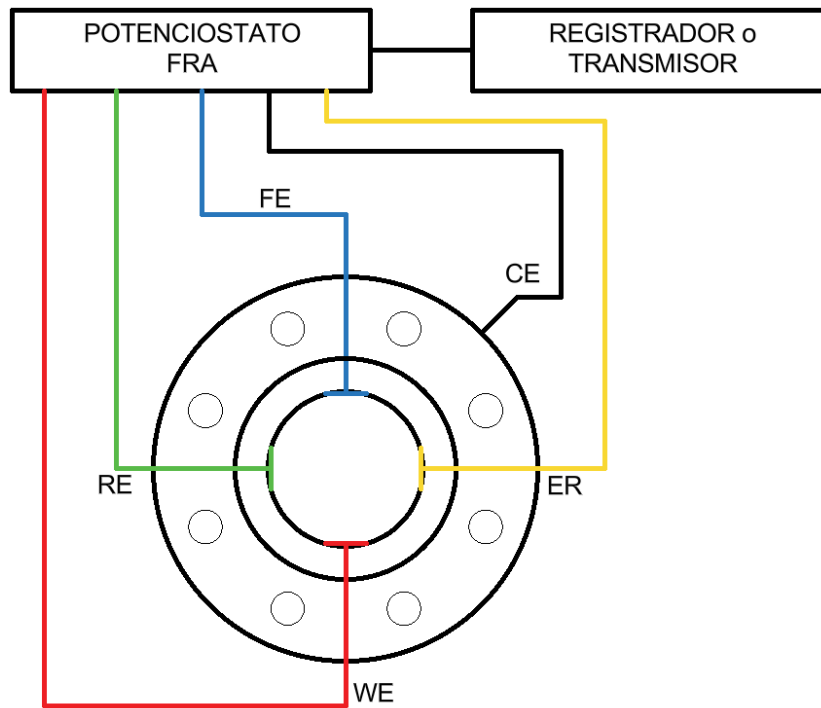


Figura 4.5 Configuración mixta con junta dieléctrica. CE contraelectrodo (negro), FE electrodo de flujo (azul), WE, electrodo de trabajo (rojo), ER sonda de resistencia eléctrica (amarillo).

También puede considerarse una configuración que permita monitorear la velocidad de corrosión en tres posiciones distintas de la cañería (Figura 4.6), lo que mejora la representatividad espacial de las mediciones.

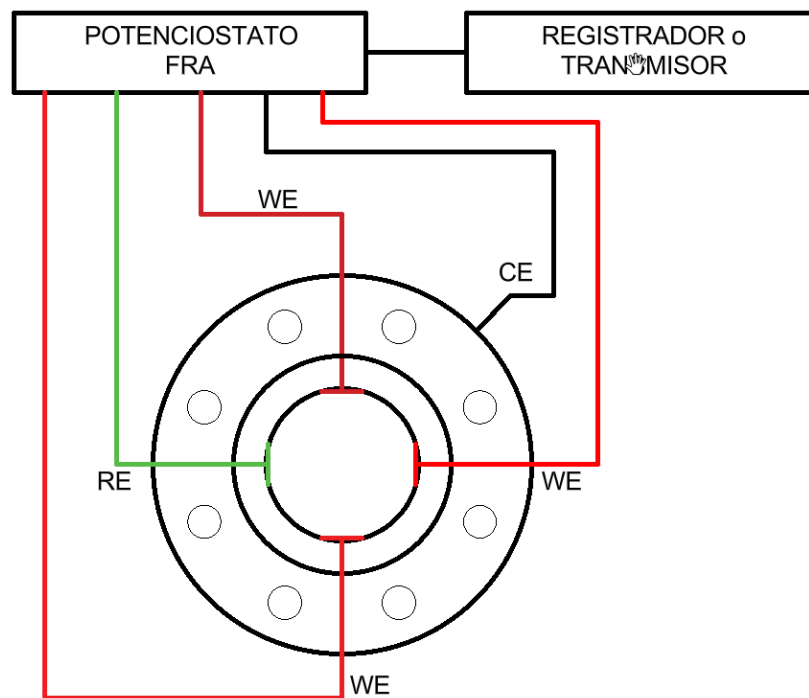


Figura 4.6 Configuración para medir velocidad de corrosión a 3 alturas distintas. WE electrodo de trabajo (rojo), RE electrodo de referencia (verde).

De igual manera, el sistema puede adaptarse para caracterizar propiedades del flujo a lo largo de dos ejes principales (vertical y horizontal), tal como se muestra en la Figura 4.7, lo que contribuye a una descripción más completa del comportamiento del fluido.

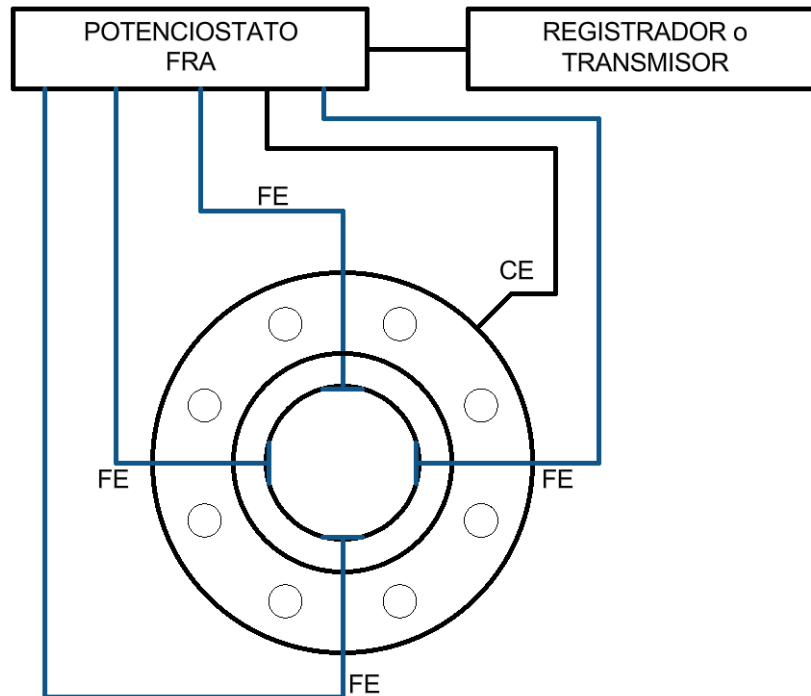


Figura 4.7 Disposición para medir características del flujo a lo largo de dos ejes principales. FE electrodos de flujo (azul).

Finalmente, en todos los casos en que el dispositivo se encuentre aislado eléctricamente del resto de la cañería, podrá utilizarse como contraelectrodo auxiliar para procesos de limpieza mediante evolución de hidrógeno, técnica que se describe en la próxima sección.

Cabe destacar que se pueden implementar múltiples configuraciones en función de la o las técnicas a emplear. Para ello, será necesario montar los distintos tipos de electrodos en varillas porta-sensores como las definidas en esta tesis y seleccionar los puertos adecuados para cada aplicación.

4.4.3 Material de la varilla y el relleno

Debido a la exposición al medio y alta resistencia, el material externo de la varilla debe ser un material resistente al igual que resto del dispositivo, por esto se selecciona un caño de acero dúplex tipo 2205.

En el interior necesitamos un material aislante eléctrico y capaz de soportar las condiciones del medio además de posibilitar la inserción de los elementos.

La práctica habitual es rellenar la varilla con resina epoxi, deberá evaluarse la compatibilidad de la resina empleada con el material de los elementos embebidos en esta y el medio.

4.5 Accesibilidad y mantenimiento

Desde una perspectiva integral, el diseño de la plataforma de monitoreo se concibió para ser instalada en sistemas preexistentes, específicamente en uniones bridadas ya operativas. Idealmente, su ubicación se plantea aguas abajo del primer regulador de presión posterior al *choke* (orificio regulador de presión) del cabezal, aprovechando la flexibilidad de la cañería para facilitar la incorporación del dispositivo sin necesidad de modificaciones estructurales significativas.

Este enfoque se inspira en la práctica común de instalación de anillos de drenaje (*bleed rings*), los cuales suelen colocarse una vez finalizada la instalación de la línea, utilizando la elasticidad del sistema para su montaje. No obstante, para garantizar una correcta implementación, los ingenieros de integridad deben evaluar cuidadosamente el punto óptimo de instalación, evitando desviaciones entre las caras de las bridas que puedan comprometer el sellado o generar esfuerzos adicionales en el conjunto, conforme a lo establecido por la práctica recomendada ASME PCC-1.

En cuanto al mantenimiento, se reconoce que los sensores pueden requerir limpieza, reemplazo o recalibración durante la vida útil del dispositivo. Para facilitar estas tareas sin interrumpir el servicio, el diseño incorpora puertos retráctiles que permiten la inserción y extracción de sondas de forma segura y eficiente. Esta configuración modular posibilita la adaptación del sistema a distintas técnicas de medición, tanto electroquímicas como no electroquímicas (por ejemplo, cupones o sondas de resistencia eléctrica).

La configuración para que el dispositivo retráctil pueda operar en servicio depende del montaje de un sistema de válvulas que permita aislar la cañería en un paso intermedio antes de retirar la varilla porta sensores (Figura 4.8). En esta configuración, se monta una válvula esclusa que permite aislar al retirar o insertar la varilla porta sensores (esclusa de inserción) y otra que permite drenar el fluido almacenado entre esclusa y sello de la varilla antes de su extracción final (esclusa de drenaje).

El procedimiento de inserción consta de los siguientes pasos:

1. Verificar que ambas esclusas se encuentren cerradas.
2. Introducir varilla en dispositivo de sellado.
3. Ajustar parcialmente el sello de la varilla de manera que permita su deslizamiento, pero a la vez selle parcialmente la superficie.

4. Asegurar cadena de seguridad.
5. Abrir esclusa de inserción.
6. Insertar la varilla hasta su posición.
7. Asegurar y sellar la varilla.

Para la extracción de la varilla el procedimiento es el siguiente:

1. Verificar que la esclusa de drenaje se encuentre cerrada.
2. Aflojar sujeción de la varilla lentamente hasta que la misma pueda deslizarse.
3. Llevar la varilla hasta que la punta de esta haya pasado el espejo de la esclusa de inserción.
4. Cerrar la esclusa de inserción.
5. Abrir la esclusa de drenaje y purgar en un lugar seguro.
6. Cerrar esclusa de drenaje.
7. Aflojar y retirar varilla.
8. En caso de no volver a colocar una varilla, remplazar tapón de sujeción por tapón estándar.

Este par de válvulas y niples no será analizado debido a que son componentes estándares en la industria. Se realizará el análisis del dispositivo de sellado y sujeción soldado directamente en la brida, dado que las características del tramo soldado y las cargas serán similares y se asume que con verificar esta configuración se verifican ambas.

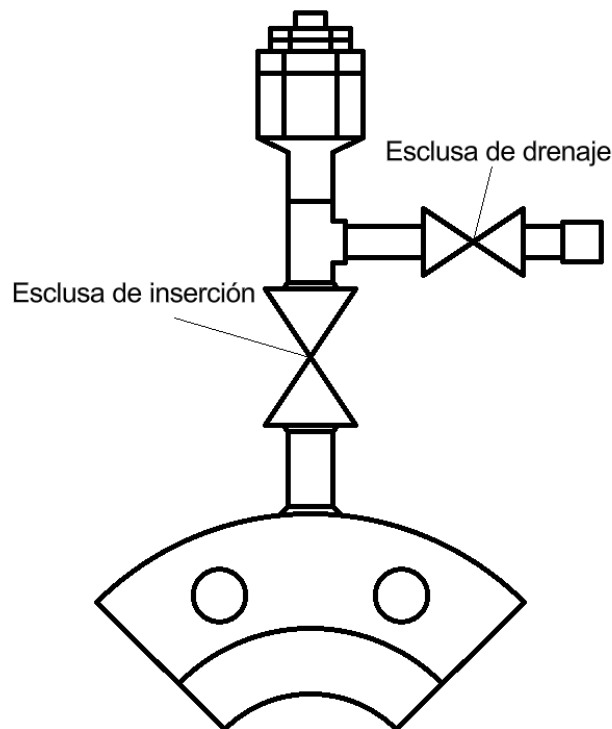


Figura 4.8 Esquema simplificado de configuración retráctil.

Adicionalmente, se contempla la implementación de un sistema de limpieza *in situ* mediante evolución de hidrógeno. Esta técnica consiste en aplicar un potencial catódico al electrodo de trabajo (*WE*), generando burbujas de H₂ sobre su superficie, lo que facilita la remoción de crudo adherido y mejora la calidad de las mediciones. Este mismo procedimiento puede aplicarse al electrodo de flujo (*FE*), contribuyendo al mantenimiento preventivo sin necesidad de intervención mecánica.

En conjunto, estas estrategias aseguran que la plataforma sea accesible, versátil y de bajo requerimiento de mantenimiento, alineándose con los objetivos de operación continua y confiabilidad en entornos industriales exigentes.

4.6 Geometría y configuración de la plataforma

La definición de las características geométricas de la plataforma se basó en estándares industriales ampliamente aceptados, con el objetivo de asegurar la intercambiabilidad de componentes y la compatibilidad con sistemas existentes. En particular, se adoptaron los criterios establecidos por la norma ASME B16.5 para el diseño de bridas, garantizando una correcta adaptación a las conexiones bridadas típicas en líneas de producción.

Asimismo, se evaluaron las condiciones de sellado conforme a las recomendaciones de ASME PCC-1 y el WRC *Bulletin* 538, con el fin de asegurar la integridad del conjunto bridado.

En cuanto a los accesorios necesarios para la inserción del dispositivo retráctil en servicio, se consideró que muchos de ellos —como válvulas, nipples y elementos de conexión— ya se encuentran estandarizados en la industria. Por esta razón, no fueron modelados explícitamente en el análisis mecánico, aunque su integración fue contemplada en el diseño conceptual.

Para los elementos roscados, incluyendo cabezas de tuercas, contratueras y otros componentes de fijación, se siguieron los lineamientos de la norma ASME B18.2.2, lo que permite asegurar la compatibilidad dimensional con los elementos comerciales disponibles.

4.7 Criterios de diseño según ASME

La Parte 5 del código ASME VIII-2, denominada “Diseño por análisis”, establece métodos avanzados de análisis estructural que pueden utilizarse como alternativa al diseño basado en reglas prescriptivas. Este enfoque resulta especialmente útil para componentes sometidos a condiciones de carga complejas o geometrías no convencionales [41]. A lo largo de la sección 4.7, se presentan los lineamientos específicos de dicha parte del código de diseño utilizados para dar sustento práctico a los resultados del análisis realizado.

Los requerimientos de diseño por análisis están organizados en función de la protección contra distintos modos de falla. El componente o pieza en evaluación debe cumplir al menos uno de los criterios de aceptación establecidos para cada modo de falla, los cuales incluyen:

- a) Protección contra colapso plástico.
- b) Protección contra falla local.
- c) Protección contra colapso por pandeo.
- d) Protección contra falla por cargas cíclicas.

Todas las reglas de esta sección del código ASME se basan en resultados obtenidos mediante análisis tensional del componente. Además, deben considerarse todas las cargas relevantes, aplicando los casos de carga definidos por el código.

Dado el tipo de componente evaluado en este trabajo, no se realizarán las verificaciones correspondientes a los puntos c) y d) mencionados anteriormente.

4.7.1 Protección contra colapso Plástico

Existen tres metodologías para verificar este modo de falla:

Análisis de tensiones elástico: en este método se calculan las tensiones utilizando un análisis elástico, linealizando y clasificando las tensiones en categorías y comparando estos resultados con valores admisibles previamente establecidos de manera que no ocurra el colapso plástico.

Análisis de carga límite: en este método se determina la carga mínima que provocaría el colapso de un componente. La carga admisible se establece aplicando factores de diseño a dicha carga límite, asegurando que no ocurra el colapso plástico.

Análisis elasto-plástico: en este método se obtiene una carga de colapso considerando la carga aplicada como las características de deformación del componente. La carga admisible del componente se establece aplicando factores de diseño a la carga de colapso plástico.

Debido a la complejidad geométrica del componente evaluado en este proyecto, la categorización de tensiones requerida para el método elástico resulta particularmente difícil. Por esta razón, y conforme a las recomendaciones del código ASME, se opta por utilizar los métodos de carga límite o análisis elasto-plástico, siendo este último el seleccionado para la verificación estructural.

4.7.1.1 Método de análisis tensional elasto-plástico

El método de análisis elasto-plástico proporciona una evaluación más precisa de la protección contra el colapso plástico de un componente en comparación con

los otros enfoques, ya que permite representar de forma más realista el comportamiento estructural. Este método considera explícitamente la redistribución de tensiones que ocurre como consecuencia de la deformación plástica, así como las características específicas de deformación del componente.

Análisis numérico

La carga de colapso plástico se define como aquella que genera inestabilidad estructural general. En la práctica, este valor puede estimarse mediante análisis numéricos, como el Método de Elementos Finitos (*FEM*), incorporando un modelo de material elasto-plástico. Es fundamental considerar también los efectos de no linealidad geométrica. La carga de colapso se identifica como la máxima carga que puede aplicarse antes de que el modelo pierda convergencia, lo cual indica el inicio de la inestabilidad estructural.

Criterios de aceptación

Para que un componente sea considerado aceptable bajo este método, deben cumplirse los siguientes tres criterios:

1. Criterio Global

Se determina la carga máxima antes del colapso estructural general mediante un análisis elástico-plástico. Alternativamente, se puede usar el método de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (*LRFD*), que considera incertidumbres mediante factores de carga y resistencia.

De la combinación de cargas y casos de cargas posibles se establece que la situación más desfavorable es la que surge de multiplicar el factor de carga β que para materiales clase 2 como el contemplado en esta tesis toma el valor de 2,4.

2. Criterio de prueba

Este criterio evalúa el comportamiento del componente bajo condiciones de prueba, típicamente mediante prueba hidráulica, que es la más común en la industria. Para este caso, el factor de carga aplicable es $\beta_T=0,95$. No obstante, en este proyecto, las condiciones de carga general (con $\beta = 2,4$) resultan más exigentes que las de prueba, por lo que se considera suficiente la verificación bajo el criterio global.

3. Criterio de Servicio

Se deben cumplir requisitos que aseguren un desempeño adecuado bajo las cargas de diseño. Esto incluye:

- Límites en la rotación de bridas para evitar fugas.

- Límites en la deflexión de estructuras como torres.
- Evaluación de cómo la deformación afecta el funcionamiento, especialmente en componentes que se endurecen con la carga (como cabezales elípticos o torisféricos).
- Posibles ajustes en las cargas de diseño si la deformación es excesiva.

También se deben considerar efectos como:

- Conexiones de tuberías.
- Desalineación de bandejas o plataformas.
- Interferencias con estructuras o equipos cercanos.

En el presente trabajo, el criterio de servicio adoptado corresponde a la deformación de las caras de las bridas, con el objetivo de asegurar el sellado conforme a lo establecido en el Anexo D de la norma ASME PCC-1. Según esta práctica recomendada, la variación de planitud circunferencial y radial debe ser menor a 0,25 mm.

4.7.1.2 Procedimiento de Evaluación Elasto-Plástica

Este procedimiento se utiliza para evaluar la aceptabilidad de un componente mediante análisis de tensiones elasto-plásticas. Consta de los siguientes pasos:

1. **Modelado numérico del componente:** se debe crear un modelo que represente con precisión la geometría, las condiciones de frontera y las cargas aplicadas. Es necesario refinar el modelo en zonas con concentraciones de tensión y deformación. Puede requerirse más de un modelo para obtener una descripción precisa del comportamiento del componente.
2. **Definición de cargas y casos de carga:** se deben identificar todas las cargas relevantes para el diseño, incluyendo presión interna, cargas térmicas, fuerzas externas, y cualquier condición operativa que pueda influir en el comportamiento del componente.
3. **Modelo de material elasto-plástico:** el análisis debe usar un modelo de material elasto-plástico, preferentemente utilizando el criterio de fluencia de Von Mises. Se pueden emplear modelos con endurecimiento, ablandamiento o comportamiento elasto-perfectamente plástico. También deben considerarse los efectos de geometría no lineal.
4. **Combinación de casos de carga:** se deben establecer combinaciones de casos de carga y evaluar cada caso indicado, incluyendo situaciones donde ciertas cargas no actúan, y considerar casos especiales adicionales si corresponde.

5. **Análisis elasto-plástico:** se realiza el análisis para cada caso de carga definido. Si el modelo logra convergencia, se considera que el componente es estructuralmente estable bajo esas condiciones. En caso contrario, se deben realizar ajustes en la configuración del diseño, como modificar el espesor de las paredes, cambiar el material, o reducir las cargas aplicadas, y repetir el análisis hasta alcanzar una solución aceptable.

4.7.2 Protección Contra Falla Local

Además de demostrar la protección contra el colapso plástico según lo definido en la sección 4.7.1, es necesario verificar el cumplimiento del criterio de falla local, el cual evalúa la capacidad del componente para resistir deformaciones en zonas específicas bajo condiciones de carga.

4.7.2.1 Análisis elasto-plástico – Límite de deformación local

El siguiente procedimiento debe utilizarse para evaluar la protección contra falla local bajo una secuencia de cargas aplicadas:

Paso 1. Se debe realizar un análisis de tensiones elasto-plástico considerando las combinaciones de casos de carga relevantes para los criterios locales. Es fundamental incluir los efectos de la geometría no lineal en el modelo. En este trabajo, la verificación se realizó utilizando el mismo caso de carga que en el análisis general, lo cual representa una condición más conservadora, dado que el factor de carga aplicado en el análisis general es $\beta = 2,4$, mientras que para el caso local es $\beta = 1,7$.

Paso 2. Para cada punto del componente, se deben calcular las tensiones principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), la tensión equivalente (σ_e , también conocida como tensión de Von Mises), y la deformación plástica equivalente ε_{peq} .

La tensión equivalente se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0,5} \quad \text{ec. 4.2}$$

Paso 3. Determinar la deformación triaxial límite ε_L utilizando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{Lu} \exp \left[- \left(\frac{\alpha_{sl}}{1 + m_2} \right) \left(\left\{ \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_e} \right\} - \frac{1}{3} \right) \right] \quad \text{ec. 4.3}$$

Donde:

- ε_{Lu} : deformación uniaxial límite.
- α_{sl} : factor del material dependiente de la estructura cristalográfica.
- m_2 : coeficiente de endurecimiento por deformación [42].

Para el material utilizado en este proyecto (SA182 F60 2205), se adoptan los siguientes valores:

- $\varepsilon_{Lu} \approx 0,598$
- $\alpha_{sl} = 2,2$
- $m_2 \approx 0,246$

Paso 4. Determinar la deformación de conformado ε_{cf} , esta depende del tipo de material y del proceso de fabricación utilizado. En particular, si el componente es sometido a un tratamiento térmico posterior al conformado —como ocurre en este caso— se considera que las tensiones residuales generadas durante la fabricación son eliminadas. Por lo tanto, puede asumirse que la deformación de conformado es nula:

$$\varepsilon_{cf} = 0 \quad \text{ec. 4.4}$$

Esta condición aplica al componente evaluado, ya que, una vez finalizado el proceso de conformado y las operaciones de soldadura, la pieza debe ser sometida a un tratamiento térmico de alivio de tensiones, con el fin de disminuir la susceptibilidad a los mecanismos de fisuración bajo tensiones.

Paso 5. Verificar si se cumple el límite de deformación. El componente se considera aceptable para el caso de carga especificado si se cumple la siguiente condición en cada punto de integración:

$$\varepsilon_{peq} + \varepsilon_{cf} \leq \varepsilon_L \quad \text{ec. 4.5}$$

Dado que $\varepsilon_{cf} = 0$ la verificación práctica se realiza mediante la siguiente relación:

$$\frac{\varepsilon_{peq}}{\varepsilon_L} \leq 1 \quad \text{ec. 4.6}$$

Esta expresión se utiliza directamente en el post-procesado del análisis FEA para evaluar la aceptabilidad del componente bajo el criterio de falla local.

4.8 Modelos de materiales utilizados

El diseño estructural del dispositivo propuesto requiere una representación adecuada del comportamiento mecánico de los materiales involucrados, tanto metálicos como elastoméricos. Para ello, se seleccionaron modelos constitutivos que permiten simular las condiciones de operación, respetando las limitaciones del software de análisis, de la licencia disponible y los criterios establecidos por el código ASME VIII Div. 2 parte 5 donde sea necesario.

4.8.1 Modelo utilizado para el metal

El cuerpo del dispositivo, que conforma el límite de presión, estará fabricado en acero inoxidable dúplex SA-182 F60 2205. Para su modelado se adoptó un enfoque de endurecimiento isotrópico bilineal, el cual representa la curva tensión-deformación mediante dos tramos rectos: uno elástico, definido por el módulo de

Young, y otro plástico, caracterizado por el módulo tangente. Esta elección permite capturar el comportamiento elasto-plástico del material bajo cargas elevadas, tal como lo exige el método de verificación por análisis tensional elasto-plástico del código ASME.

Los parámetros utilizados fueron obtenidos de la Sección II Parte D del código ASME, y se complementaron con cálculos derivados para obtener la deformación real a fluencia, la deformación a rotura y el módulo tangente. Esta información se utilizó para construir la curva bilineal que representa el comportamiento del material en el software de simulación.

En la Tabla 4-7 se representan los datos del código ASME sección II parte D [32] y [29] para el SA-182 F60 2205 y los resultados de aplicar las ecuaciones que permiten obtener las propiedades del material para definir su modelo bilineal isotrópico.

Símbolo	Descripción	Ecuación	Valor	Unidad
YS	Tensión de fluencia		425	MPa
UTS	Tensión de rotura		655	MPa
A_r	Alargamiento a rotura		0,25	mm/mm
E_y	Módulo de elasticidad		194000	MPa
ε_{YS}	Def. tensión de fluencia		0,00219	
ε^{el}	Def. tensión de fluencia real		0,00218	
ε_{UTS}	Def. a la rotura real	$\ln(1+A_r)$	0,22314	
ε^{pl}	Rango de deformación plástica	$\epsilon_{UTS} - \epsilon^{el}$	0,22095	
σ₀	Tensión de fluencia real	$YS \cdot \exp[\ln(1 + \epsilon_{YS})]$	425,9	MPa
σ_y	Tensión última real	$UTS \cdot \exp[\ln(1 + \epsilon_{UTS})]$	801,1	MPa
Δσ	Rango de tensión plástica	$\sigma_y - \sigma_0$	375,2	MPa
E_T	Pendiente plástica	$\Delta\sigma/\epsilon^{pl}$	1698,2	MPa

Tabla 4-7 Datos y resultados de las propiedades del modelo bilineal isotrópico para el material seleccionado, datos obtenidos de [32] y [29].

En la Figura 4.9 podemos ver la representación de estos datos en un típico diagrama de tensión deformación.

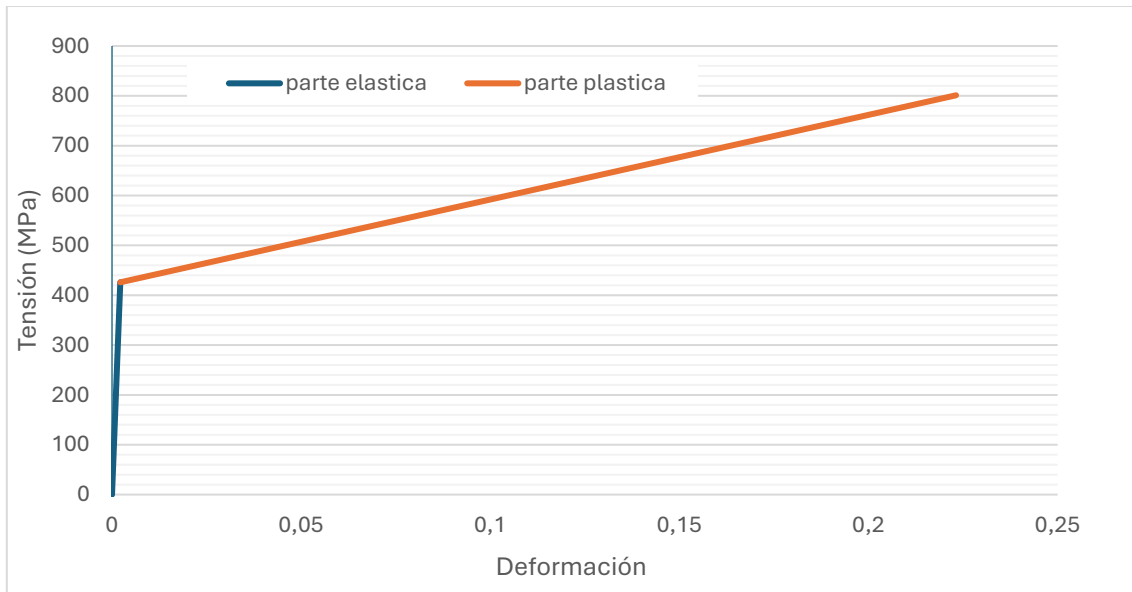


Figura 4.9 Representación de la respuesta tensión-deformación del modelo bilineal isotrópico utilizado para describir al SA-182 F60 2205.

Con los datos para distintos valores de temperatura, se establecen las condiciones en el rango de operación definido.

4.8.2 Modelo utilizado para el elastómero

Fuera del alcance del código ASME en lo que respecta a la representación de materiales elastoméricos, existen diversos modelos constitutivos que permiten describir su comportamiento frente a la deformación. Idealmente, la verificación del sello elastomérico debería realizarse mediante alguno de los modelos hiperelásticos mencionados en el capítulo de *FEM* (como Mooney-Rivlin, Ogden o Yeoh), disponibles en plataformas avanzadas de simulación.

No obstante, debido a las limitaciones de la licencia del software utilizado en este trabajo, únicamente fue posible implementar materiales cuya complejidad no exceda la de un modelo con endurecimiento isotrópico bilineal. Bajo esta restricción, se adoptaron aproximaciones simplificadas que permiten estimar, de forma preliminar, el comportamiento mecánico del elastómero en el sistema de sellado y calcular la carga inducida por su compresión.

Para construir esta aproximación, se utilizaron coeficientes del modelo de Ogden obtenidos a partir de ensayos equibiaxiales realizados sobre elastómeros FKM-90 y HNBR-90 a distintas temperaturas. Se eligieron datos de este tipo de ensayo por su capacidad para representar adecuadamente el estado de compresión, dada la alta incompresibilidad de estos materiales. Todos los datos de propiedades y coeficientes para definir los modelos de los materiales fueron obtenidos de [35].

A partir de los datos experimentales, se trazó con los correspondientes coeficientes, la curva de respuesta tensión deformación de cada elastómero y dos

rectas por cada curva: una correspondiente al tramo de baja deformación ($0 \leq \varepsilon \leq 0,3$), representando el módulo elástico, y otra para el tramo de mayor deformación ($0,3 \leq \varepsilon \leq 0,7$), representando el módulo tangente. Estas curvas fueron luego implementadas en el software de simulación como modelos bilineales.

Recordando el modelo de Ogden de la ecuación 3.6 y asumiendo incompresibilidad resultan las siguientes ecuaciones propias de Ogden [43]:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad \text{ec. 4.7}$$

La tensión de Cauchy (citado en [43]) será:

$$\sigma_i^c = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - p \quad \text{ec. 4.8}$$

Donde p , es la presión hidrostática.

Resolviendo la ecuación 4.7 teniendo en cuenta que para el estado equibiaxial, dos de las tensiones principales serán iguales y la tercera será nula $\sigma_2^c = \sigma_3^c = \sigma^c$. Además, los estiramientos serán $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ y $\lambda_1 = \lambda^{-2}$ la tensión de Cauchy resulta:

$$\sigma^c = \sum_{i=1}^3 \mu_i (\lambda^{\alpha_i} - \lambda^{-2\alpha_i}) \quad \text{ec. 4.9}$$

Siendo los coeficientes que describen al material, ajustados para la expresión clásica de Ogden [43] los presentados en la Tabla 4-8.

	FKM-90 a 23°C	FKM-90 a 175°C	HNBR-90 a 100°C
μ_1 (MPa)	2,905	2,866	1,824
μ_2 (MPa)	-0,793	-0,782	-0,238
μ_3 (MPa)	0,002	0,002	0,003
α_1	2,661	2,380	2,756
α_2	-2,661	-2,380	-2,756
α_3	10,790	10,310	9,097

Tabla 4-8 Coeficientes de Ogden obtenidos de [35] y ajustados para el modelo clásico de Ogden [43].

En la Figura 4.10 se representan los resultados de las curvas tensión deformación para estos dos materiales en las tres condiciones de temperatura definidas.

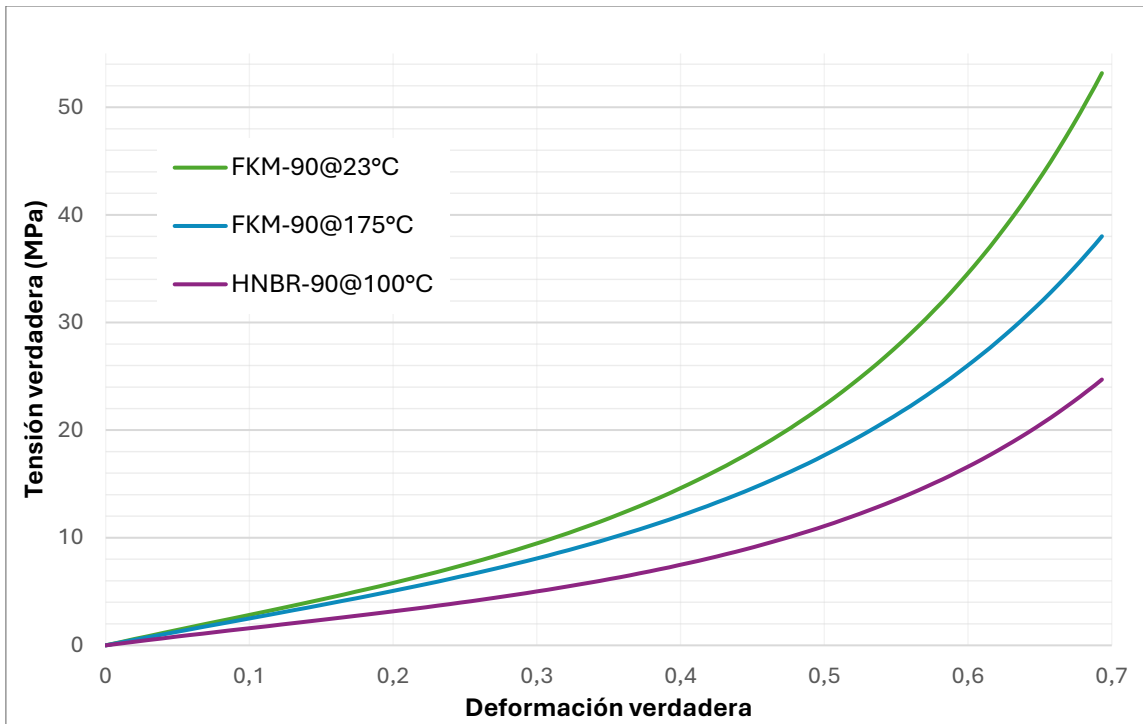


Figura 4.10 Tensión-deformación de 2 elastómeros en distintas condiciones de temperatura.

Cada una de las curvas de tensión-deformación fue representada por dos rectas en un modelo bilineal. Podemos ver en la Figura 4.11 la superposición de las rectas con la curva tensión deformación para el FKM-90 a 23°C.

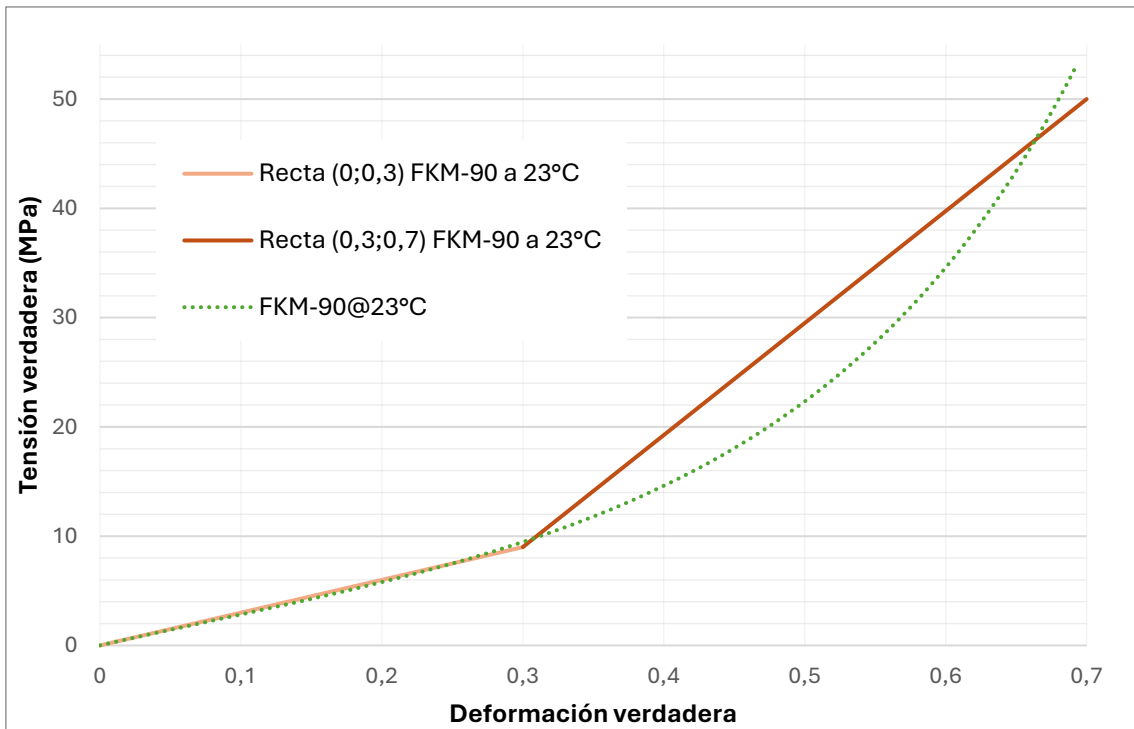


Figura 4.11 Tensión-deformación FKM-90 a 23°C y las dos rectas para describirlo en modelo bilineal.

De igual manera que la figura anterior, en la Figura 4.12 podemos ver las rectas que aproximan el comportamiento del FKM-90 a 175°C.

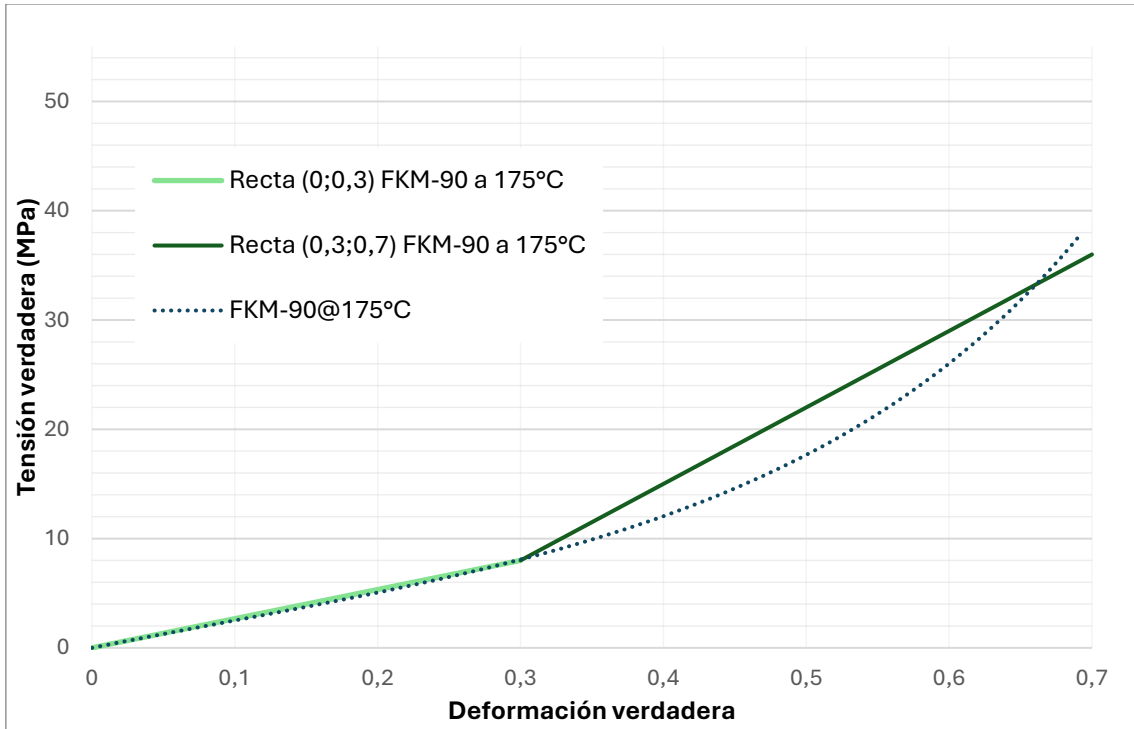


Figura 4.12 Tensión-deformación FKM-90 a 175°C y las dos rectas para describirlo en modelo bilineal.

Finalmente, en la Figura 4.13 podemos ver las dos rectas utilizadas para aproximar el comportamiento del HNBR-90 a 100°C.

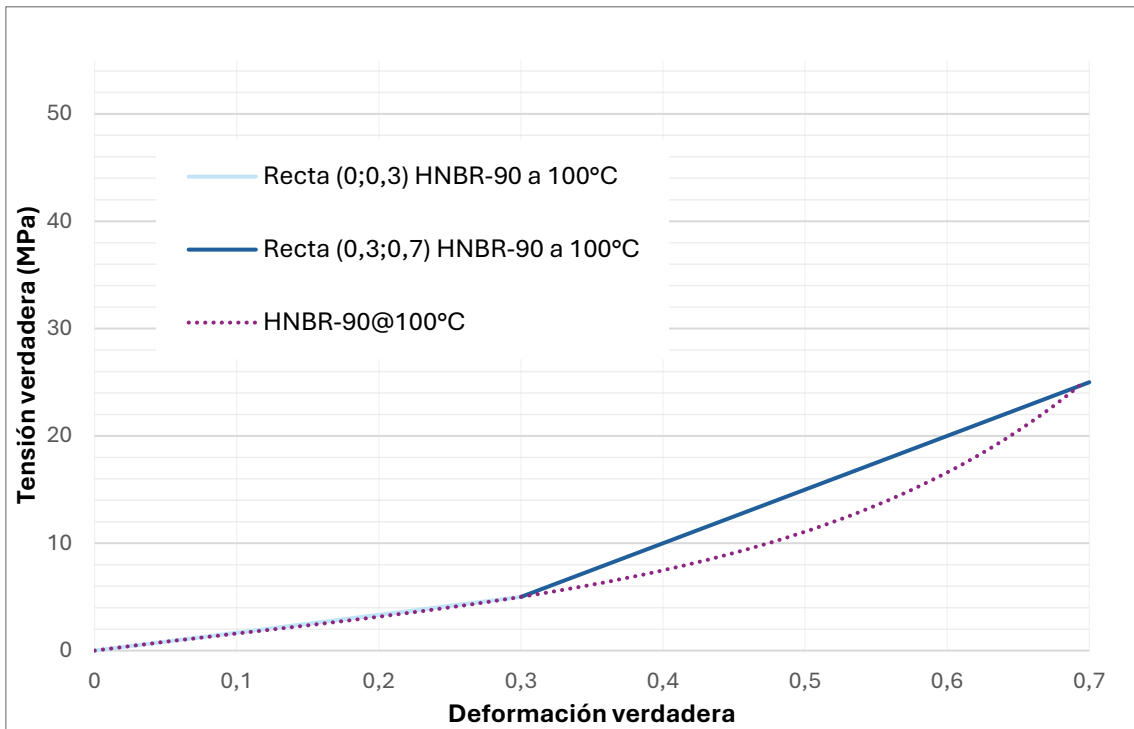


Figura 4.13 Tensión-deformación HNBR-90 a 100°C y las dos rectas para describirlo en modelo bilineal.

De este conjunto de rectas se obtuvieron la pendiente de la primera, que en el modelo bilineal será el módulo elástico, y la pendiente de la segunda el que será el módulo tangente. Estos datos se representan en la Tabla 4-9.

	FKM-90 a 23°C	FKM-90 a 175°C	HNBR-90 a 100°C
Tensión primer punto (MPa)	9	8	5
Modulo elástico (MPa)	30	26,6	16,6
Tensión segundo punto (MPa)	50	36	25
Modulo tangente (MPa)	102,5	70	50

Tabla 4-9 Propiedades del material basadas en las rectas de aproximación bilineal.

Además, para cada conjunto se utilizó el módulo volumétrico obtenido de la bibliografía.

Se realizó una comparación extra, tomando los valores del ensayo biaxial para el FKM-90 a 175°C e interpolando los datos del módulo volumétrico o “*bulk modulus*” linealmente entre los datos a 23 °C y 175°C. En la Tabla 4-10 se representan los módulos volumétricos utilizados para cada material y temperatura.

	FKM-90 a 23°C	FKM-90 a 100°C	FKM-90 a 175°C	HNBR-90 a 100°C
Módulo volumétrico (MPa)	3145	2414	1702	2525

Tabla 4-10 Datos de modulo volumétrico extraídos de [35]. El valor del FKM-90 a 100°C resulta de la interpolación lineal de los datos conocidos.

La aproximación considerada permite obtener una respuesta representativa del sistema, evaluar las reacciones involucradas en el mecanismo de sellado y caracterizar, de forma preliminar, el comportamiento del sistema de sellado propuesto.

5 Análisis por Elementos Finitos

Este capítulo tiene como objetivo presentar los modelos desarrollados mediante el Método de Elementos Finitos (*FEM*) y los resultados finales junto a algunas de las etapas intermedias que condujeron a la solución final.

Se expone el procedimiento seguido para verificar el cumplimiento de los criterios establecidos por el código ASME Sección VII, división 2, parte 5 en cada componente del dispositivo, así como el criterio definido por el usuario de máxima deformación en la cara de las bridas y los relacionados con el sellado y la sujeción en los puertos de acceso.

Para la evaluación, se consideró que la pieza, al ser de geometría circular —ver Figura 5.1— y disponer de cuatro puertos de carga, posee simetrías que permiten reducir el modelo a un cuarto del dispositivo, incluyendo una varilla porta sensores y uno de los puertos de montaje del sensor.

Las características y detalles del dispositivo final se pueden ver en la Figura 5.2 para referencias y vista en corte y los detalles respectivos en la Figura 5.3 y Figura 5.4. Para mayor grado de detalle, se presentan en el Anexo A los planos dimensionales del dispositivo y cada una de sus piezas.

Adicionalmente, para el análisis del sistema de sellado, se adoptó una simplificación mediante simetría de revolución, modelando la pieza como un sistema axisimétrico con el fin de disminuir el costo computacional sin comprometer la representatividad del comportamiento.

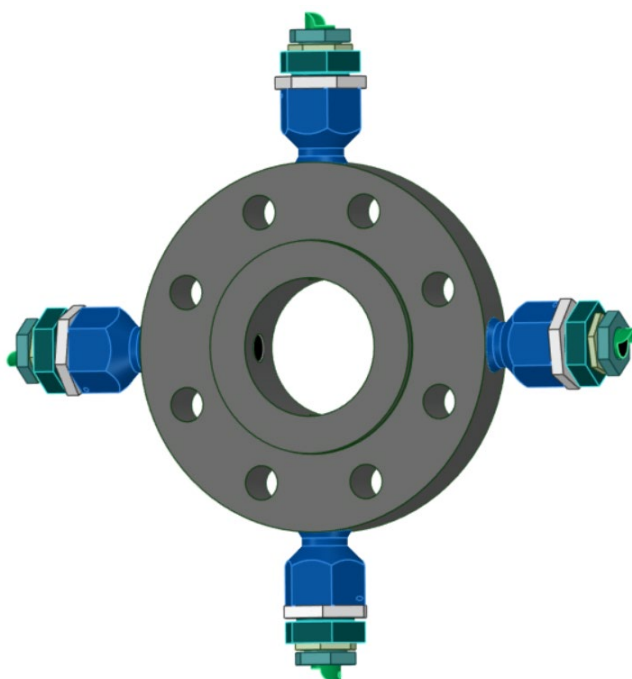


Figura 5.1 Configuración final dispositivo completo. Además, se pretende agregar una cadena de seguridad entre varilla y el soporte de sello.

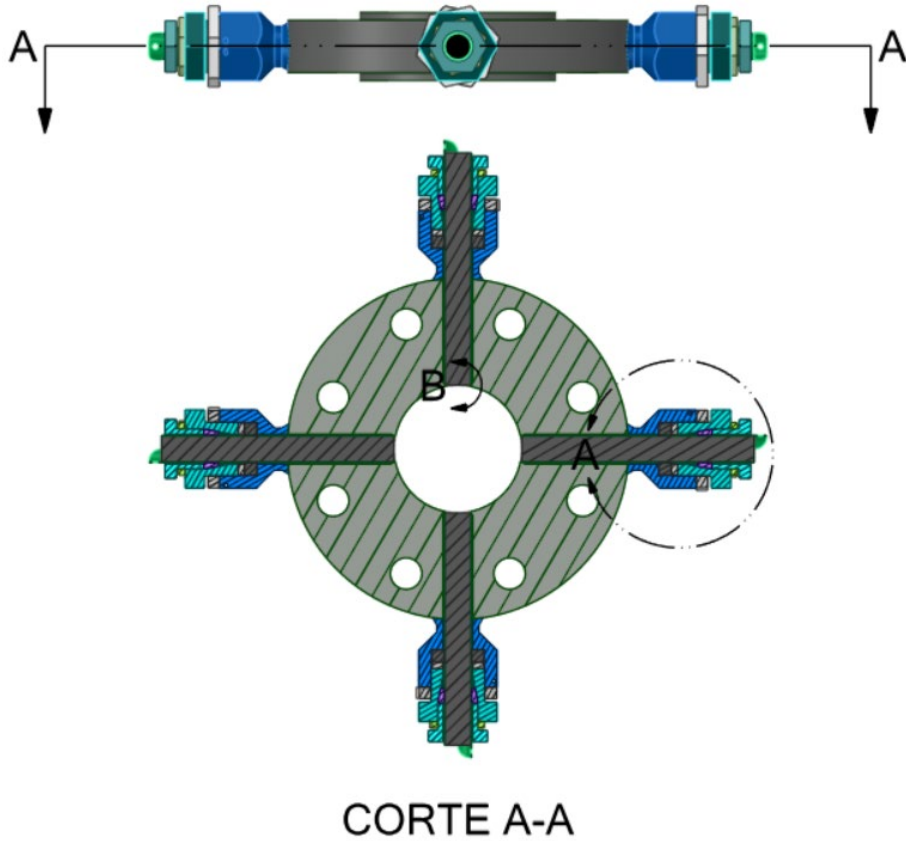
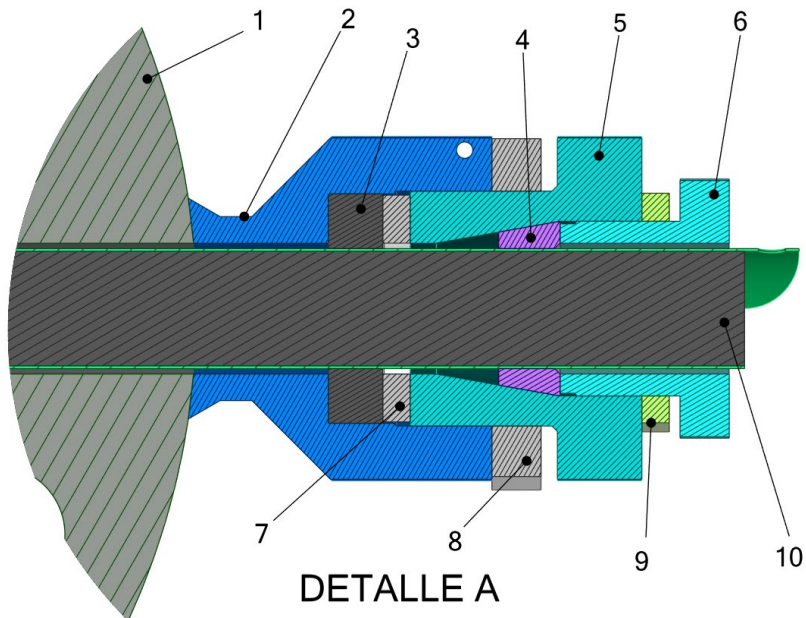


Figura 5.2 Configuración final, vista superior y corte A-A. Ver detalles en Figuras 5.3 y 5.4.



Notas:

1: Brida

2: Soporte de sello

3: Elastómero o sello

4: Cuñas o sujetadores

5: Tapón de sello

6: Tapón de sujeción

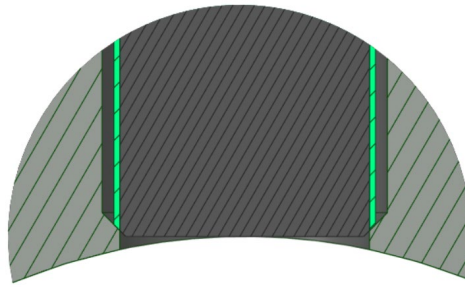
7: Arandela de compresión

8: Contratuerca de tapón de sello

9: Contratuerca de tapón de sujeción

10: Varilla porta sensores

Figura 5.3 Detalle A. Se pueden ver todas las piezas del dispositivo de sellado y sujeción mecánica en corte A-A de Figura 5.2.



DETALLE B

Figura 5.4 Detalle B del corte A-A zona de contacto del elemento sensor con el medio, configuración tipo flush. Ver referencia en Figura 5.2.

Cabe destacar que existen componentes que no serán objeto de análisis en esta tesis, debido a que su influencia en la integridad estructural del dispositivo es mínima o se encuentra fuera del alcance definido. Estos son:

- Varilla porta sensores.
- Contratuercas.
- Arandela de compresión.

El análisis se centrará exclusivamente en las piezas que conforman el límite de presión y los elementos críticos para el sellado y la sujeción mecánica, dado que son los que determinan el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos por el código ASME y los requisitos funcionales del sistema.

5.1 Evolución del diseño

Como se indicó en el capítulo anterior, el proceso de diseño se desarrolló de manera iterativa, partiendo de conceptos preliminares que fueron sometidos a validación sucesiva.

En las siguientes figuras se presentan algunas de las configuraciones iniciales evaluadas, las cuales sirvieron como base para la evolución del diseño hasta alcanzar el concepto final mostrado al inicio de este capítulo, y del cual se expondrán los resultados del modelado *FEA* en las secciones siguientes.

En la Figura 5.5 se presenta el primer modelo conceptual, el cual permitió realizar una evaluación preliminar del comportamiento de las piezas frente a las cargas estimadas y validar algunas de las hipótesis iniciales de diseño.

A partir de este análisis, se evidenció la problemática asociada a la configuración del sistema de sellado lo que motivó la evolución hacia el concepto mostrado en la Figura 5.6. Como los resultados de la simulación de esta geometría de sello no fueron prometedores se modificó el sello a una sección rectangular (Figura 5.7) y posteriormente se incluyó un sistema de sujeción de la varilla (Figura 5.8).

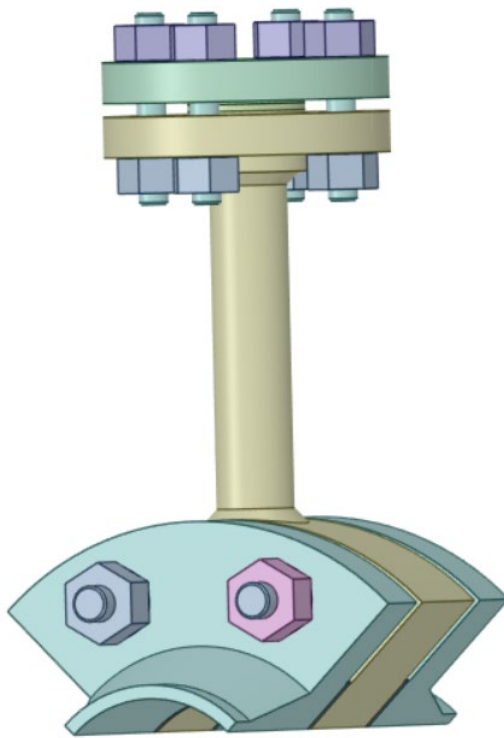


Figura 5.5 Primer diseño conceptual, sin dispositivo de sellado ni sujeción. Se dibujaron además las bridas del sistema de cañerías y sus espárragos.

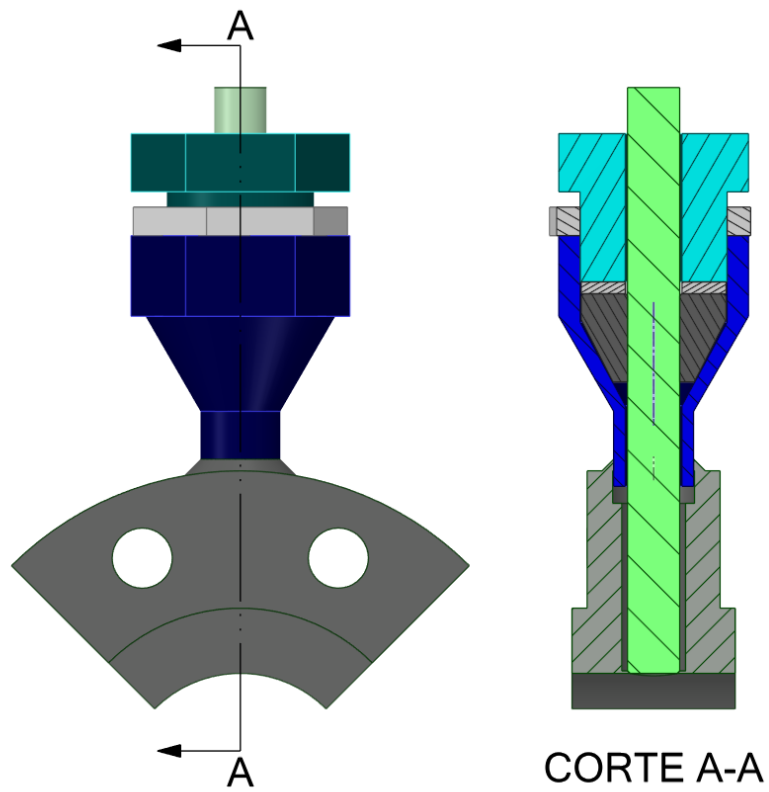


Figura 5.6 – Primer idea conceptual de dispositivo con sello elastomérico. Se puede observar el sello cónico.

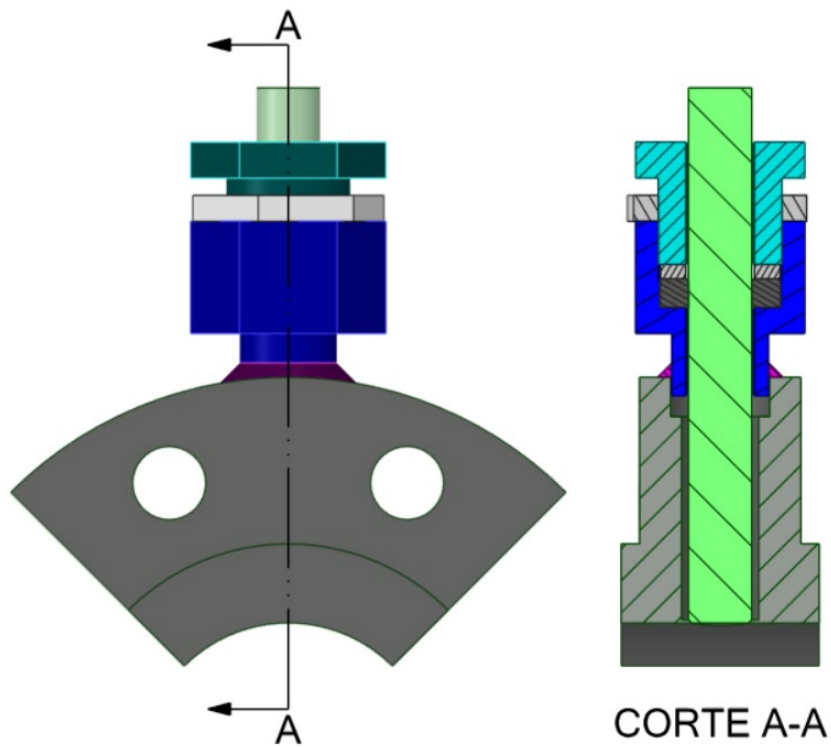


Figura 5.7 Dispositivo con sello elastomérico de sección rectangular, pero sin sujeción mecánica, nótese el diseño de la soldadura tipo socket o por encaje.

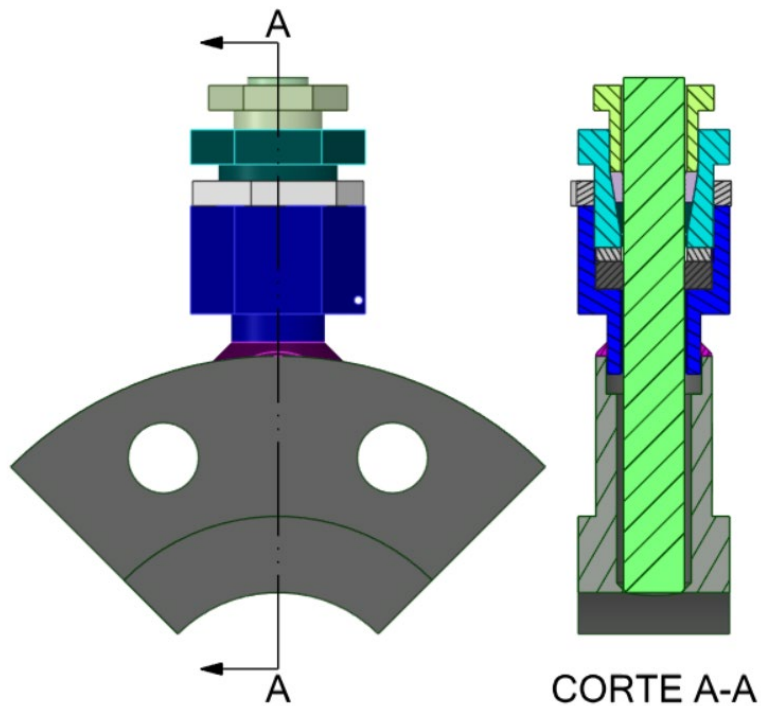


Figura 5.8 Dispositivo con sellado y sujeción de la varilla. Se puede observar además una disminución en el espesor de este.

A través de los resultados obtenidos en los análisis por elementos finitos, el diseño fue evolucionando de manera progresiva hasta consolidarse en el modelo final presentado en las Figuras 5.1 a 5.4 y Anexo A.

La funcionalidad y desempeño del sistema de sujeción mecánica mediante cuñas, también son evaluados en el apartado correspondiente al análisis de sujeción.

5.1.1 Modificaciones realizadas

A continuación, se resumen brevemente algunas de las modificaciones realizadas, ya sea por incumplimiento de los criterios de aceptación o por la evaluación de la funcionalidad del dispositivo:

Agregado de radios de acuerdo y chaflanes: estas zonas no cumplían el criterio de falla local o generaban singularidades, lo que impedía la convergencia al refinar la malla.

Cambio de geometría del sello: el comportamiento observado en el modelado indicó que la forma cónica no era la más adecuada. Este caso se detalla en la sección de sellado.

Reducción del espesor de la brida: como resultado del análisis FEA, se eliminó material para optimizar el diseño y facilitar su inserción entre bridas existentes.

Transición cónica en el soporte del sello: esta modificación se implementó considerando que la pieza original parte de un bloque macizo; agregar más mecanizado incrementaba el costo sin aportar beneficios funcionales.

Configuración de soldadura: la soldadura tipo socket tiende a concentrar tensiones entre el filete y las piezas adyacentes. En la zona próxima al extremo del conector se detectaron puntos donde el criterio de falla local no se cumplía debido a la alta triaxialidad de tensiones, por lo que fue necesario ajustar el diseño.

Sistema de tope para la varilla porta-sensores: una de las dificultades en sistemas tipo *flush* es el posicionamiento del sensor. Con esta configuración se busca facilitar su posicionamiento automático y permitir el mecanizado del extremo del sensor para prolongar su vida útil.

5.2 Metodología general

Se presentan las consideraciones generales aplicadas en los modelos, incluyendo aspectos relacionados con materiales, condiciones de simetría, contactos, criterios de mallado y procedimientos de convergencia.

5.2.1 Materiales

Los modelos utilizados fueron definidos conforme a lo descrito en el capítulo 4.

- Componentes metálicos: todos los elementos que conforman el límite de presión se modelaron con las propiedades del acero inoxidable dúplex

SA-182 F60 (tipo 2205). Las soldaduras se representaron como parte integral del soporte de sello, asignándoles las mismas propiedades del material base, tal como lo permite el código ASME.

- Sistema de sellado: el elastómero se modeló como FKM-90 en tres condiciones de temperatura y, adicionalmente, como HNBR-90 en una condición, con el objetivo de comparar el comportamiento mecánico bajo diferentes escenarios térmicos.
- Varilla porta-sensores: este componente, conceptualizado como un tubo relleno con cables y resina epoxi, se simplificó en el modelo como un sólido metálico.

5.2.2 Simetrías y simplificaciones

5.2.2.1 Modelo axisimétrico para sellado

El modelo inicial de sellado se desarrolló en 3D; sin embargo, debido a los elevados tiempos de cómputo asociados a geometrías tridimensionales con alto grado de no linealidad, se optó por una simplificación mediante una aproximación axisimétrica. Esta estrategia redujo el tiempo de simulación de varias horas a solo minutos, sin comprometer la representatividad del análisis ni la validez de los resultados.

El dominio del análisis puede verse en la Figura 5.13.

5.2.2.2 Modelo simplificado para el sistema de sujeción

Para el análisis del sistema de sujeción mecánica se redujo el modelo a los componentes esenciales: la varilla (considerada maciza), las cuñas y el tapón de sello. El sistema se muestra en la Figura 5.9 junto al tapón de sujeción, sin embargo, la carga fue aplicada directamente a las cuñas por lo que el tapón no se simuló en esta etapa. El dominio final puede verse en la Figura 5.34.

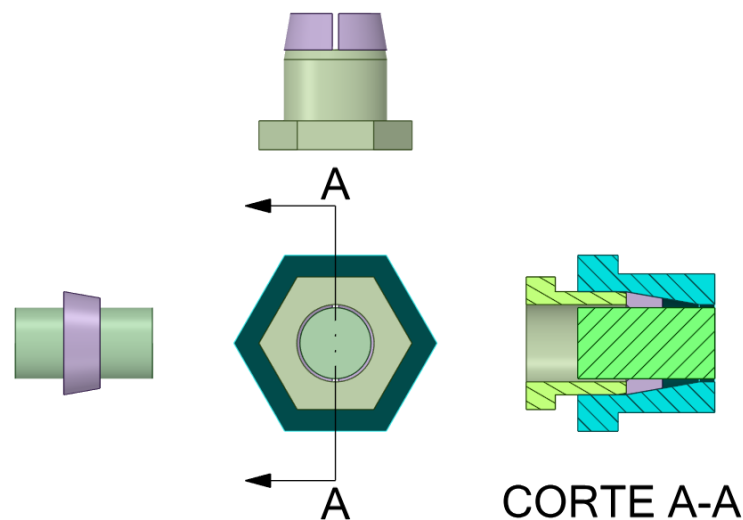


Figura 5.9 Esquema del sistema de sujeción mecánica. Al medio sistema completo, arriba proyección tapón de sujeción y cuñas, a la izquierda parte de varilla y cuñas, a la derecha corte A-A del sistema completo.

Esta simplificación permite concentrar el estudio en las reacciones generadas por el desplazamiento impuesto a las cuñas, equivalente al efecto del apriete mediante el tapón de sujeción. Los valores obtenidos se utilizarán posteriormente para verificar la resistencia de los componentes, como el tapón roscado y el tapón de sujeción, asegurando su desempeño bajo las condiciones de carga definidas.

5.2.2.3 Modelo simétrico para el análisis estructural del conjunto

Con el objetivo de reducir el costo computacional en los modelos tridimensionales, se optimizó la cantidad de elementos considerando únicamente las interacciones relevantes entre los componentes evaluados.

El anillo o brida que aloja los cuatro puertos se simplificó mediante la aplicación de simetría, reduciendo el modelo a un cuarto del anillo con un dispositivo de sellado y sujeción ubicado en el centro. Asimismo, el análisis se dividió en submodelos específicos, dado que las simulaciones completas —incluyendo todas las piezas con sus respectivas no linealidades— podrían requerir tiempos de cómputo superiores a un día. Para ello, se configuraron adecuadamente las superficies de simetría, tal como se indica en la Figura 5.10 y se realizaron los modelos de sellado y sujeción de manera paralela. La figura 5.10 es el dominio final del análisis estructural.

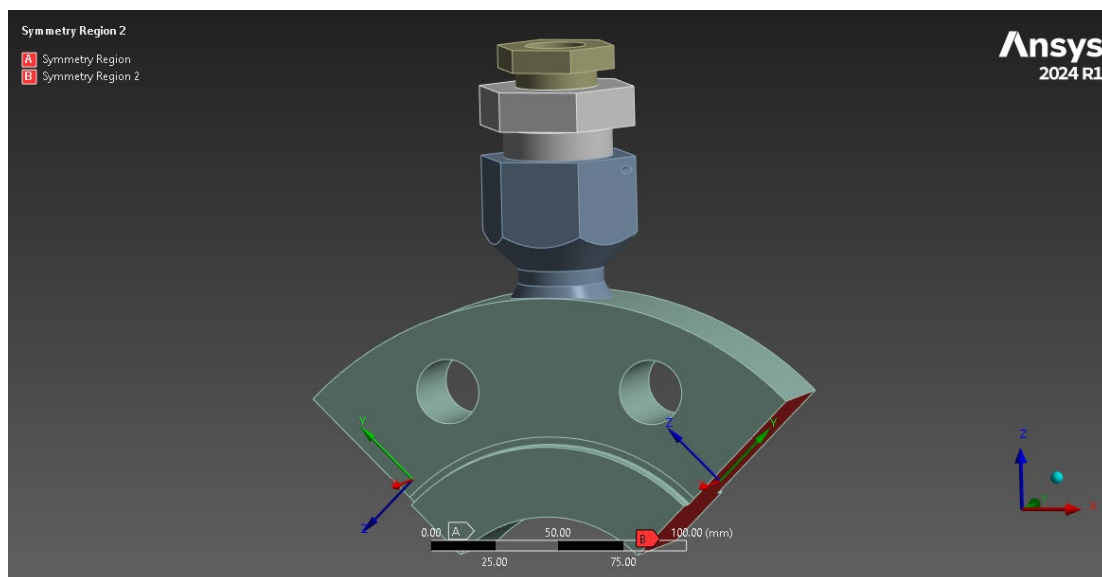


Figura 5.10 Configuración de regiones de simetría. Caras laterales indicadas como A y B.

Las uniones roscadas no se modelaron con geometría real, sino como contactos tipo *bonded*. Además, para mejorar la continuidad de la malla entre piezas, la superficie de contacto entre la soldadura y el anillo principal se exportó como superficie compartida, esto permite que el software interprete ambas partes como una sola entidad durante el mallado. Gracias a esta estrategia, no fue necesario definir contactos adicionales en dichas superficies y se logró continuidad de malla en esa zona.

5.2.3 Criterios de mallado y convergencia

En todos los modelos se aplicó un procedimiento de refinamiento progresivo de la malla, con el objetivo de garantizar la convergencia y obtener valores representativos en las zonas críticas del análisis. Este enfoque permitió identificar los puntos de interés y aplicar controles específicos para mejorar la calidad del mallado en dichas regiones.

Los criterios adoptados para la convergencia fueron; la obtención de variaciones menores al 5 % entre soluciones consecutivas, así como la evaluación de los gradientes en los elementos cercanos a los puntos de evaluación [44].

En los casos donde se evaluó la presión de contacto, la presencia de singularidades y tensiones artificiales impidió aplicar un criterio cuantitativo estricto. Por ello, se adoptó un enfoque semi-cuantitativo, definiendo el valor de presión que representara aproximadamente tres cuartas partes de la superficie efectiva de contacto. Aunque no fue posible realizar un análisis formal de convergencia en estas condiciones, en todos los casos se observó una tendencia incremental en los valores de presión al refinar la malla, seguida de una estabilización —evaluada en la zona sin singularidades—, lo que confirma la robustez del modelo.

5.2.3.1 *Algunas consideraciones particulares por análisis*

5.2.3.1.1 Análisis de sellado

El modelo se conformó por elementos de segundo orden tipo cuadriláteros con 8 puntos de integración, alcanzando un total de 28 840 elementos bidimensionales.

En este caso no se presentan datos de convergencia global, dado que las variables de interés corresponden a la presión media de sellado. Esta se obtiene aplicando límites de visualización en el postprocesado, lo que permite considerar el análisis como semi-cuantitativo, ya que el resultado depende de la longitud de la superficie contabilizada al definir el umbral. Dicha longitud implica una superficie de revolución.

Cabe destacar que la presión media calculada por el software tiende a ser mayor, debido a la inclusión de singularidades y a la aproximación simplificada del comportamiento del elastómero.

Adicionalmente, se evalúa cualitativamente la deformación total del elastómero, verificándose que la mayor parte de este posee una deformación menor a 0,3 mm/mm, valor que corresponde al rango de mayor aproximación en el modelo bilineal empleado.

5.2.3.1.2 Análisis de sujeción

Este modelo se malló con elementos de segundo orden tipo tetraédricos, con 10 puntos de integración, alcanzando un total de 2 912 836 elementos.

Para optimizar la precisión en las áreas de mayor interés, se aplicaron herramientas específicas de refinamiento, en particular la técnica *Contact Sizing* en todas las superficies de contacto previamente definidas. Esta estrategia asegura una mayor densidad de elementos en las zonas donde se concentran las presiones de contacto, optimizando la calidad del análisis.

Dado que los contactos constituyen las regiones más relevantes para este análisis —de ellos se obtendrán las reacciones necesarias para la verificación del tapón de sello en etapas posteriores—, este enfoque resulta fundamental para realizar el análisis.

5.2.3.1.3 Análisis estructural

Este análisis también incluyó un refinamiento progresivo de la malla con la diferencia que en este caso primero fue aplicado a todos los componentes en conjunto y, posteriormente, de manera individual, con el objetivo de determinar las tensiones máximas y verificar el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos componente a componente.

En la primera etapa se utilizó una malla general de 2 mm, que luego se refinó en las zonas críticas identificadas. Esta estrategia permitió evaluar las interacciones entre componentes y optimizar las áreas donde se requería mayor densidad de elementos para garantizar la convergencia.

El mallado final se realizó con elementos tetraédricos de segundo orden (10 puntos de integración), configuración que ofrece una mejor calidad en geometrías complejas, asegurando precisión en zonas críticas sin comprometer la estabilidad del modelo.

5.2.4 Configuración de contactos *frictional*

Los contactos *frictional* entre elastómero y metal se modelaron con un coeficiente de fricción de 0,75, valor representativo para este tipo de elastómeros sobre superficies metálicas sin lubricación [45] [46]. En los contactos *frictional* metal-metal se utilizó un coeficiente de fricción de 0,2, correspondiente al valor típico para ajustes de espárragos [47].

5.2.5 Configuraciones particulares de post procesado

En la etapa de postprocesamiento del análisis estructural, se definió que los valores calculados en los puntos de integración (como tensiones y deformaciones) se copiaran directamente a los nodos, en lugar de extrapolarlos. Recordemos que los puntos de integración son ubicaciones internas dentro de

cada elemento donde el método de elementos finitos evalúa las variables con mayor precisión, ya que allí se realizan las operaciones de integración numérica. Normalmente, los resultados en estos puntos se extrapolan hacia los nodos para obtener un campo continuo, lo que facilita la visualización.

Sin embargo, en modelos con no linealidades (plasticidad, grandes deformaciones, contacto), la extrapolación puede amplificar errores locales y producir valores poco confiables en los nodos, afectando la interpretación de tensiones críticas. Por ello, se optó por desactivar la extrapolación y copiar los valores directamente, siguiendo el criterio que ANSYS aplica automáticamente en situaciones no lineales.

Esta condición se fijó explícitamente mediante el comando “ERESX, NO”. Este comando controla la extrapolación de resultados a los nodos:

- ERESX, YES (por defecto en análisis lineales) habilita la extrapolación para suavizar resultados.
- ERESX, NO desactiva la extrapolación y copia los valores desde los puntos de integración a los nodos.

Al usar ERESX, NO, se garantiza uniformidad en todas las soluciones del modelo, se evita variabilidad entre iteraciones y se mejora la estabilidad numérica, lo que contribuye a la convergencia del análisis. En síntesis, esta decisión prioriza la fidelidad de los resultados frente a la suavidad visual, lo cual es fundamental en estudios donde la precisión de las tensiones es crítica para la validación del diseño.

5.3 Análisis de sellado

Una vez definidas las características preliminares del dispositivo, fue necesario establecer y analizar las condiciones de sellado de la varilla porta-sensores, dado que influye directamente en el análisis estructural de los componentes y en la funcionalidad del dispositivo.

De este análisis se obtienen las presiones de sellado para verificar la estanqueidad del dispositivo, así como las presiones y reacciones ejercidas sobre los componentes estructurales para el modelo y verificación del análisis estructural.

5.3.1 Modelos evaluados

Como se mostró en la Figura 5.6, la primera propuesta de dispositivo de sellado no incorporaba un sistema de sujeción y, además, contemplaba la utilización de un sello elastomérico con geometría cónica. Al llevar este primer modelo de sellado a simulación, se observó que esta geometría de sello no resultaba adecuada, ya que la fricción entre el elastómero y las superficies metálicas impedía una distribución

uniforme de la presión (Figura 5.11 y Figura 5.12). Como consecuencia, la zona inferior del sello no cumplía la condición de sellado preestablecida, comprometiendo la efectividad del sistema.

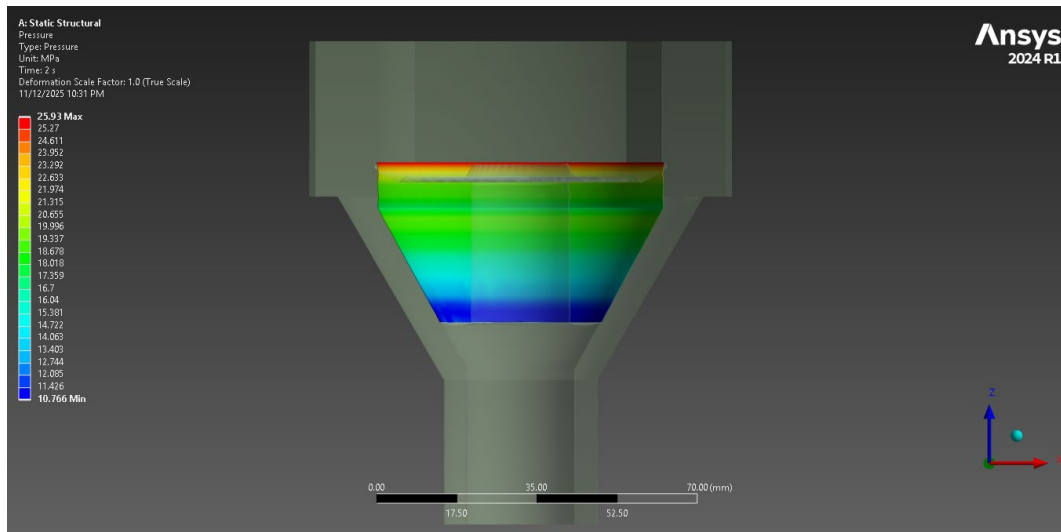


Figura 5.11 Resultados de presión de contacto entre elastómero cónico y soporte de sello. Se observa como la presión de contacto disminuye hacia la zona inferior.

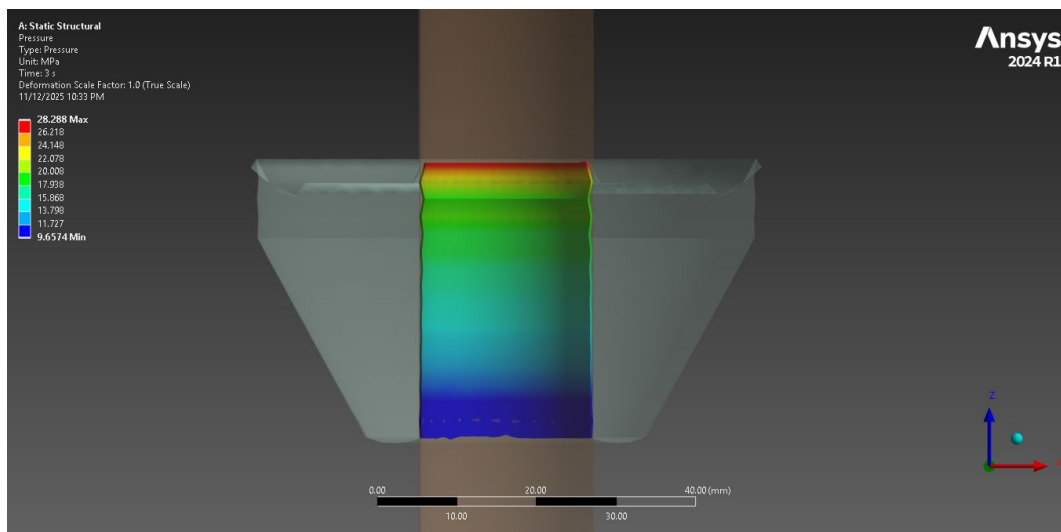


Figura 5.12 Resultados de presión de contacto entre elastómero cónico y varilla. Se observa como la presión de contacto disminuye hacia la zona inferior.

Este comportamiento evidencia que el diseño cónico no aporta beneficios funcionales y, por el contrario, introduce complejidades geométricas innecesarias.

Como resultado, se optó por modificar el diseño hacia un sello de sección rectangular, configuración que puede apreciarse a partir de la Figura 5.7. Este tipo de sello permitió una distribución más uniforme de las cargas logrando una mejora significativa en el aseguramiento de la estanqueidad. En la Figura 5.13 vemos el dominio del modelo axisimétrico utilizado para el análisis del sello de sección rectangular.

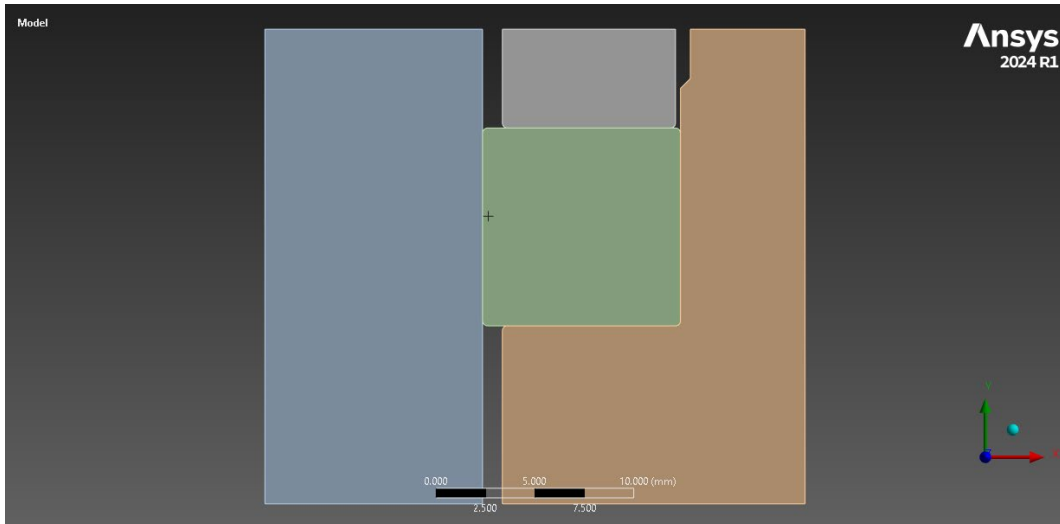


Figura 5.13 Modelo axisimétrico, sello de sección rectangular. Se observa que el soporte de sello fue simplificado, sin embargo, esto no afecta a las cargas de sellado evaluadas en esta etapa.

5.3.2 Condiciones de carga y restricciones

En primer lugar, se ejecutó el modelo con las propiedades del elastómero a 23 °C, aplicando una fuerza de 30 kN sobre la superficie superior de la arandela del conjunto de sellado, ver Figura 5.14. El objetivo de este paso es obtener el desplazamiento resultante de la compresión del sello bajo esta carga.



Figura 5.14 Modelo de sellado. Se observan las cargas de la primera etapa, sellado en frío a 23°C. A y B son las restricciones y C la fuerza de 30 kN aplicada en la cara inferior de la arandela de compresión.

Posteriormente, se ejecutó el modelo a temperaturas más elevadas, utilizando como condición de carga el desplazamiento obtenido en el paso anterior. Esta configuración es la que se observa en la Figura 5.15.



Figura 5.15 Modelo de sellado. A y B son las restricciones y C el desplazamiento obtenido del paso previo aplicado en la cara superior de la arandela de compresión.

Este procedimiento simula la condición real de apriete a baja temperatura y, con esa deformación inicial, evalúa el comportamiento del sistema en régimen térmico elevado.

De esta manera, se determina la presión de sellado efectiva considerando la pérdida de resistencia del elastómero provocada por el incremento de temperatura.

No se consideran los efectos de expansión térmica que compensarían el ablandamiento del material, mejorando la presión de sellado a mayor temperatura.

En todos los casos se aplicó una restricción de desplazamiento en la dirección “y” sobre la base del modelo.

En relación con los pasos de aplicación de carga, debido a la alta no linealidad del problema y a las grandes deformaciones en el elastómero, fue necesario definir múltiples pasos intermedios para garantizar la robustez del análisis y la convergencia de la solución.

Para ello, se estableció un tiempo total de aplicación de carga de 30 segundos, dividido en tres intervalos de 10 segundos, con subdivisiones automáticas entre 10 y 1 000 subincrementos. El control automático del software permite que, en caso de no converger en alguno de los incrementos, se subdivida el intervalo previo y se reintente con incrementos menores. Esto puede observarse en la Figura 5.16 donde se ve que el incremento entre interacción depende de cada solución.

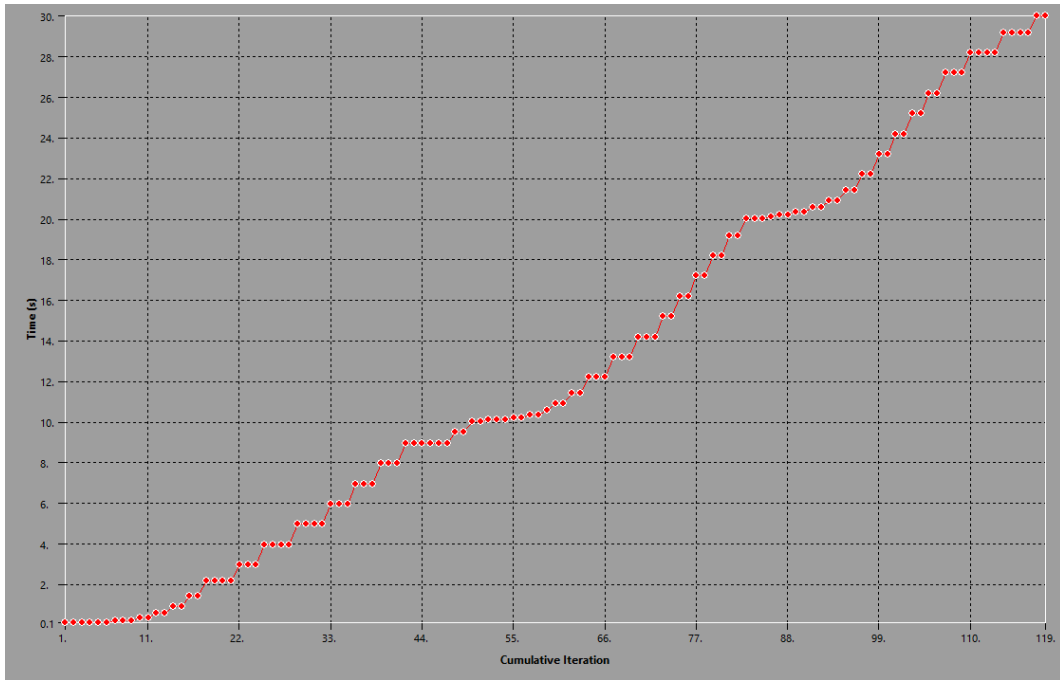


Figura 5.16 tiempo de avance de aplicación de la carga entre iteración e iteración. Resultado de la simulación del sello con FKM-90 a 175 °C.

5.3.3 Características y malla

Se modelaron los siguientes casos: FKM-90 a 23 °C, una interpolación a 100 °C y a 175 °C, así como HNBR-90 a 100 °C.

Se estableció un contacto *frictionless* en caso de producirse interacción entre la arandela y las superficies laterales del sensor o de la base que sostiene el elastómero (Figura 5.17).



Figura 5.17 Configuración de contactos. A, B y C contactos friccional entre elastómero y demás piezas. D contacto frictionless entre arandela, varilla y soporte de sello.

Respecto del mallado, se aplicaron herramientas específicas a medida que se refinaba el modelo. Ver Figura 5.18.

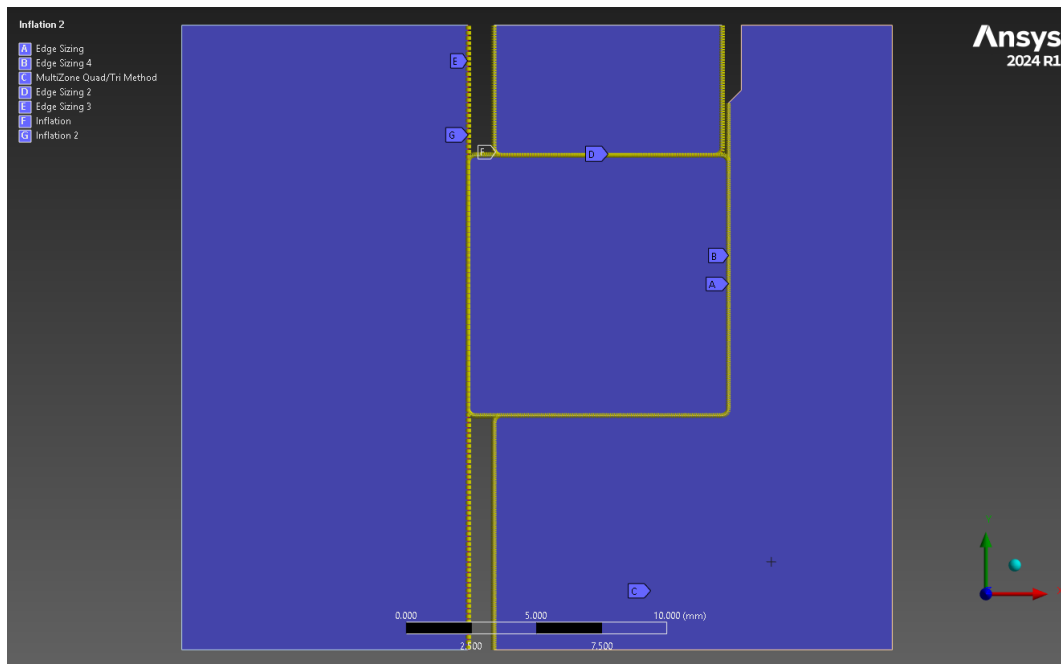


Figura 5.18 Herramientas de mallado aplicadas al modelo de sellado. A, B, D y E edge sizings. F y D inflations. Todo el modelo mallado con MultiZone pero con resultado puramente cuadriláteros.

Con estas características, se obtuvo el mallado mostrado en la Figura 5.19, que según la métrica compuesta de calidad de Ansys resulta apropiado (Figura 5.20).

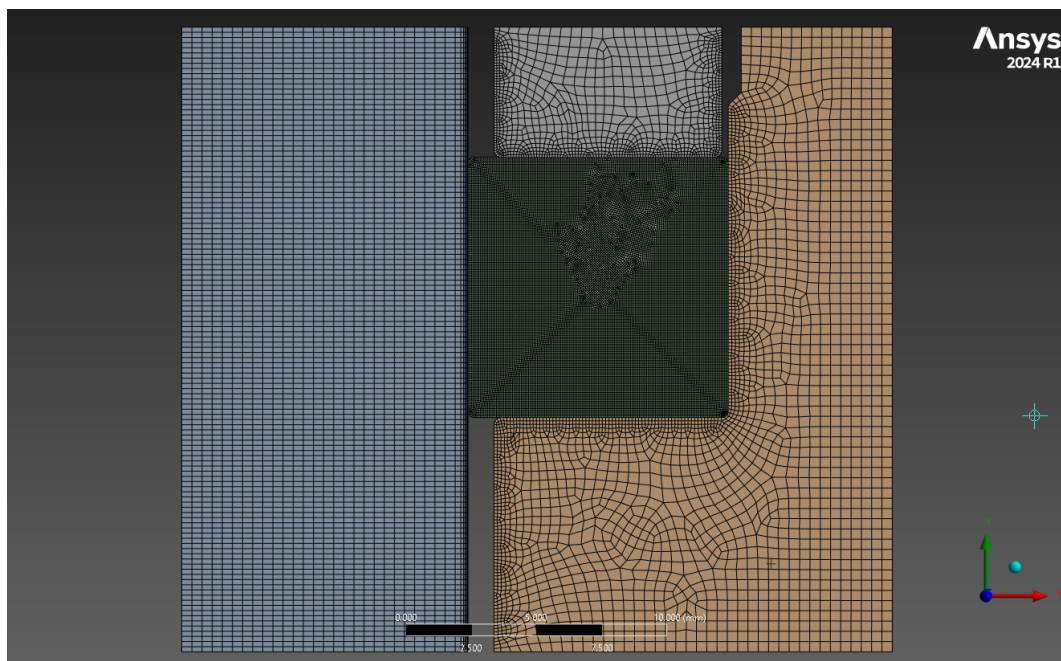


Figura 5.19 Mallado final de modelo de sellado.

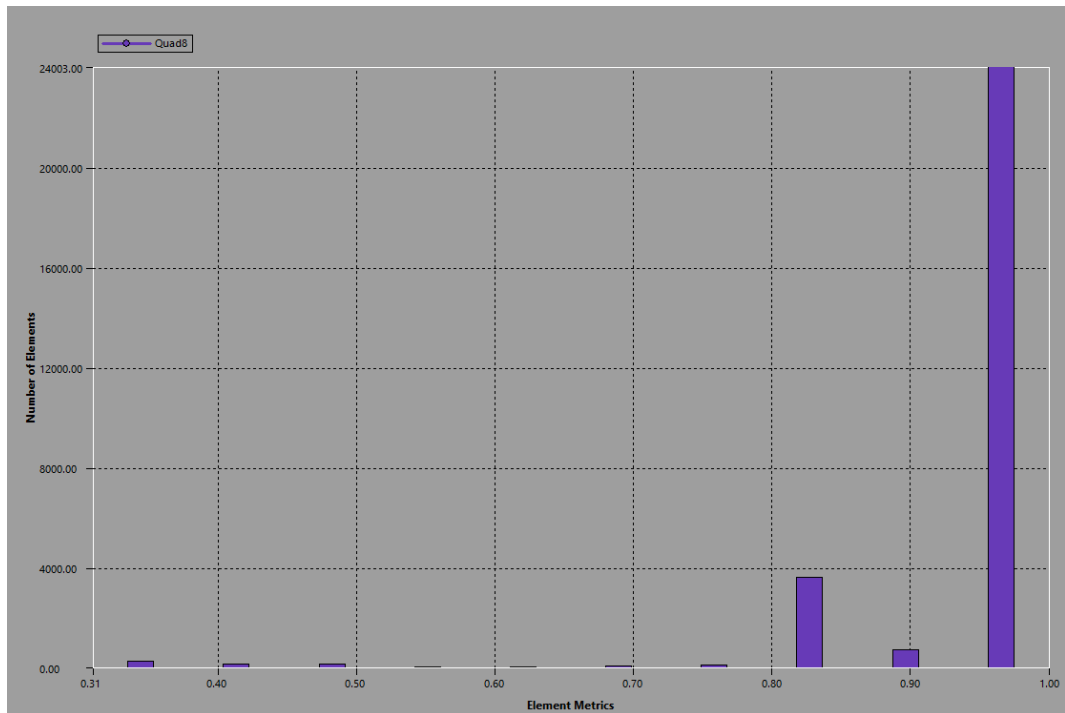


Figura 5.20 Distribución de métrica compuesta de calidad Ansys. Modelo de sellado axisimétrico.

5.3.4 Resultados del modelo de sellado

5.3.4.1 FKM-90 a 23 °C

Se aplicó una fuerza de 30 kN. El objetivo de este análisis obtener la presión de sellado, definida como la presión de contacto en las interfaces elastómero/base y elastómero/sensor y el desplazamiento de la arandela de compresión.

En la Figura 5.21 se observan las zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm, límite de la primera recta de aproximación para el modelo bilineal.

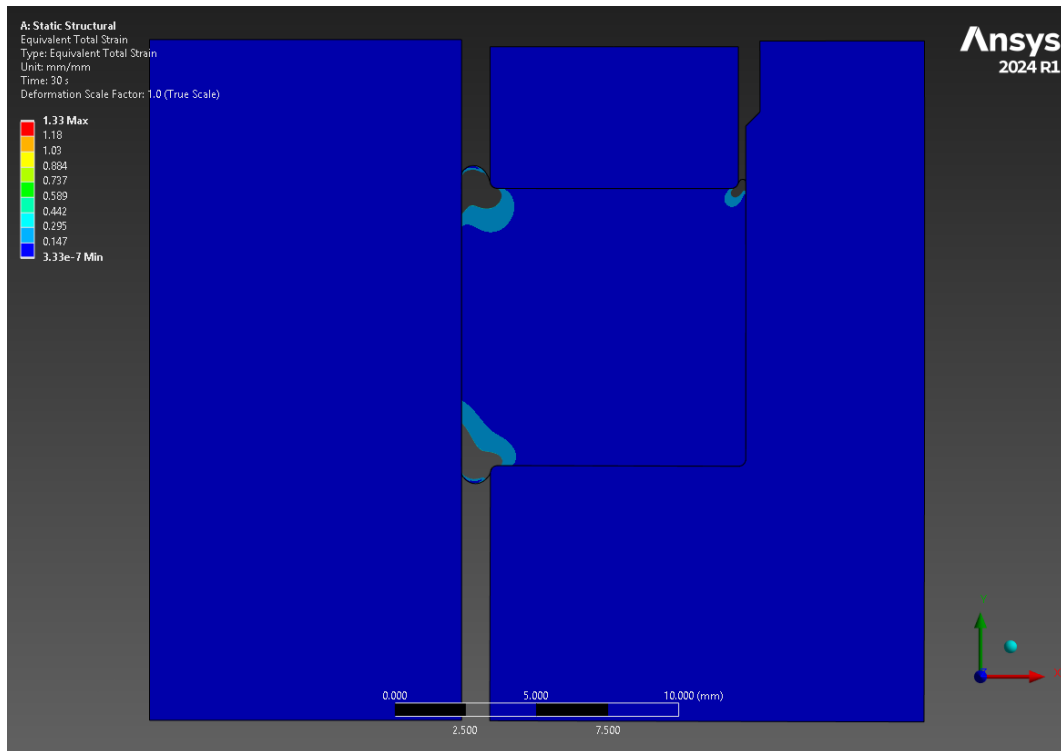


Figura 5.21 Zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm. Modelo FKM-90 a 23°C.

En la Figura 5.22 y la Figura 5.23 se observan las zonas donde la presión de sellado es superior a 30 MPa.

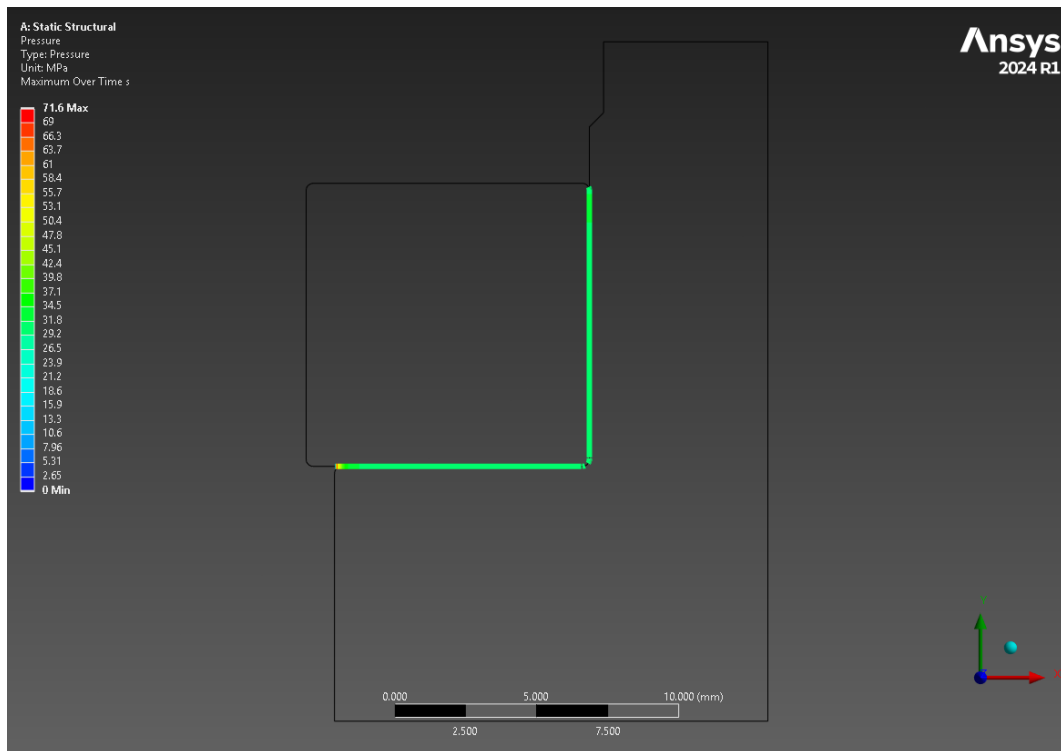


Figura 5.22 Presión de sellado entre goma y soporte de sello, se muestran zonas con valores mayores a 30 MPa. Modelo FKM-90 a 23°C.

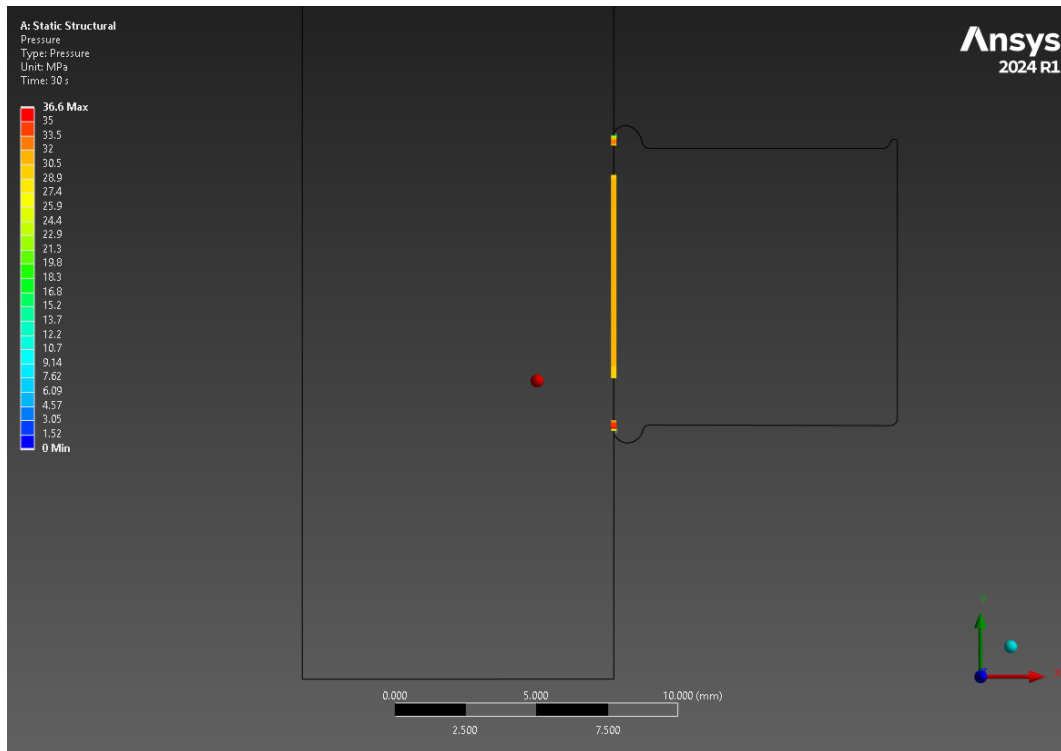


Figura 5.23 Presión de sellado entre goma y soporte de sello, se muestran zonas con valores mayores a 30 MPa. Modelo FKM-90 a 23°C.

En la Figura 5.24 podemos ver la deformación direccional en el eje Y de la arandela.

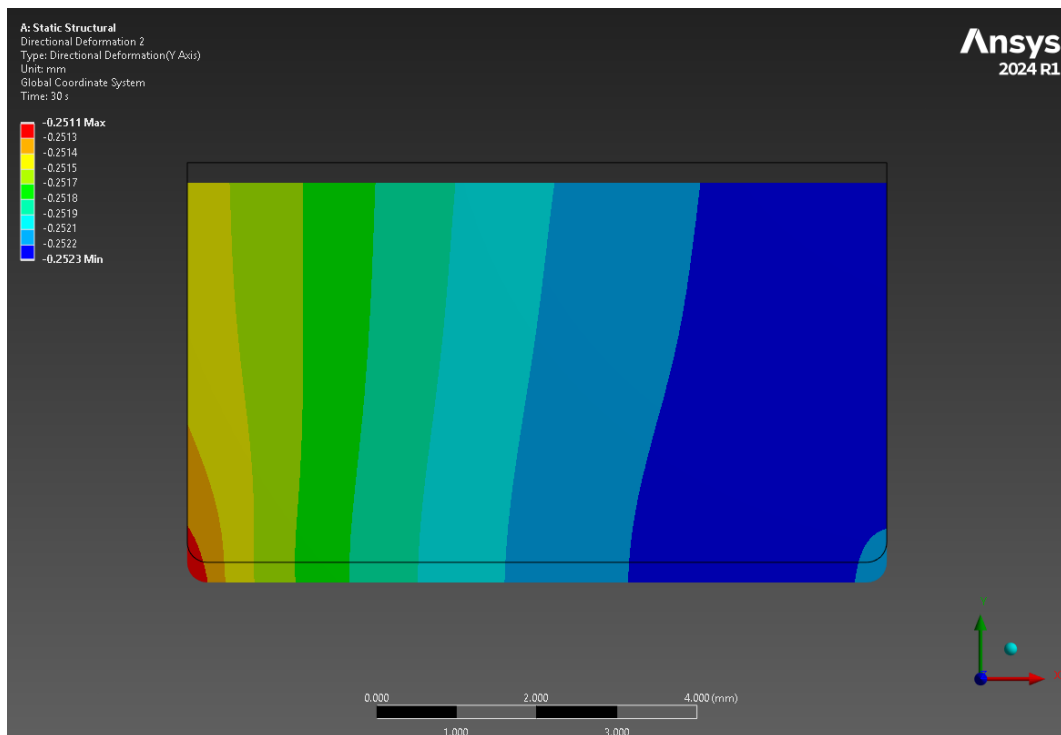


Figura 5.24 Desplazamiento de la arandela de compresión. Modelo FKM-90 a 23°C.

Del análisis se concluye que la presión de sellado alcanza un valor aproximado de 30 MPa y el desplazamiento en la dirección Y de la arandela es de 0,252 mm.

5.3.4.2 FKM-90 a 100 °C

En esta etapa, se aplica al modelo el desplazamiento obtenido en la condición inicial a 23°C y se evalúa la presión de sellado resultante en las mismas superficies de contacto, considerando las propiedades del elastómero definidas para 100°C.

En la Figura 5.25 se observan las zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm, límite de la primera recta de aproximación para el modelo bilineal.

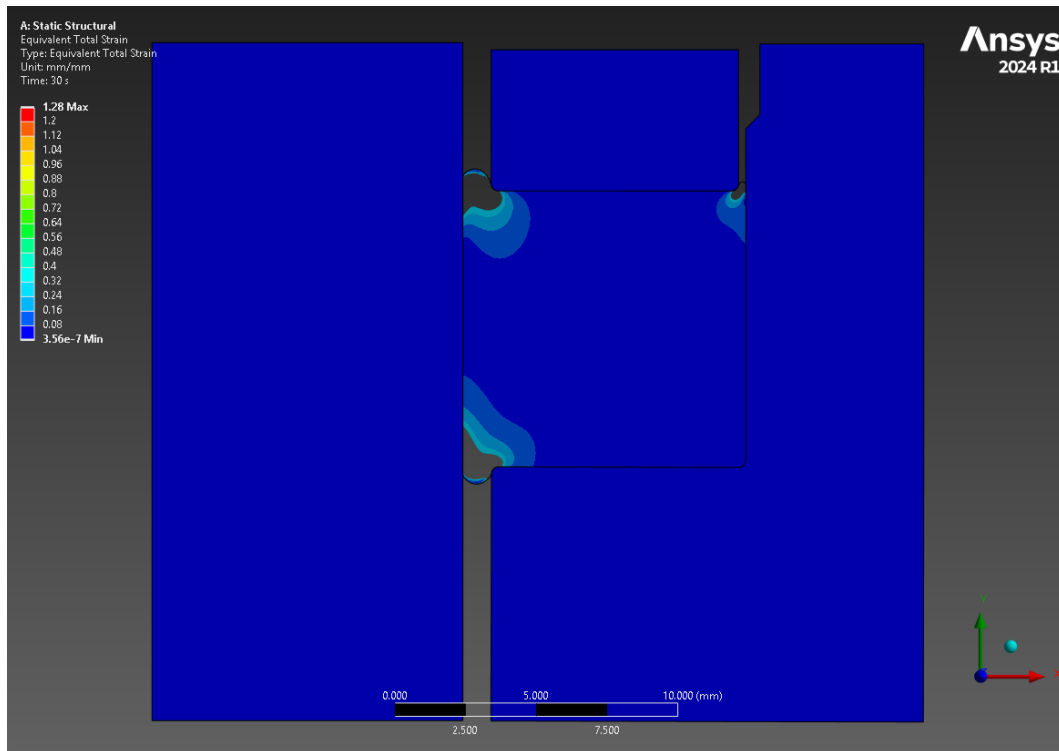


Figura 5.25 Zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm. Modelo FKM-90 a 100°C.

En la Figura 5.26 y la Figura 5.27 se observan las zonas donde la presión de sellado es superior a 25 MPa.

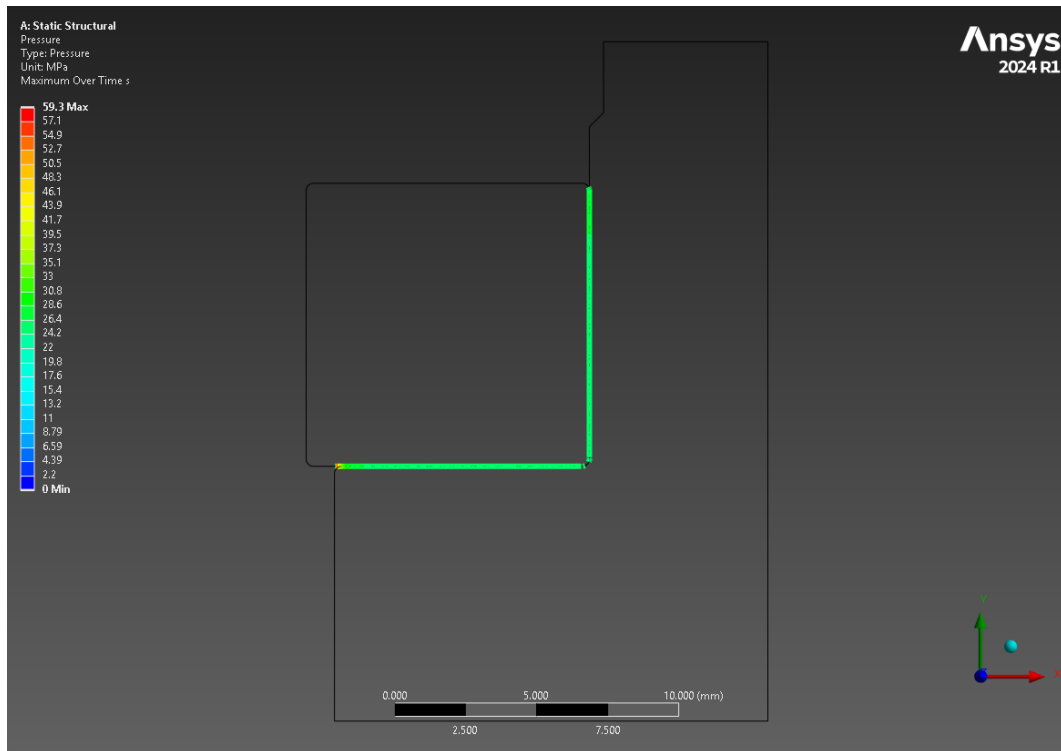


Figura 5.26 Presión de sellado entre goma y soporte de sello, se muestran zonas con valores mayores a 25 MPa. Modelo FKM-90 a 100°C.

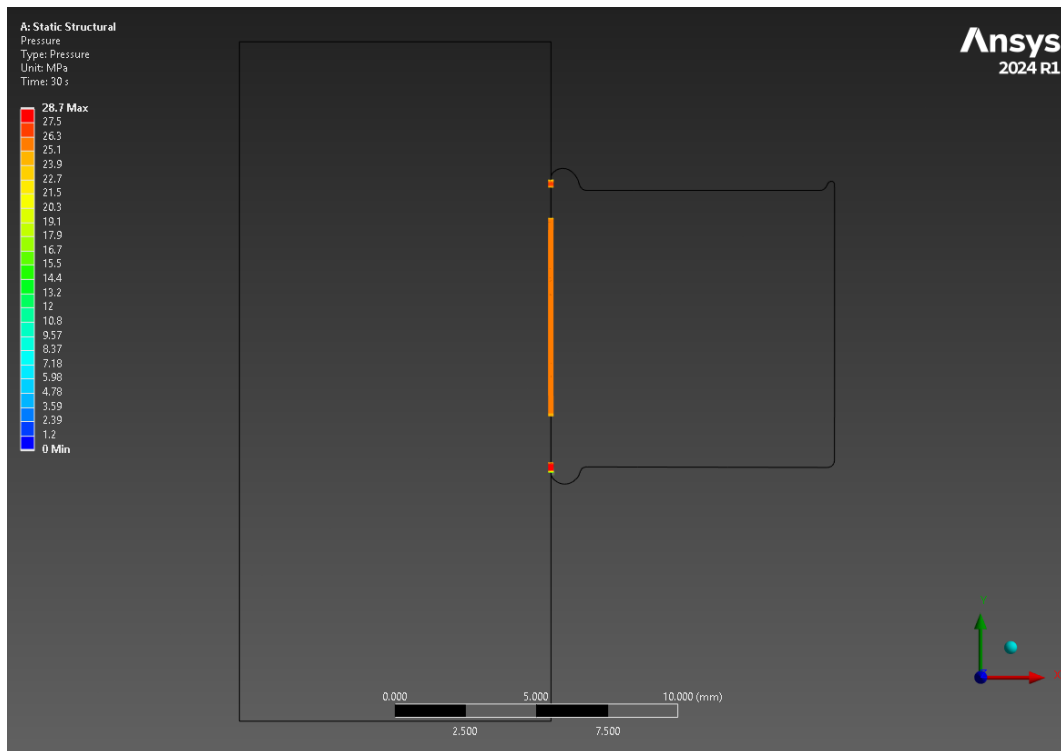


Figura 5.27 Presión de sellado entre goma y varilla, se muestran zonas con valores mayores a 25 MPa. Modelo FKM-90 a 100°C.

La presión de sellado disminuyó a 25 MPa (respecto del caso a 23°), manteniendo la deformación dentro del rango aceptable, lo que confirma la capacidad del sistema para conservar la estanqueidad bajo condiciones térmicas moderadas.

5.3.4.3 FKM-90 a 175 C

En esta etapa, se aplica al modelo el desplazamiento obtenido en la condición inicial a 23°C y se evalúa la presión de sellado resultante en las mismas superficies de contacto, considerando las propiedades del elastómero definidas para 175°C.

En la Figura 5.28 se observan las zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm, límite de la primera recta de aproximación para el modelo bilineal.

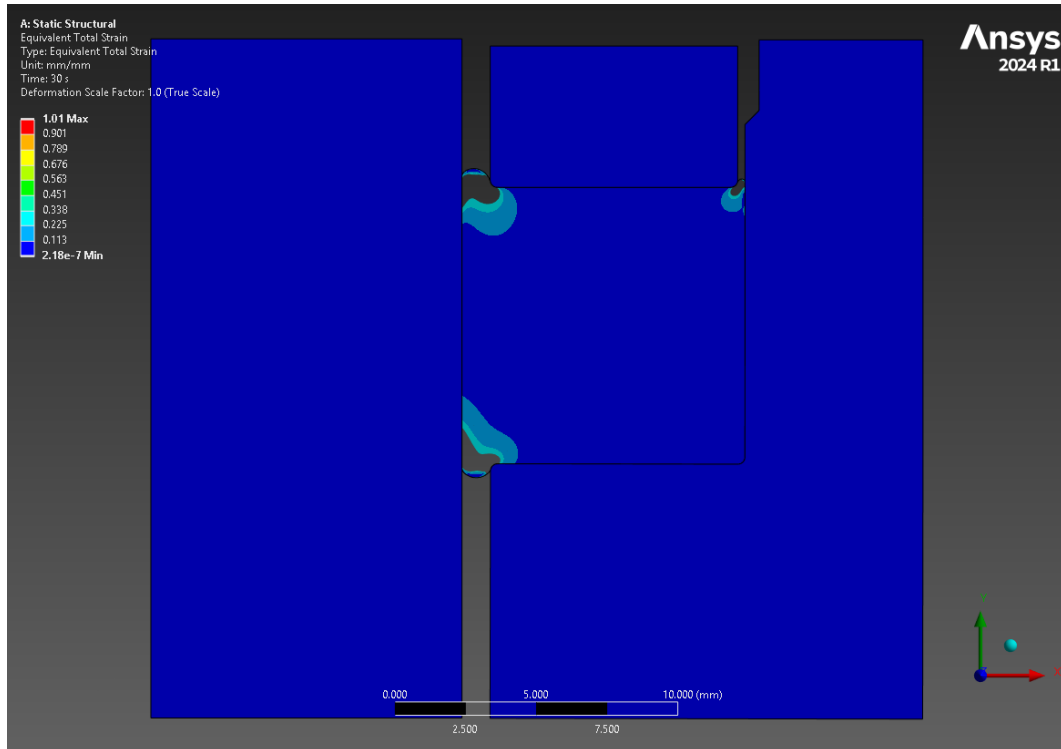


Figura 5.28 Zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm. Modelo FKM-90 a 175°C.

En la Figura 5.29 y la Figura 5.30 se observan las zonas donde la presión de sellado es superior a 20 MPa.

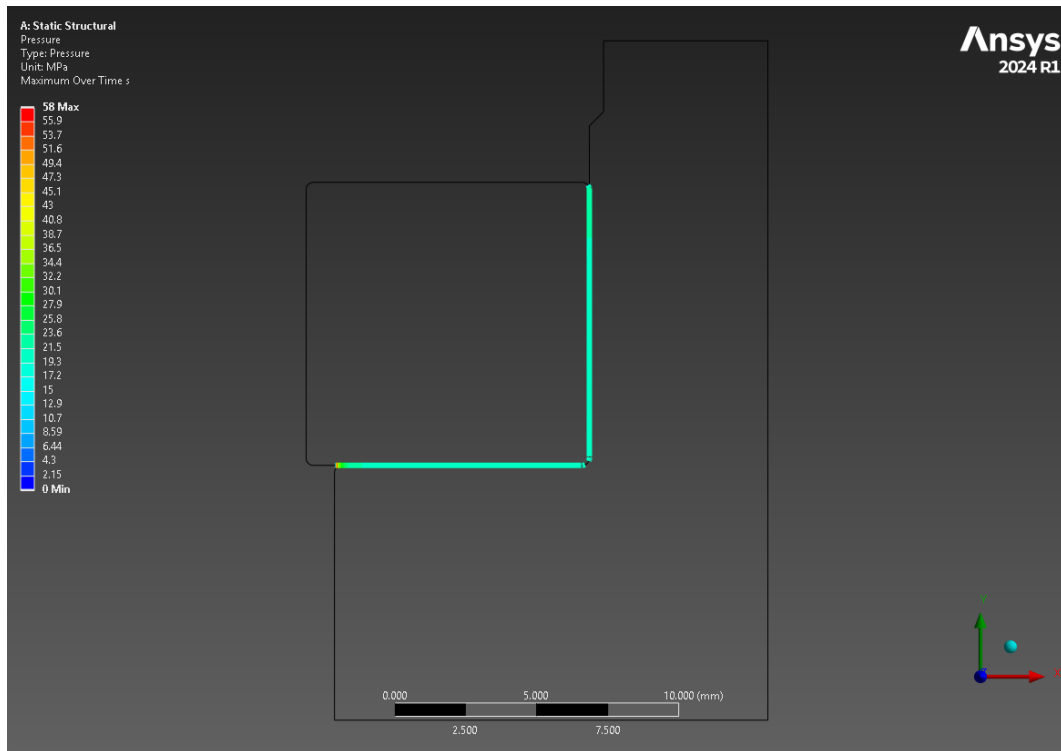


Figura 5.29 Presión de sellado entre goma y soporte de sello, se muestran zonas con valores mayores a 20 MPa. Modelo FKM-90 a 175°C.

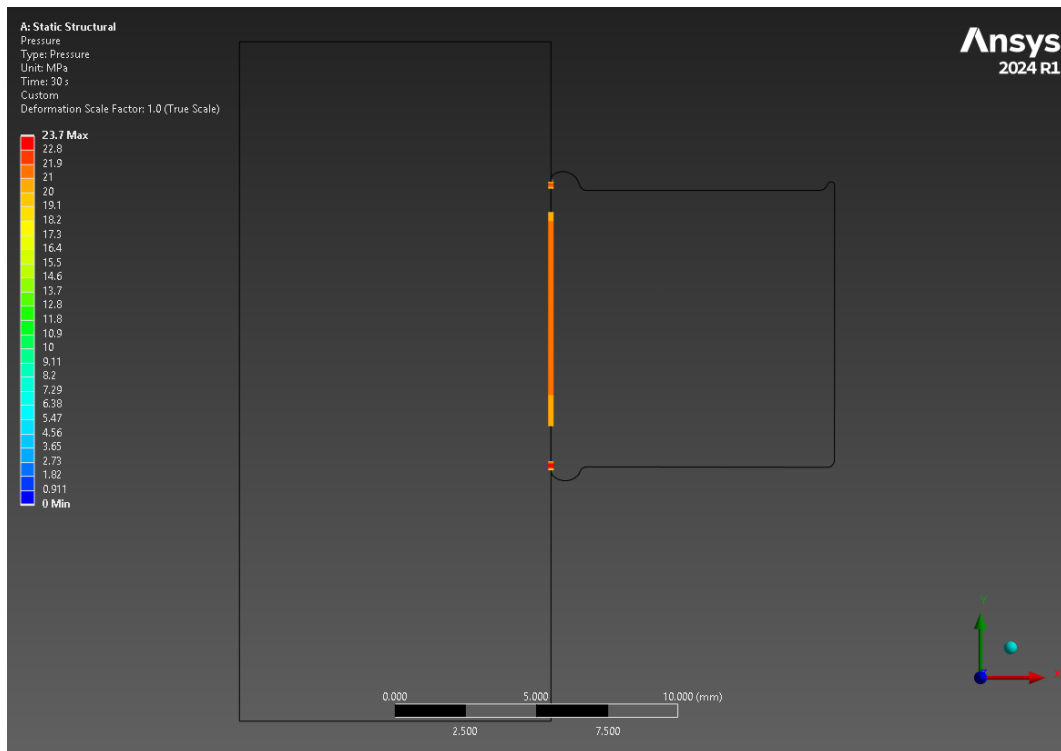


Figura 5.30 Presión de sellado entre goma y varilla, se muestran zonas con valores mayores a 20 MPa. Modelo FKM-90 a 175°C.

La presión de sellado a 175°C se redujo a 20 MPa, valor que, si bien es inferior a la inicial, continúa cumpliendo el criterio de diseño (presión de contacto $\geq 2 \times$

presión de operación), asegurando la funcionalidad del sistema en aún en condiciones extremas.

5.3.4.4 HNBR-90 a 100 °C

Finalmente haremos una comprobación similar con las propiedades del HNBR-90 a 100°C dado que es otra alternativa viable en algunas condiciones.

En la Figura 5.31 se observan las zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm, límite de la primera recta de aproximación para el modelo bilineal.

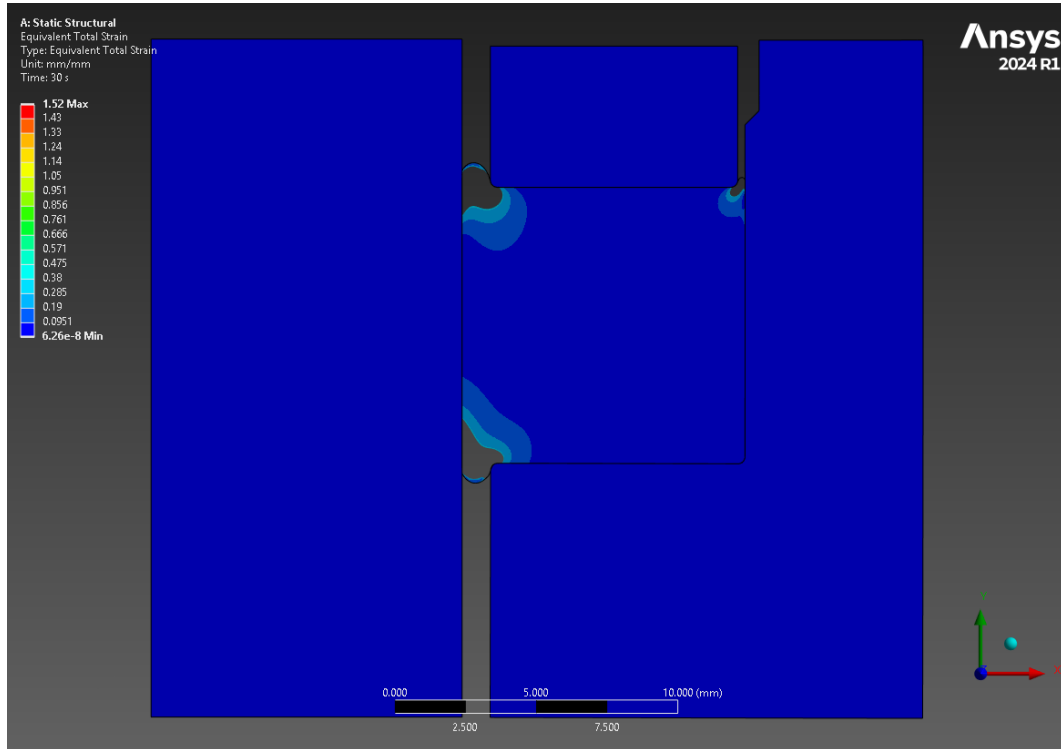


Figura 5.31 Zonas con deformación menor a 0,3 mm/mm. Modelo HNBR-90 a 100°C.

En la Figura 5.32 y la Figura 5.33 se observan las zonas donde la presión de sellado es superior a 24 MPa.

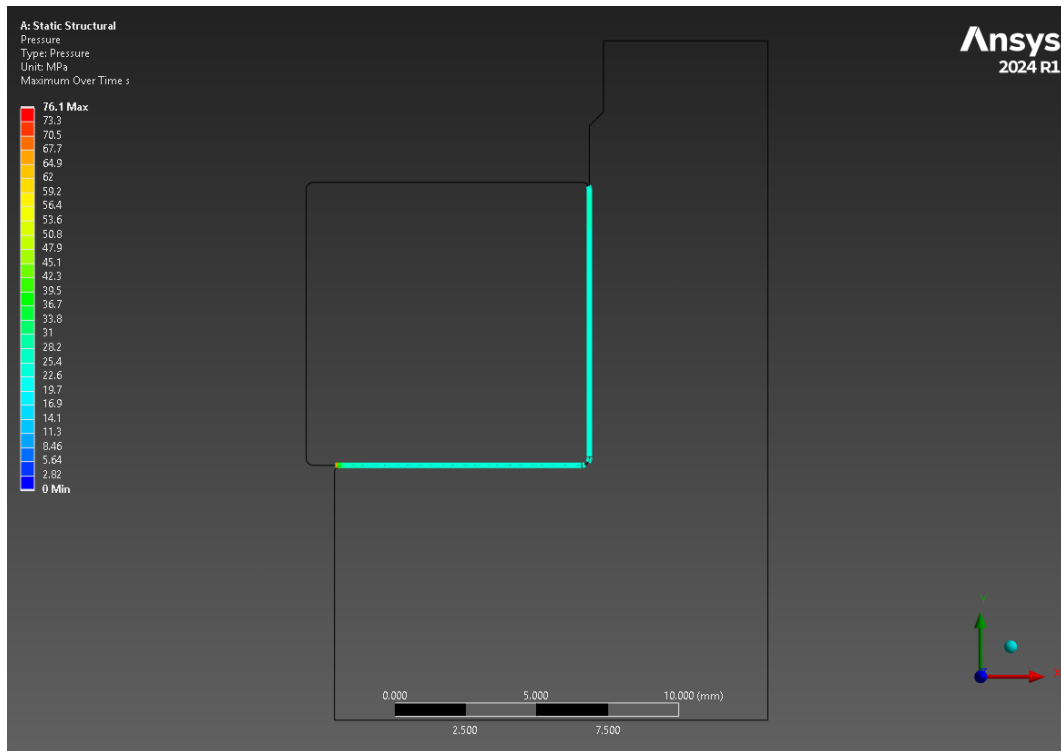


Figura 5.32 Presión de sellado entre goma y soporte de sello, se muestran zonas con valores mayores a 24 MPa. Modelo HNBR-90 a 100°C.

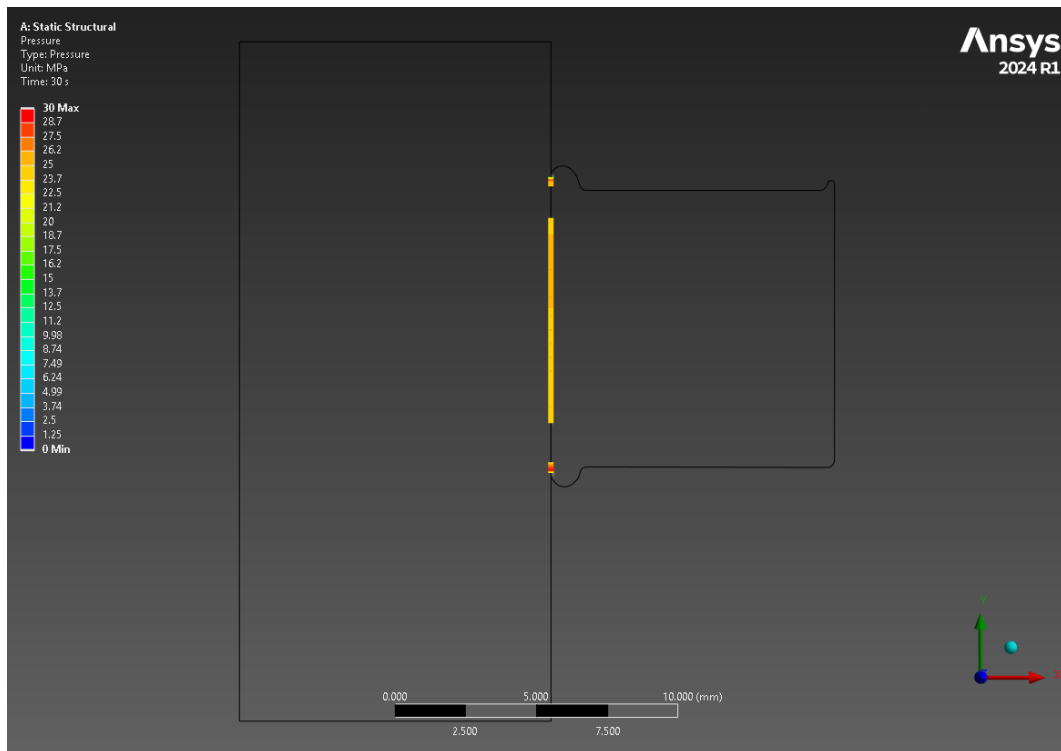


Figura 5.33 Presión de sellado entre goma y varilla, se muestran zonas con valores mayores a 24 MPa. Modelo HNBR-90 a 100°C.

La presión de sellado resulta de unos 24 MPa, valor similar al resultado del FKM-90 a 100°C. Si bien se trata de aproximaciones relativamente groseras del comportamiento de ambos elastómeros, los resultados son muy próximos.

5.3.4.5 Resumen general de resultados de sellado

A modo de síntesis, los resultados consolidados se presentan en la siguiente Tabla 5-1.

Modelo	Desplazamiento	Fuerza	Presión de sellado	Criterio de sellado
FKM-90 23 °C	0,252 mm	30 kN	30 MPa	Cumple
FKM-90 100 °C	0,252 mm	N/A	25 MPa	Cumple
FKM-90 175 °C	0,252 mm	N/A	20 MPa	Cumple
HNBR-90 100 °C	0,252 mm	N/A	24 MPa	Cumple

Tabla 5-1 Resumen de resultados del análisis de sellado. Criterio de sellado: presión de sellado mayor o igual al doble de la presión de operación.

Los resultados obtenidos permiten verificar que en todos los casos evaluados se cumplen los criterios planteados.

Además, que el comportamiento del HNBR-90 no difiere significativamente del observado para el FKM-90. Esta concordancia indica que este material podría emplearse en el mismo dispositivo sin comprometer la funcionalidad, cumpliendo con los requerimientos de presión de sellado y deformación establecidos en el diseño.

Esta conclusión refuerza la viabilidad de considerar alternativas elastoméricas en futuras iteraciones del diseño, siempre que se mantengan dentro del rango de propiedades mecánicas y analizadas en este estudio.

5.4 Análisis de sujeción

El objetivo principal es garantizar que la presión de contacto entre las cuñas y la varilla sea suficiente para generar una fuerza de fricción capaz de contrarrestar el empuje inducido por la presión interna del fluido.

Teniendo en cuenta que la varilla posee un diámetro de 22 mm, su sección transversal es de aproximadamente 380 mm². Bajo una presión de operación de 10 MPa, el empuje resultante sobre la varilla alcanza los 3.800 N.

Por otro lado, cada cuña presenta un área de contacto de 330 mm². Con estos datos y teniendo en cuenta un coeficiente de roce de 0,2 (ver 5.2.4), se determinó que la presión de sujeción en la interfaz cuñas/varilla debe ser, como mínimo, de 29 MPa para garantizar la estabilidad del sistema.

En este análisis se verifica la presión de sujeción y se obtiene la presión y reacción que serán aplicadas al análisis estructural.

5.4.1 Condiciones de carga y restricciones

En el modelo, la carga aplicada se definió como un desplazamiento controlado de 0,015 mm sobre las cuñas, con el objetivo de generar la presión de contacto requerida para sostener el empuje mencionado.

En cuanto a las restricciones, se consideró la zona roscada y la cara inferior del segmento de la varilla como soportes fijos, restringiendo todos sus grados de libertad. La carga y sus restricciones pueden verse en la Figura 5.34 donde se observa el dominio del análisis en corte para una mejor interpretación.

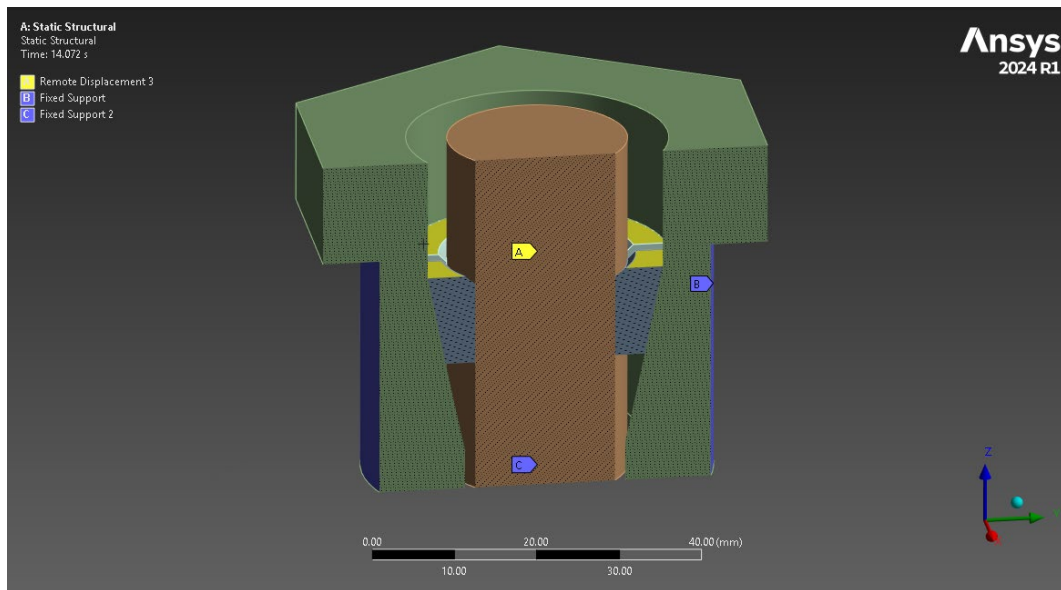


Figura 5.34 Cargas aplicadas al modelo de sujeción. A: superficie a la que se ejerce un desplazamiento de 0,015 mm. B y C superficies restringidas.

5.4.2 Características y malla

En cuanto a los contactos, todos los puntos de interacción entre las cuñas, el sensor y el tapón de sello fueron modelados como *frictional*, ver Figura 5.35. Esta configuración busca representar adecuadamente el comportamiento real del sistema bajo condiciones de apriete.

En la Figura 5.36 se pueden ver las herramientas de control de malla utilizadas y las superficies a las que fueron aplicadas.

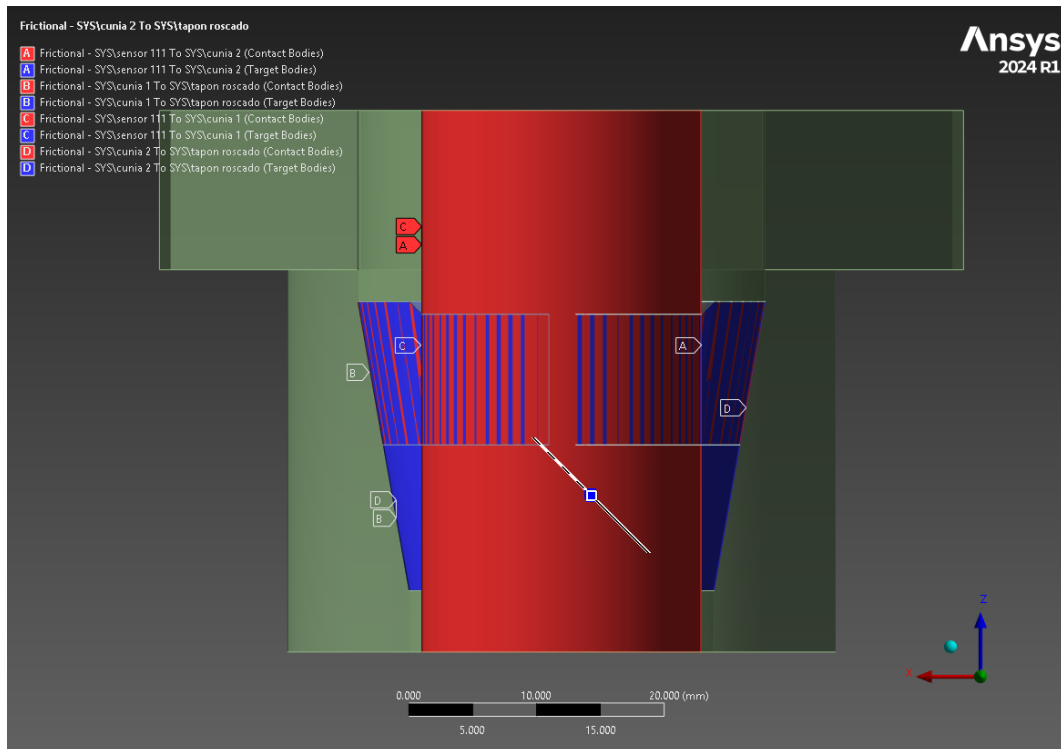


Figura 5.35 Vista en corte del modelo simplificado de sujeción. Se pueden ver todos los contactos aplicados, todos del tipo frictional con un coeficiente de roce de 0,2 [47].

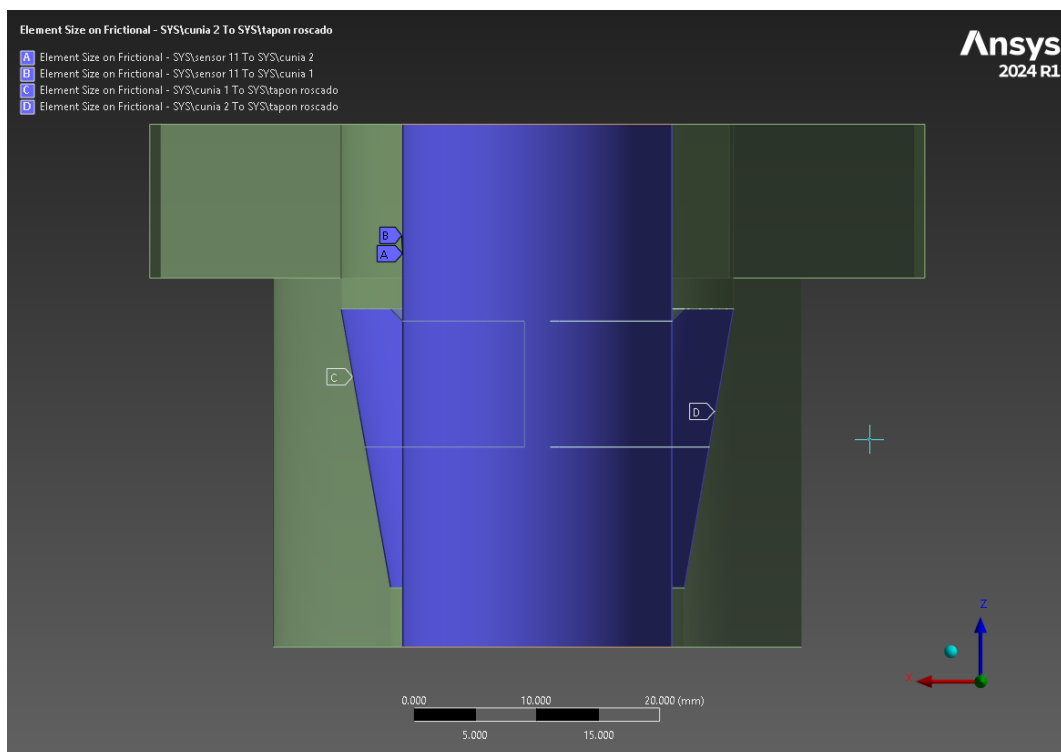


Figura 5.36 vista en corte del modelo simplificado de sujeción. La herramienta utilizada para refinar la malla fue el contact sizing en todos los contactos previamente definidos.

Con este control de malla se obtuvo la malla final observada en la Figura 5.37.

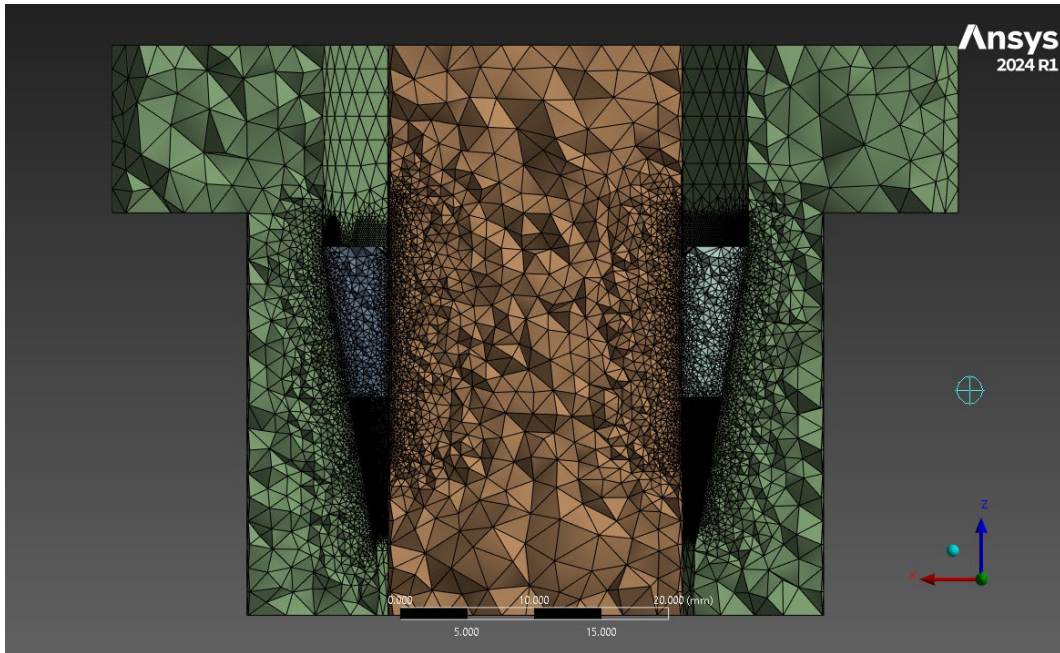


Figura 5.37 Vista en corte con elementos enteros para facilitar la interpretación. Resultado final de mallado.

Que según la métrica compuesta de calidad de Ansys resulta aceptable (Figura 5.38).

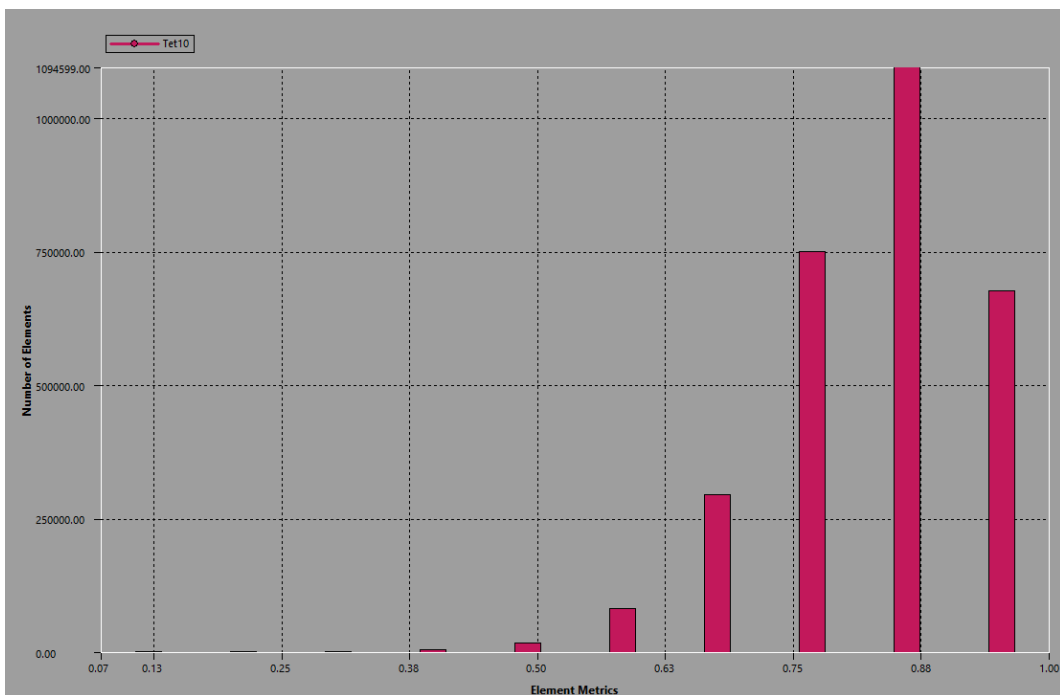


Figura 5.38 Distribución de calidad de elementos según métrica compuesta de calidad de Ansys.

5.4.3 Resultados del modelo de sujeción

En la Figura 5.39 se presentan los resultados del modelado de sujeción para la condición final de mallado, mostrando la distribución de la presión de contacto entre la varilla y las cuñas.

Se observa un comportamiento uniforme en la zona media, mientras que en los vértices aparecen tensiones localizadas extremadamente altas. Este fenómeno es característico de las concentraciones en bordes y singularidades propias del método, que no afectan la interpretación global del análisis y no se profundiza en su estudio.

El valor medio obtenido, 35 MPa, supera el mínimo requerido de 29 MPa para garantizar la sujeción de la varilla frente al empuje generado por la presión interna.

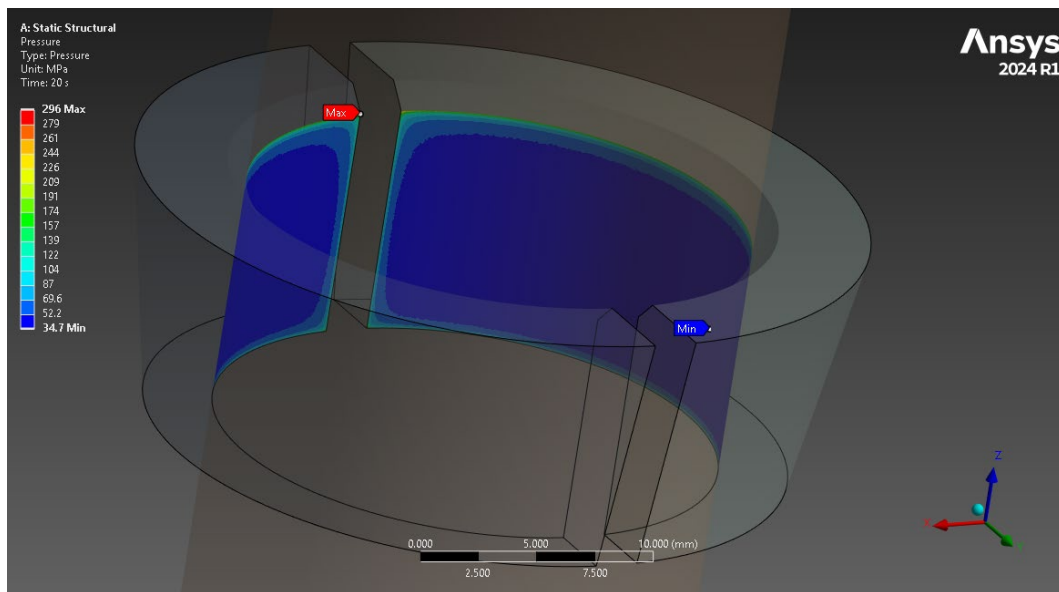


Figura 5.39 Presión de contacto entre varilla y cuñas. Se observa que la mayor parte de la superficie se encuentra en unos 35 MPa.

En la Figura 5.40 se muestra la presión de contacto sobre la superficie del tapón de sello. El valor mínimo registrado en la zona de apoyo es de aproximadamente 25 MPa; sin embargo, al considerar la región media y excluir los valores artificiales generados por las singularidades en los bordes —Figura 5.41—, se estima un valor promedio cercano a 30 MPa. Este resultado se encuentra en concordancia con el promedio global de todos los puntos, que incluyendo los valores artificiales alcanza 33 MPa.

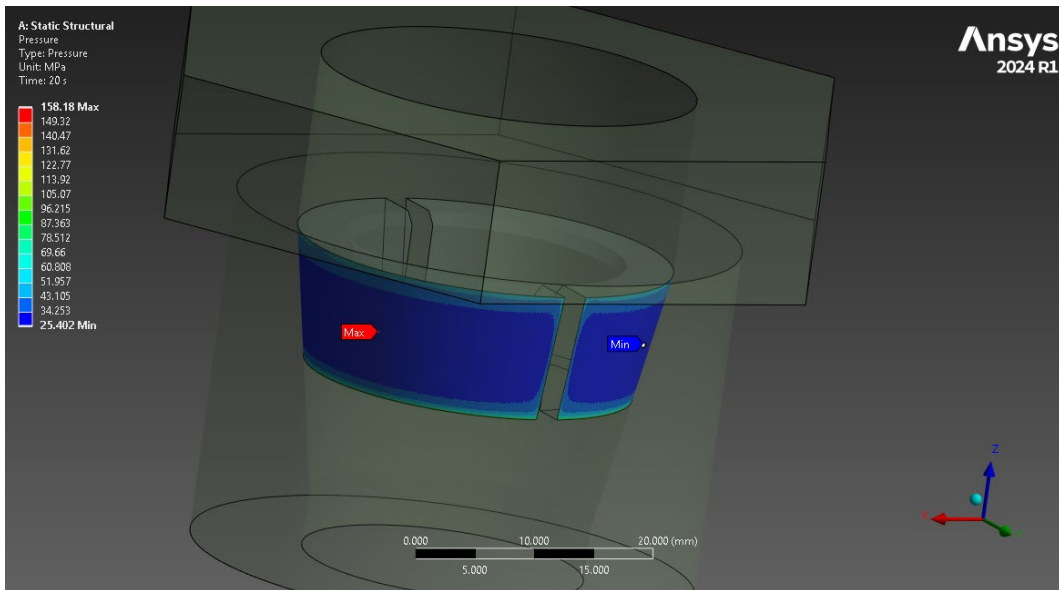


Figura 5.40 Presión de contacto entre cuñas y tapón de sello.

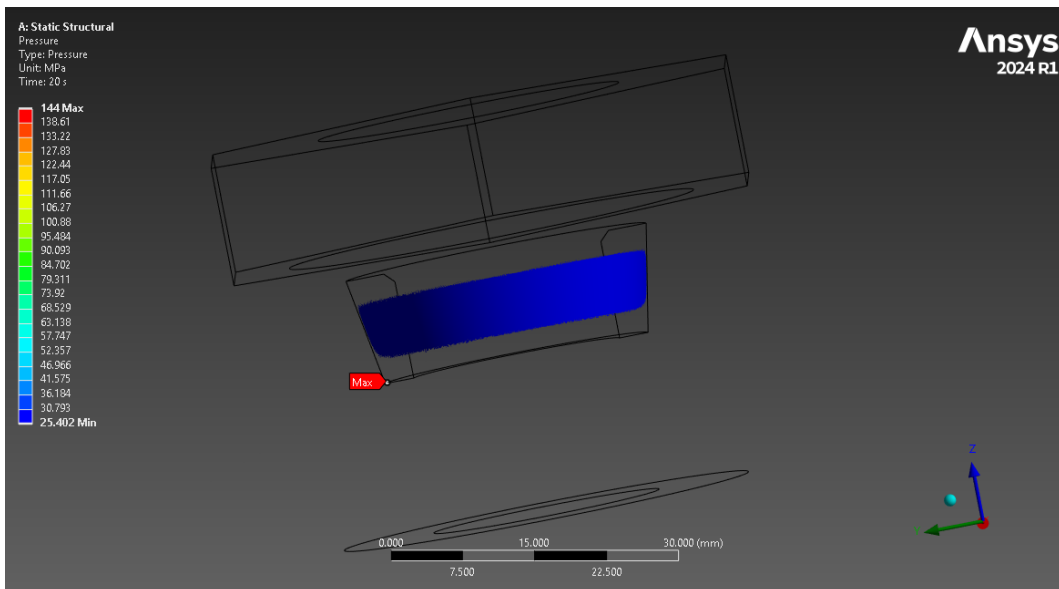


Figura 5.41 Presión de contacto entre cuña y tapón de sello. Zona con presiones entre 25 y 30 MPa.

Finalmente, dado que en el análisis estructural se aplicará sobre la superficie de apoyo entre el tapón sujetador y las cuñas la reacción obtenida del desplazamiento de estas últimas, se realizó un análisis de convergencia para validar dicho valor.

Para el análisis de convergencia se refinó progresivamente la malla y se obtuvo la solución. El detalle de la herramienta de mallado utilizada, el parámetro de control aplicado y la cantidad de elementos se puede observar en la Tabla 5-2.

Los resultados de máxima reacción de cada solución y la cantidad de elementos se representan en la Figura 5.42.

Solución	Contact size, mm	Elementos
1	-	42 225
2	1,5	59 944
3	1	123 926
4	0,75	202 717
5	0,5	478 704
6	0,4	708 181
7	0,3	1 455 997
8	0,2	2 912 836

Tabla 5-2 Control de malla utilizado en cada solución y cantidad de elementos obtenidos.

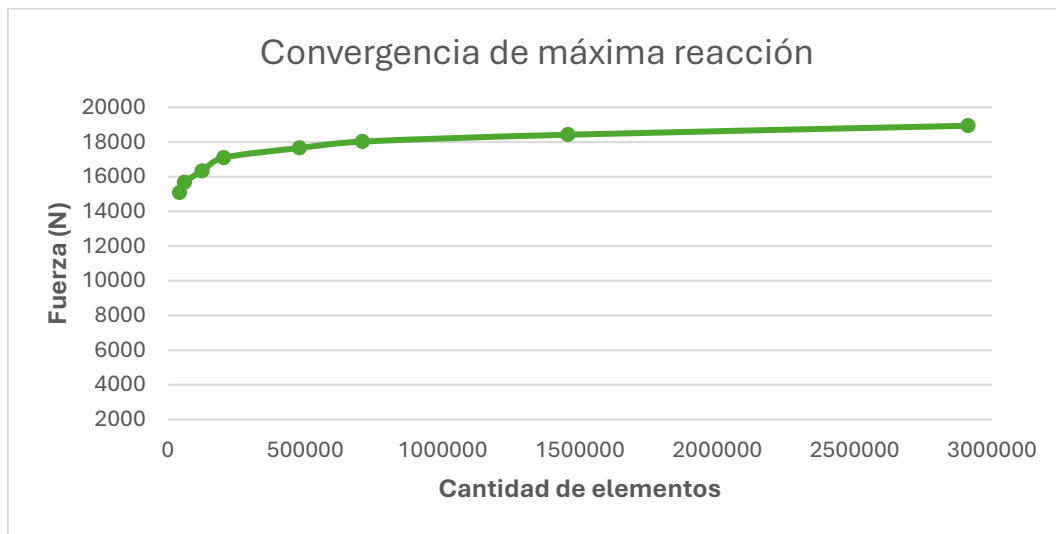


Figura 5.42 Análisis de convergencia de reacción.

El análisis muestra que la reacción converge alrededor de 19 kN; no obstante, para efectos de diseño se adopta un valor de 20 kN, el cual será aplicado en la superficie de contacto de las cuñas durante la verificación del tapón de sello en la etapa siguiente.

5.4.3.1 Resumen general de resultados de sujeción

A modo de síntesis, los resultados consolidados se presentan en la Tabla 5-3.

Modelo	Resultado	Criterio de sujeción
Presión de sujeción	35 MPa	Cumple
Presión de contacto	30 MPa	-
Reacción	20 kN	-

Tabla 5-3 Resumen de resultados del análisis de sujeción.

De los resultados obtenidos podemos concluir preliminarmente que el sistema de sujeción cumple con lo propuesto.

Además, se obtuvieron las cargas para el análisis estructural.

5.5 Análisis estructural

A continuación, se exponen los resultados del análisis estructural del modelo final —es decir, el análisis del límite de presión y de los elementos que soportan las cargas generadas por el sistema de sellado y sujeción— y que tienen como objetivo la verificación del cumplimiento de los criterios de diseño establecidos por el código ASME.

5.5.1 Condiciones de carga y restricciones

Las cargas aplicadas al análisis son las siguientes:

- *Presión de operación:* 100 kg/cm² (≈10 MPa).
- *Presión de sellado:* la presión máxima ejercida por el elastómero, estimada en 30 MPa.
- *Reacción de sellado:* la fuerza generada por el sistema de sellado sobre la arandela de compresión y transferida al tapón de sello, estimada en 30 kN.
- *Presión de sujeción:* la presión ejercida por las cuñas sobre el tapón de sello, estimada en 30 MPa.
- *Reacción de sujeción:* la fuerza generada por el sistema de sujeción, de 20 kN.
- *Presión de bridado:* para determinar la presión máxima admisible en la unión bridada, se analizó el conjunto formado por bridas, junta y espárragos, identificando el factor limitante según las referencias [47] y [48]. El límite está definido por la capacidad de los espárragos ASTM A-193 Grado B7 —especificación típica para este tipo de condiciones—. Para una brida 4" serie 600 se requieren espárragos de 7/8", recomendándose un apriete equivalente al 70 % de su tensión de fluencia. Considerando que la tensión de fluencia es de 720 MPa, la tensión de apriete resulta en 504 MPa, y con un área en la raíz de 271 mm², la carga total distribuida sobre la superficie de resalto de la brida equivale aproximadamente a 100 MPa.

En cuanto a las restricciones del modelo, se impuso desplazamiento nulo en la dirección del eje y (perpendicular a la superficie) sobre una de las caras de asiento de la brida. Asimismo, se anuló el desplazamiento en la dirección perpendicular a los planos de simetría y también se restringieron las rotaciones en ambas caras de dicha simetría.

Las cargas definidas representan la condición de operación. Recordando el factor de carga general del código ASME ($\beta = 2,4$), las cargas de diseño adoptadas se presentan en la Tabla 5-4. En la Figura 5.43 se representan estas cargas y en la Figura 5.44 se indica la secuencia de aplicación de cada una.

Carga	Valor de operación	Valor de diseño
Presión de bridado (MPa) - A	100	240
Presión interna (MPa) - B	10	24
Presión sello/base (MPa) - F	30	72
Fuerza sello/arandela (kN) - I	30	72
Presión cuñas o sujetadores/tapón de sello (MPa) - G	30	72
Fuerza cuñas/tapón sujetador (MPa) - H	20	48

Tabla 5-4 Resumen de cargas de operación y cargas de diseño. Ver referencia alfabética en Figura 5.44.

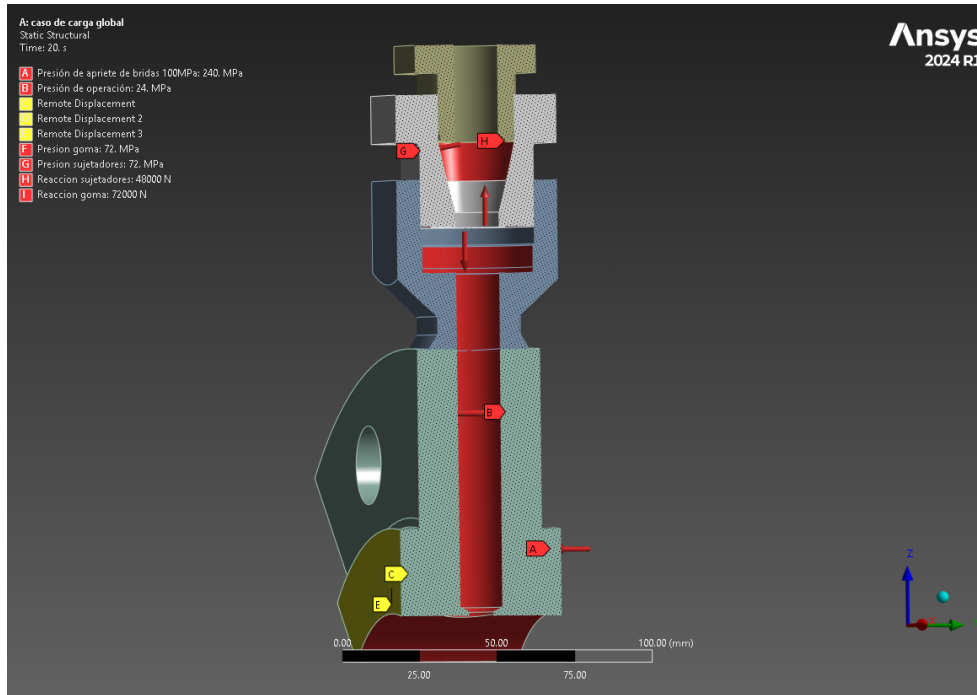


Figura 5.43 Vista en corte de las cargas y restricciones aplicadas. C, D y E son las restricciones de rotación y desplazamiento, resto ver referencias en la Tabla 5-3.

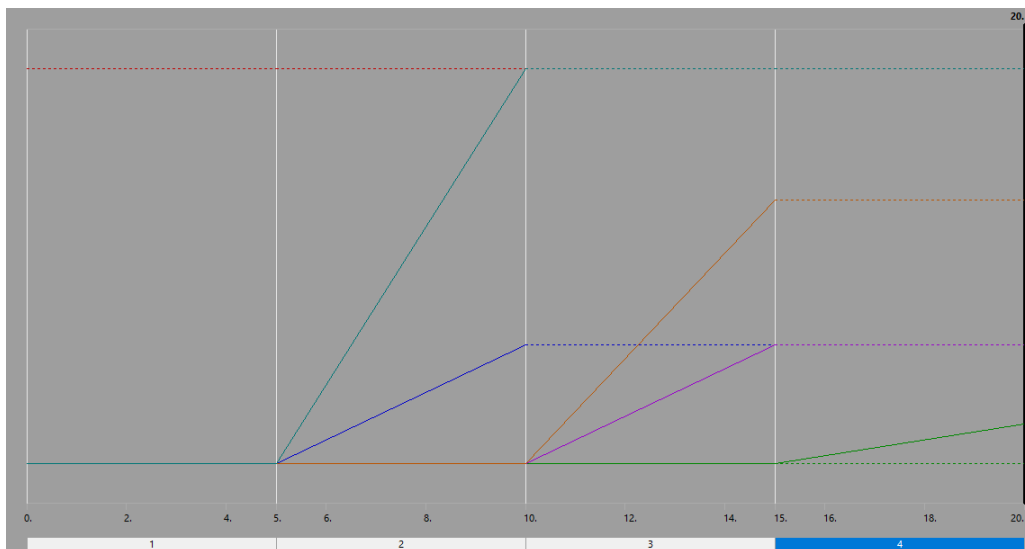


Figura 5.44 Representación de Ansys del esquema de aplicación de cargas. Paso 1 carga A, paso 2 cargas E y F, paso 3 cargas G y H, paso 4 carga B.

La aplicación de las cargas se realizó en cuatro etapas —ver Figura 5.44—, con intervalos de 5 segundos cada una, estas son:

1. Presión de bridado.
2. Presión y fuerza de sellado.
3. Presión y fuerza de sujeción mecánica.
4. Presión de operación.

Cargas despreciadas: se consideró irrelevante la contribución del peso propio del dispositivo y la columna de líquido, dado que su efecto es insignificante frente a las sollicitaciones principales.

Contactos: los únicos contactos considerados son los que corresponden a la zona roscada y son del tipo *bonded* (Figura 5.45).

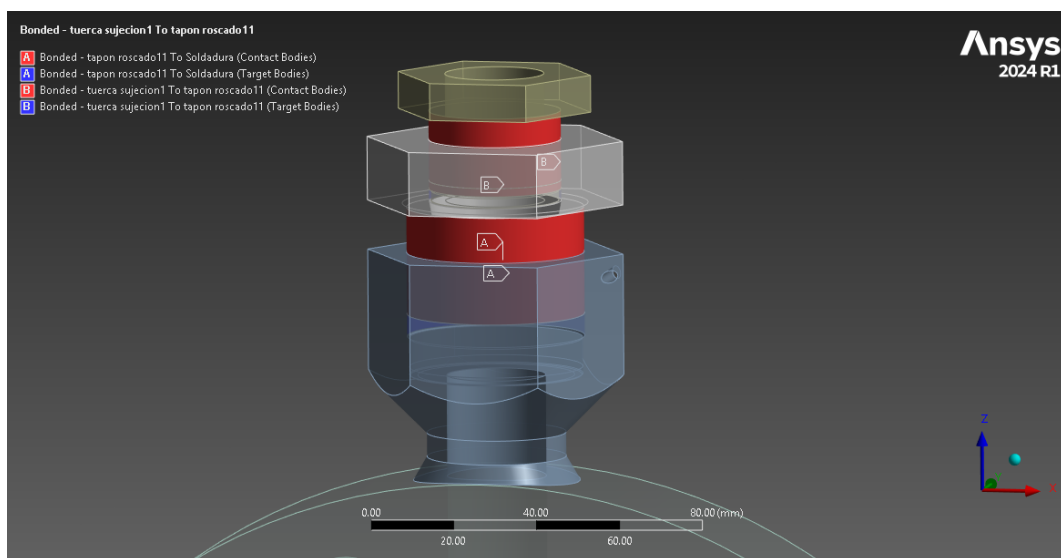


Figura 5.45 Contactos tipo *bonded* entre tapón de sello/soporte de sello y tapón sujetador/tapón de sello.

5.5.2 Evaluación de los criterios de aceptación del código ASME

Para la evaluación, el análisis se dividió en las siguientes partes:

Brida: corresponde al anillo, modelado como un cuarto de su circunferencia aprovechando la simetría del sistema.

Soporte de sello: base del sistema de sellado, sobre la cual se aplica la presión del elastómero.

Tapón de sello: tapón de sello que comprime el elastómero y sirve de apoyo y guía para las cuñas o sujetadores.

Tapón de sujeción: tapón del sistema de sujeción, encargado de transmitir la carga al par de cuñas.

No obstante, el modelo global incluye todas las piezas que conforman el límite de presión y sus interacciones. Todas las cargas fueron aplicadas en cada análisis.

En la Tabla 5-5 se observa el resumen de las verificaciones a realizar para cumplir los criterios del código. El criterio definido por el usuario aplica solo al componente brida, mientras que los demás fueron evaluados en cada componente.

Criterio	Verificación
Elasto-plástico	El modelo <i>FEA</i> debe converger.
Definido por el usuario	Deformación en la cara de la brida <0,25 mm.
Falla local	Relación entre deformación plástica equivalente y deformación triaxial límite menor a 1.

Tabla 5-5 Resumen de criterios ASME a considerar.

5.5.3 Análisis de componente brida

5.5.3.1 Cargas en componente

Las cargas principales que actúan sobre el componente son la presión de bridado y la presión de operación o presión interna.

5.5.3.2 Características y malla

El mallado final del componente se muestra en la Figura 5.46 y la Figura 5.47, mientras que la distribución de calidad de los elementos según criterio compuesto de Ansys se presenta en la Figura 5.48.

El proceso de refinamiento del mallado se detalla en la Tabla 5-6, donde se especifican las zonas críticas y los controles aplicados. Estas zonas y controles se pueden ver representadas sobre el modelo en la Figura 5.49.

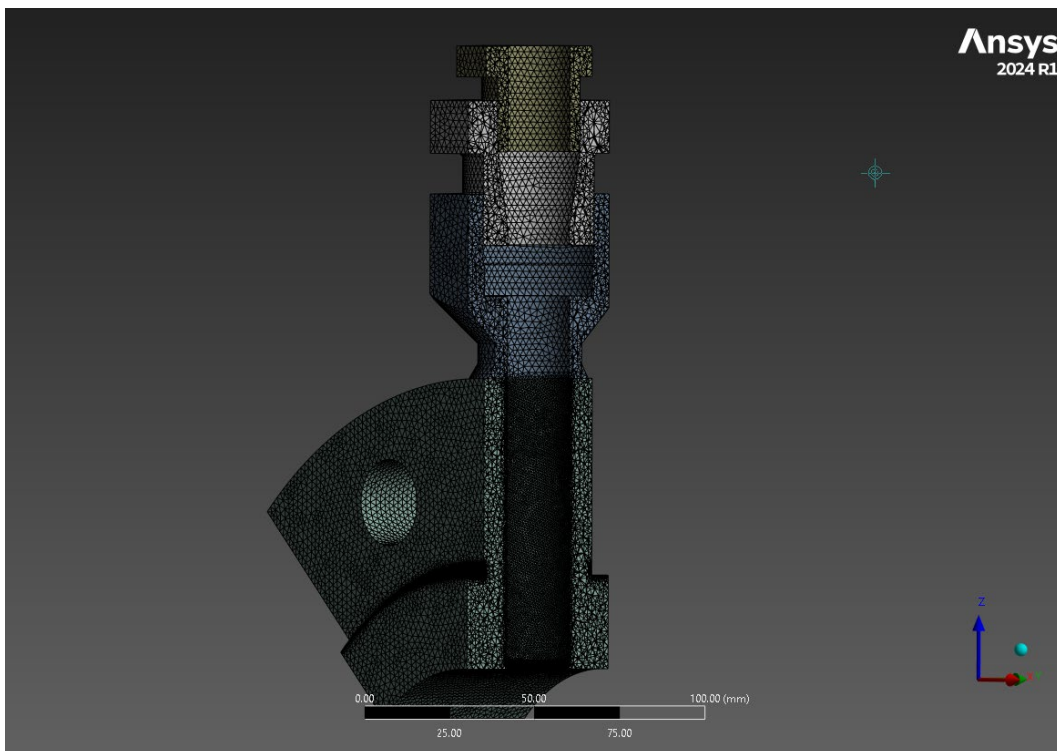


Figura 5.46 Vista de todas las piezas en corte, malla refinada en componente brida.

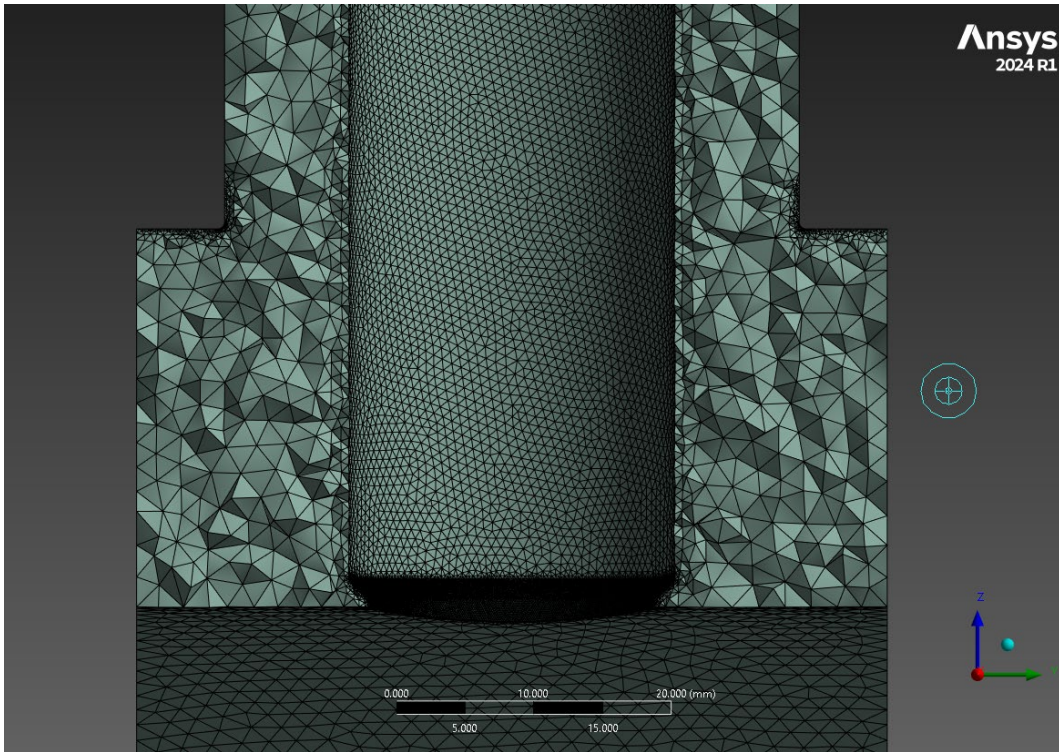


Figura 5.47 Vista en corte con topografía (elementos completos en plano de corte). Se ven las zonas refinadas del componente brida.

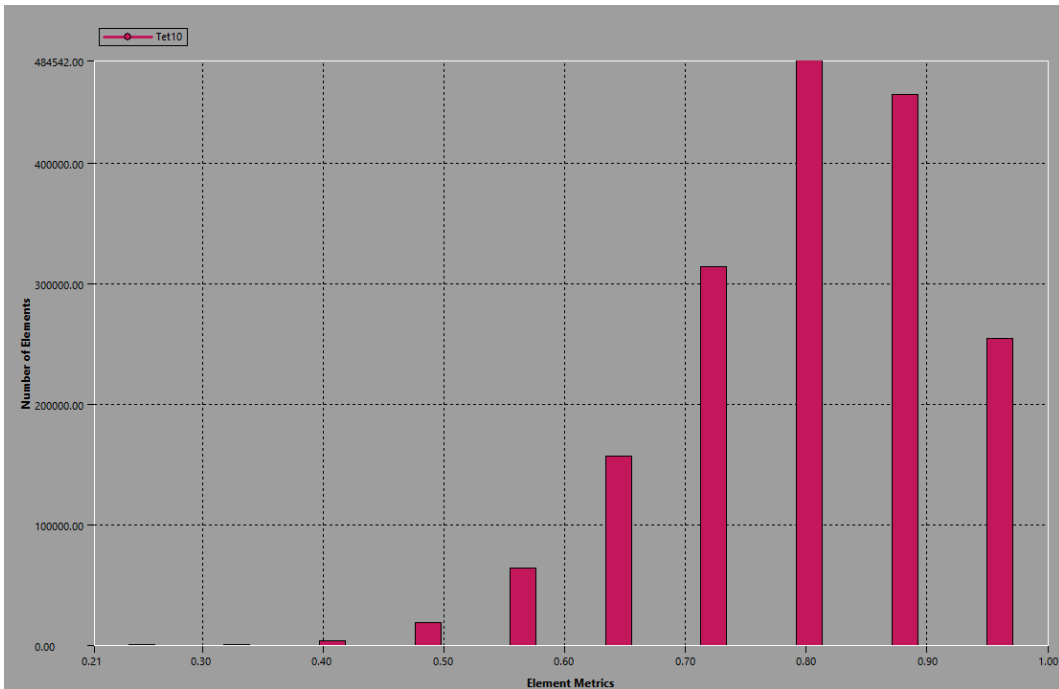


Figura 5.48 distribución de métrica compuesta de calidad Ansys.

Solución	Malla (mm)	Observaciones	Elementos
1	15	Aplicado a todo el modelo	1 764
2	10	Aplicado a todo el modelo	4 515
3	7	Aplicado a todo el modelo	11 269
4	5	Aplicado a todo el modelo	25 408
5	3	Aplicado a todo el modelo	78 837
6	3*	*A partir de este punto, el resto del modelo se fija en 5 mm y se ajusta únicamente la brida mediante sizing. RA, TA y SA 1 mm.	242 646
7	3*	RA y TA 0,25 mm SA 0,75 mm	405 557
8	3*	RA y TA 0,15 mm SA 0,5 mm	582 663
9	1,5*	RA y BLRA 0,1 mm SLRA 0,3 TA 0,15 mm y SA 0.75 mm	969 042
10	2*	RA 0,1 mm SLRA 0,2 mm TA 0,15 mm y SA 0,75 mm	1 640 317

Notas:

RA: superficie de ambos radios de acuerdo en la transición del resalto de cada cara de la brida. Control aplicado: Face Sizing.

BLRA: bordes laterales de los radios de acuerdo en la transición del resalto. Control aplicado: Edge Sizing.

SLRA: superficies laterales asociadas a los radios de acuerdo en la transición del resalto.

TA: tope del agujero, correspondiente a la zona del limitador de la varilla en configuración flush. Control aplicado: Face Sizing.

SA: superficie del agujero, excluyendo la zona del tope (TA). Control aplicado: Face Sizing.

Tabla 5-6 Control de malla utilizado en cada solución y cantidad de elementos obtenidos.

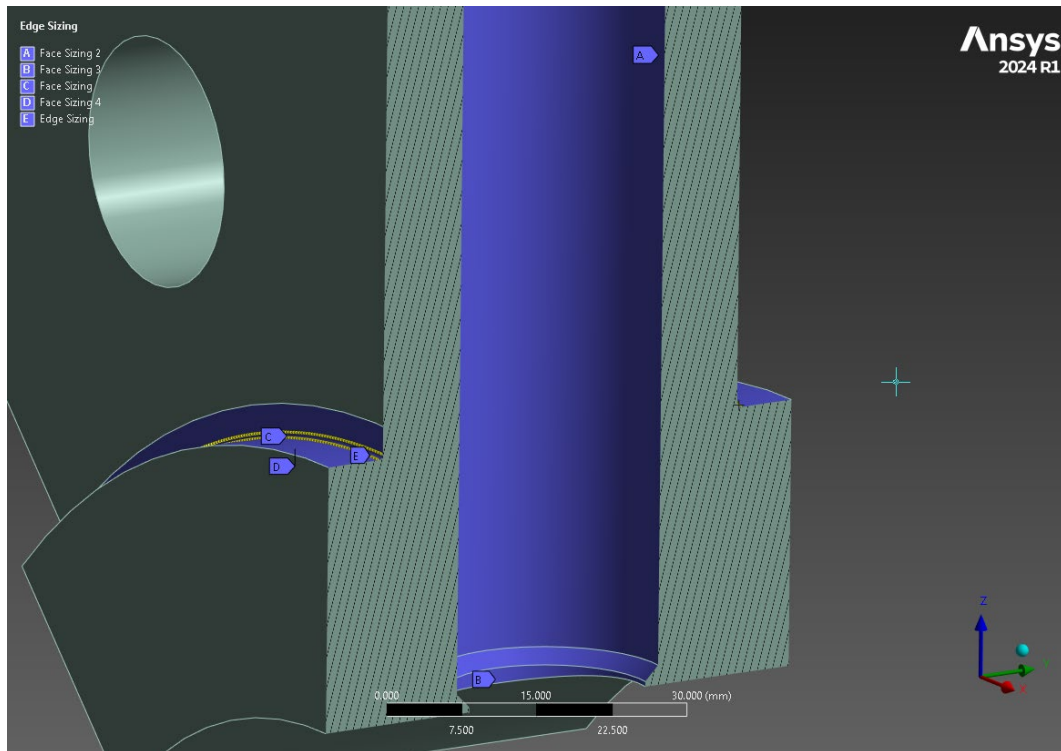


Figura 5.49 Vista en corte del componente brida donde, C es el radio de acuerdo “RA”, B son las superficies laterales del radio de acuerdo “SLRA” y E son los bordes laterales del radio de acuerdo o “BLRA” (líneas amarillas que delimitan la zona C de la D), B es el tope de agujero o “TA” y la zona uniforme por encima de B es la superficie del agujero o “SA”.

A continuación, se presentan los resultados considerados para los distintos criterios de evaluación del componente.

5.5.3.3 Criterio elasto-plástico en brida

En la Figura 5.50 se observa que el modelo converge, mientras que la Figura 5.51 presenta el análisis de convergencia realizado.

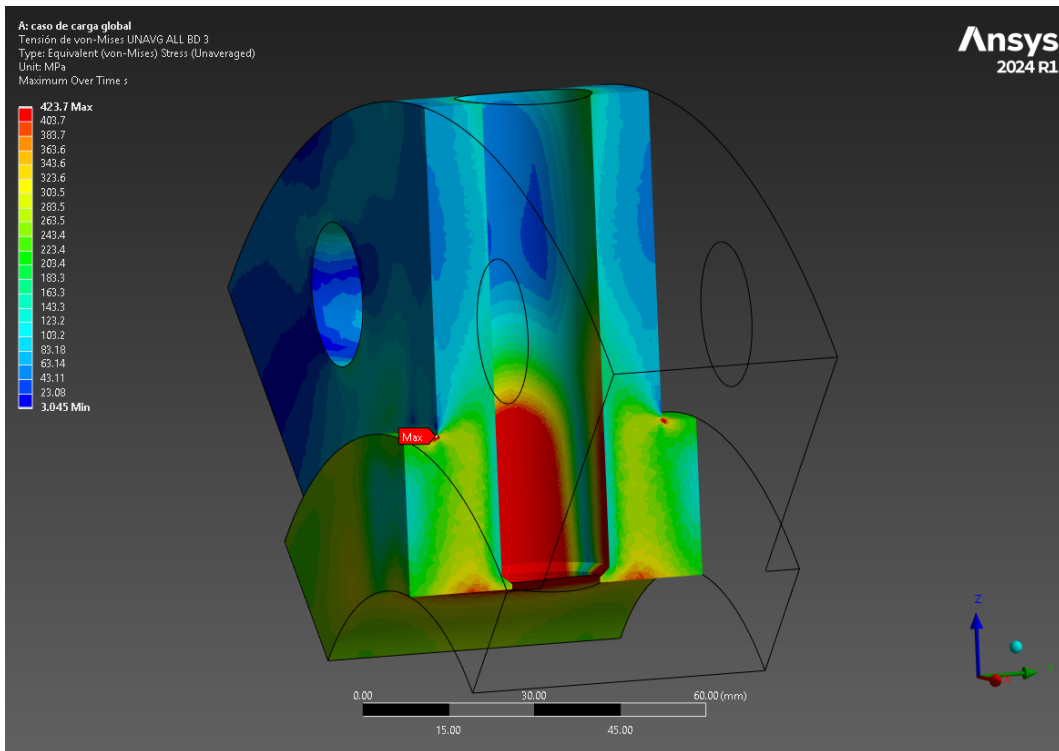


Figura 5.50 Componente brida en corte, se ve la zona de máxima tensión en radio de acuerdo del resalto de la brida. El modelo converge.

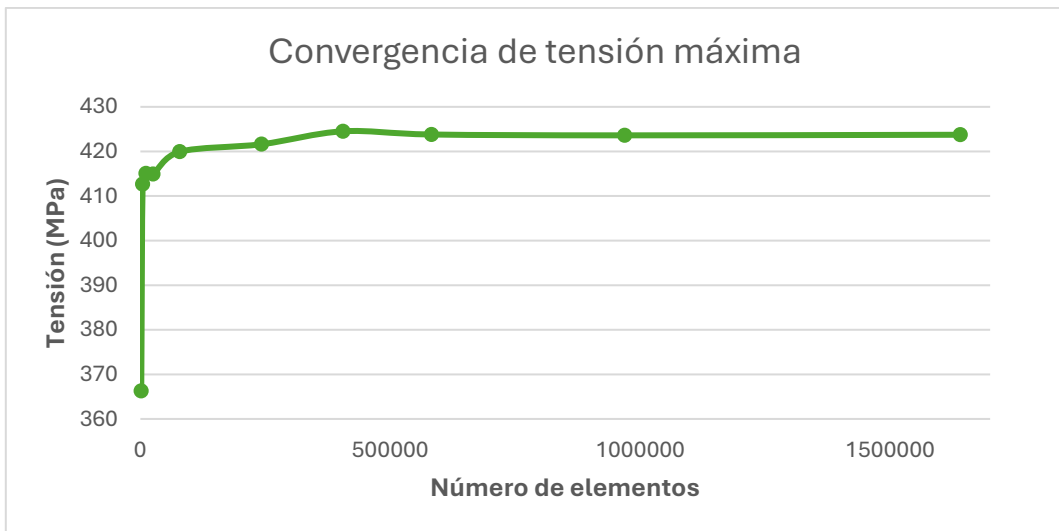


Figura 5.51 Analisis de convergencia de tensión máxima en componente brida.

En la Figura 5.51 se observa cómo, una vez que las dimensiones de la malla son del orden de las dimensiones del radio de acuerdo, las tensiones convergen.

5.5.3.4 Criterio definido por el usuario

Para este componente se estableció, además, un criterio definido por el usuario; la deformación máxima admisible en la superficie de asiento de la brida. Esta se evalúa como la deformación direccional máxima en el eje Y, dado que este parámetro es crítico para garantizar la planitud y el correcto sellado. En la Figura 5.52 podemos ver el resultado final de máxima deformación direccional en Y,

mientras que en la Figura 5.53 podemos ver el análisis de convergencia de este valor.

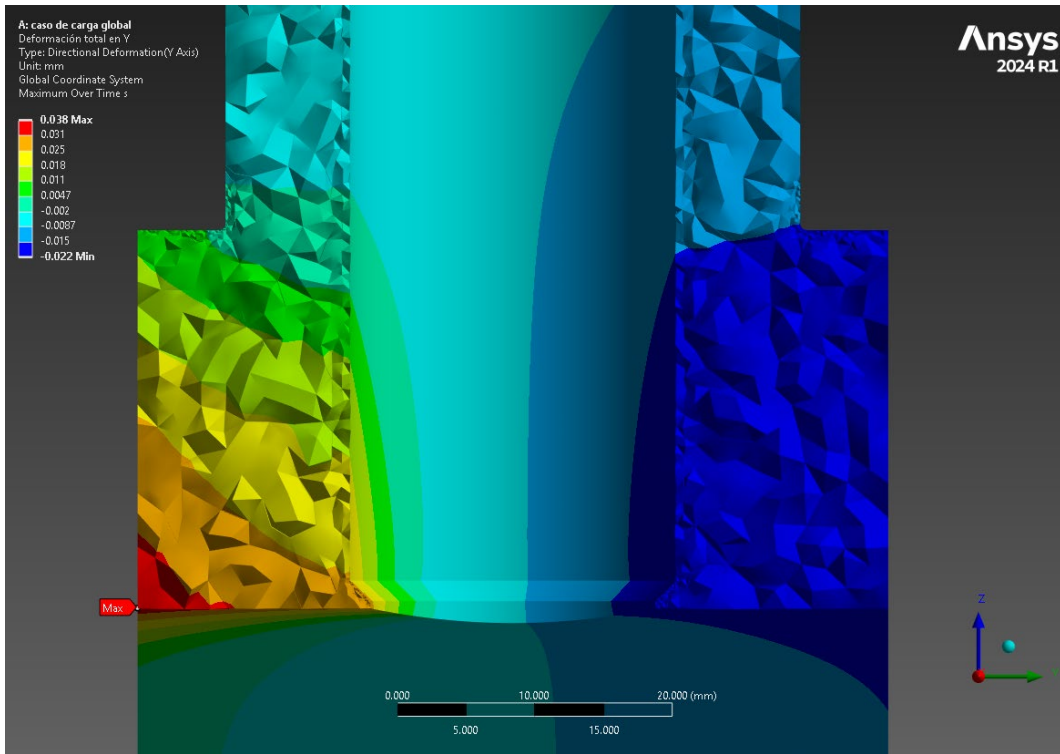


Figura 5.52 Componente brida en corte, se ve la zona de máxima deformación en la dirección Y del resalto de la brida.

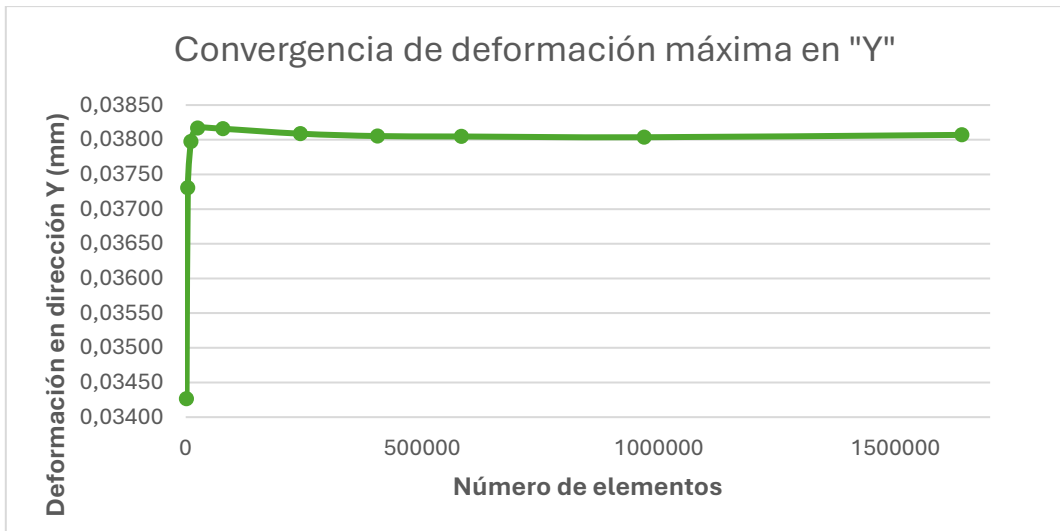


Figura 5.53 Análisis de convergencia de la deformación en Y. Criterio de evaluación establecido por usuario.

Las Figuras 5.52 y 5.53 muestran que no se generan defectos puntuales y que la deformación obtenida es un orden de magnitud menor al límite establecido por el usuario, basado en la práctica recomendada ASME PCC-1 (0,25 mm en planitud radial y longitudinal). Por lo tanto, el diseño cumple satisfactoriamente con el criterio.

5.5.3.5 Criterio de falla local en brida

Cuando dicha relación es inferior a 1, el componente cumple con el requisito; en caso contrario, debe modificarse para satisfacerlo. El resultado final de criterio en este componente se observa en la Figura 5.54.

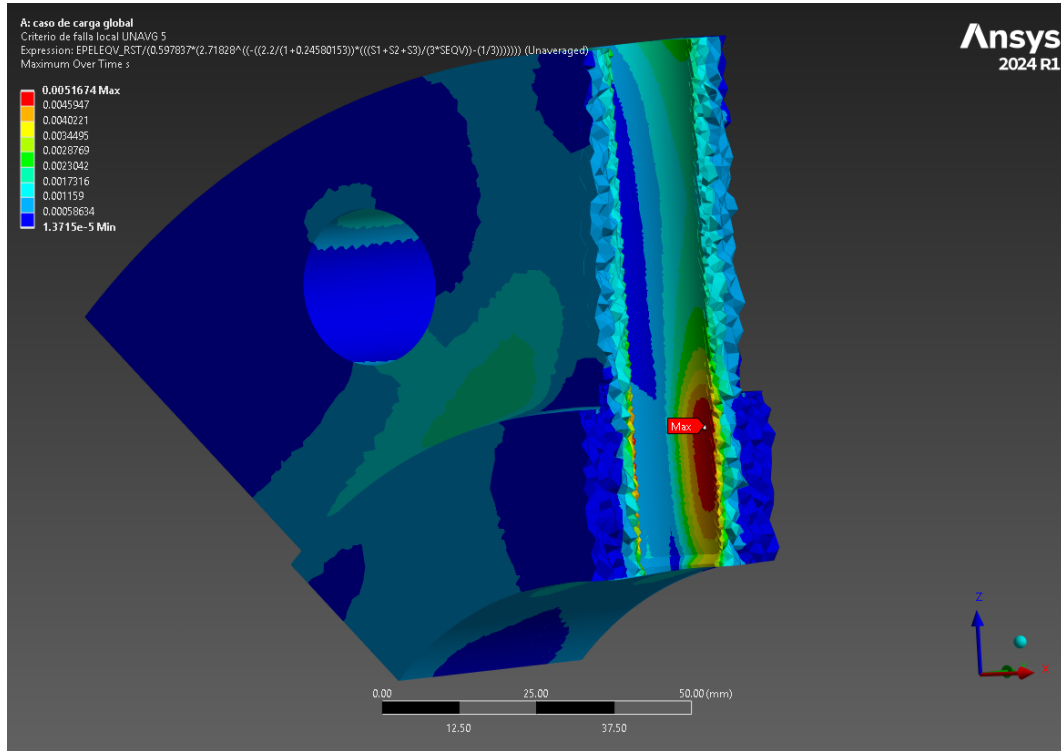


Figura 5.54 Componente brida en corte, se visualiza el criterio de falla local.

Se puede ver que todos los puntos del componente cumplen el criterio de falla local, lo que confirma la integridad estructural de la brida bajo las condiciones de carga más críticas.

5.5.4 Análisis del componente soporte de sello

5.5.4.1 Cargas en componente

En este componente, las cargas que actúan son la presión de operación, la presión de sellado y la reacción del sellado transmitida a través de la carga aplicada al tapón de sello y el contacto tipo *bonded* entre tapón de sello/soporte de sello.

5.5.4.2 Características y malla

El mallado final del componente se muestra en la Figura 5.55 y la Figura 5.56, mientras que el procedimiento de refinamiento aplicado para garantizar la convergencia del análisis se detalla en la Tabla 5-7.

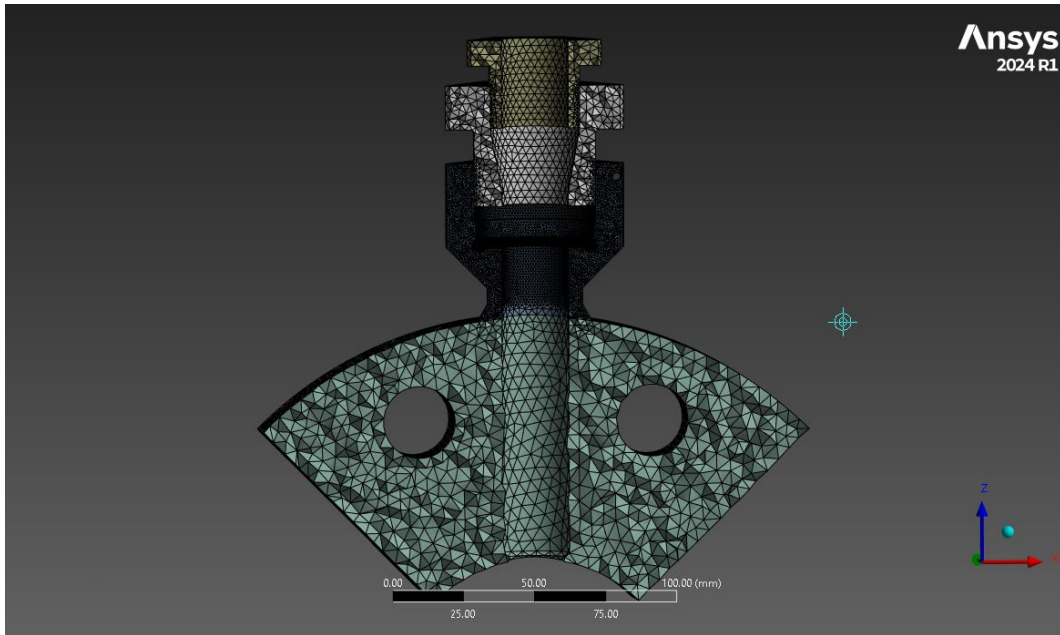


Figura 5.55 Modelo en corte, se ve el mallado final del componente soporte de sello.

Haciendo un detalle en la zona de soporte de sello en corte podemos ver el detalle del refinamiento de malla en la zona de concentración de tensiones donde se halla la máxima tensión del componente.

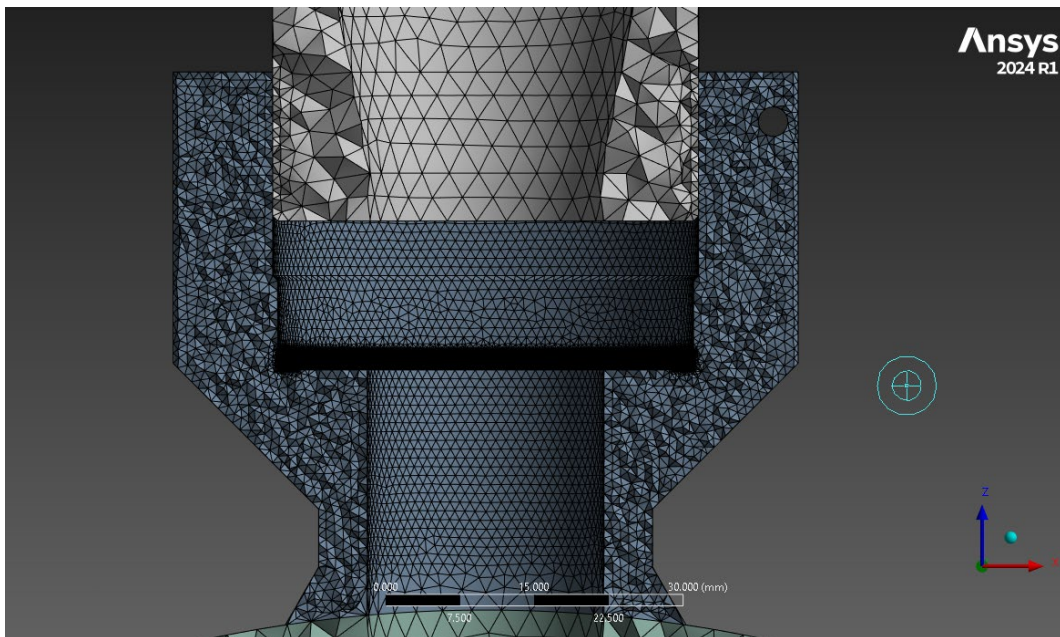


Figura 5.56 Modelo en corte. Detalle de mallado en componente soporte de sello.

Siendo su calidad de elementos aceptable según la métrica compuesta de calidad de Ansys. Se observa la distribución de calidad en la Figura 5.57.

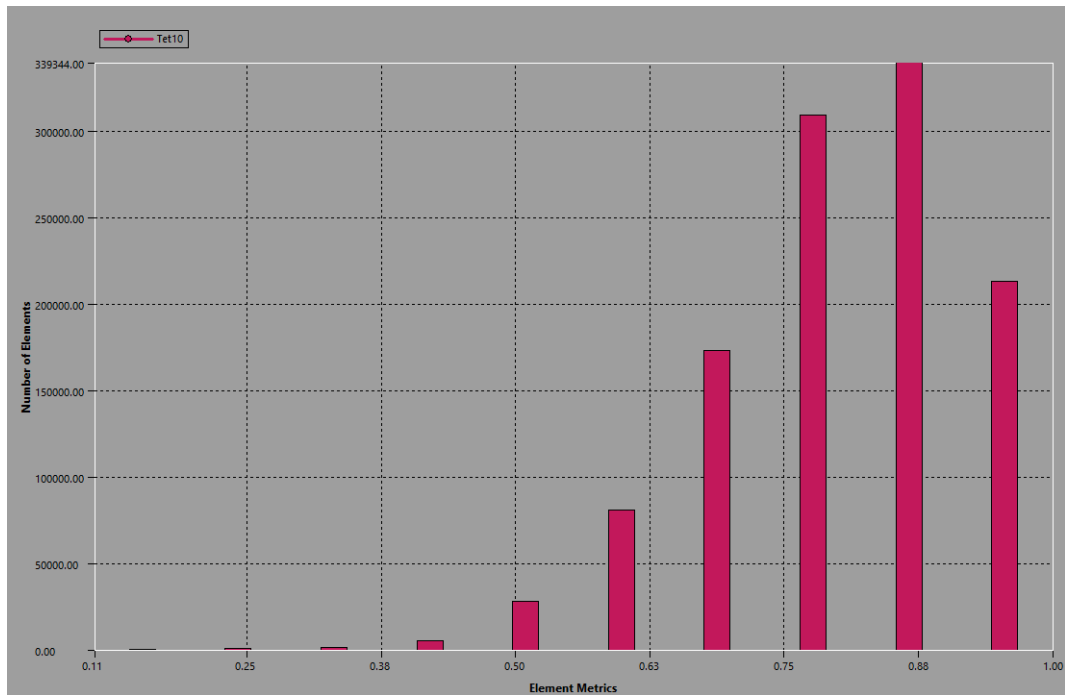


Figura 5.57 Distribución de métrica compuesta de calidad de elementos Ansys.

En la tabla 5-7 se detalla el procedimiento de refinamiento de malla hasta llegar al resultado final. En la Figura 5.58 se observa donde fue aplicado el control en el componente.

Solución	Malla (mm)	Observaciones	Elementos
1	15	Aplicado a todo el modelo	3 217
2	10	Aplicado a todo el modelo	3 706
3	7	Aplicado a todo el modelo	4 638
4	5	Aplicado a todo el modelo	7 576
5	3	Aplicado a todo el modelo	21 497
6	2*	*A partir de este punto, el mallado de la brida se fija en 5 mm y tapón de sujeción y tapón de sello en 2 mm	63 169
7	1,5*	Aplicado solo al componente	151 607
8	1*	Aplicado solo al componente	500 667
9	1*	RABE 0,15 mm	754 076
10	1*	RABE ,1 mm	1 051 782

Notas:
RABE: superficie de radio de acuerdo en base del elastómero, tipo de control de malla aplicado *Face sizing*.

Tabla 5-7 Control de malla utilizado en cada solución y cantidad de elementos obtenidos.

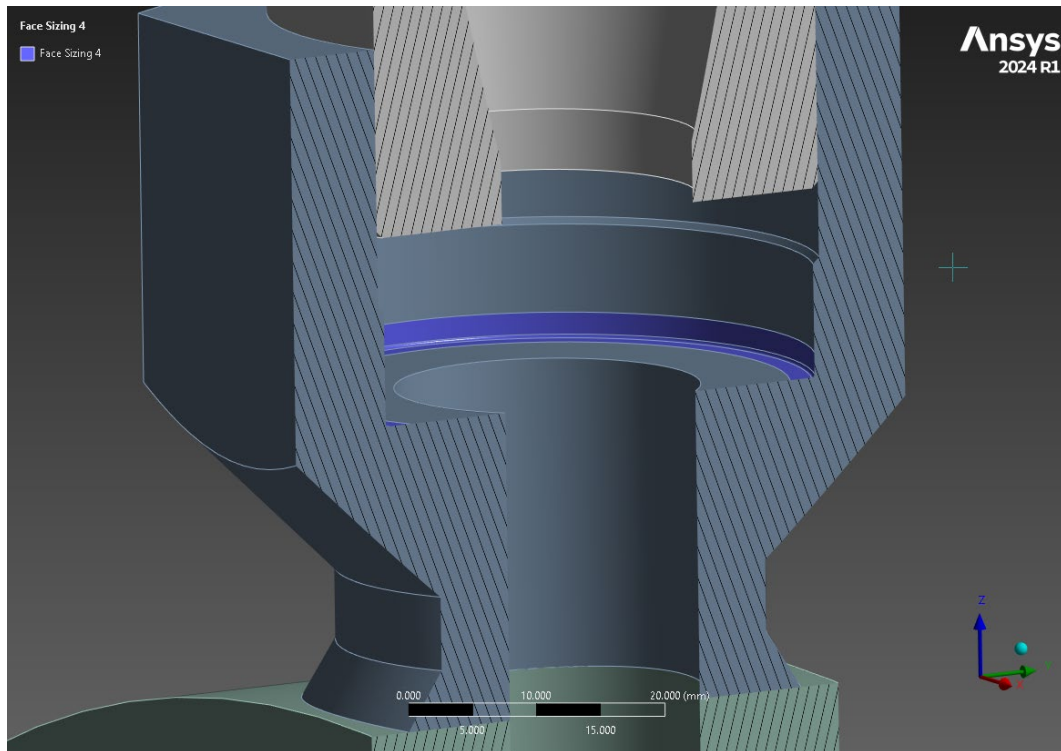


Figura 5.58 Vista en corte del componente soporte de sello se observa la superficie RABE.

5.5.4.3 Criterio elasto-plástico en soporte de sello

En la Figura 5.59 se observa que el modelo converge, mientras que la Figura 5.60 presenta el análisis de convergencia realizado.

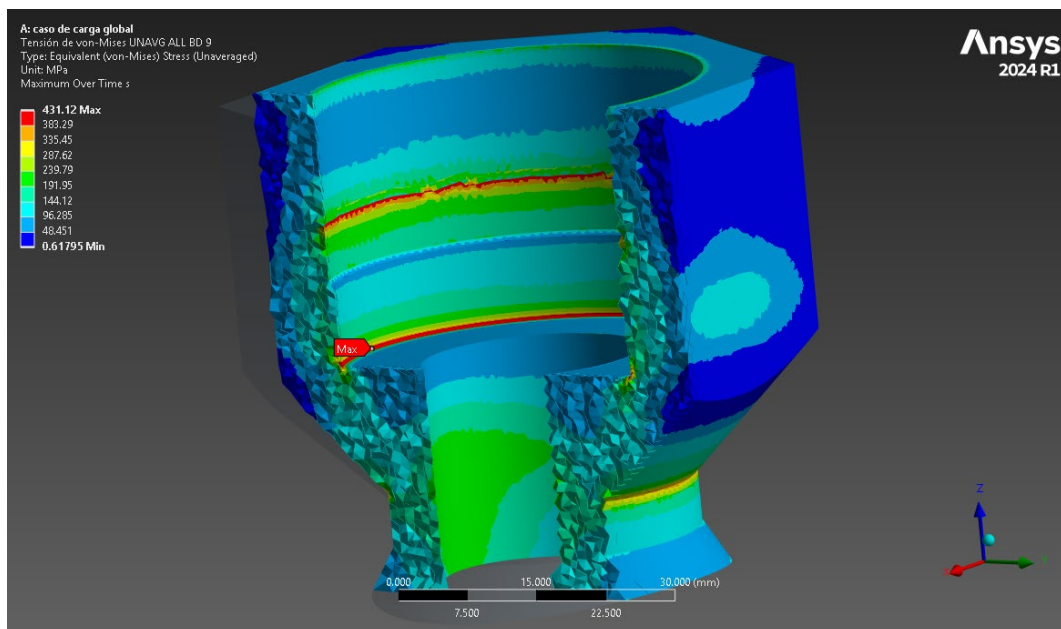


Figura 5.59 Componente soporte de sello en corte. Se observa zona de máxima tensión. El modelo converge.

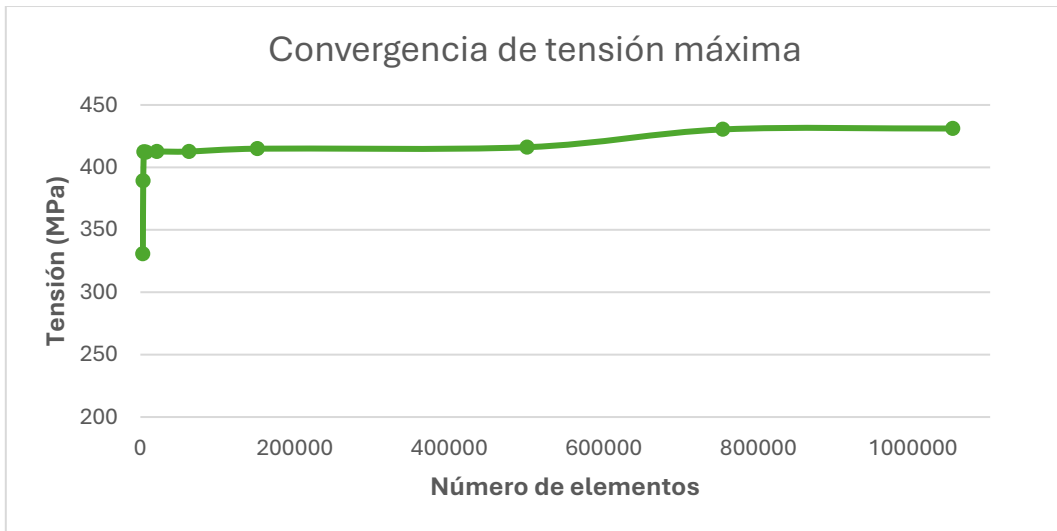


Figura 5.60 Análisis de convergencia de máxima tensión componente soporte de sello.

En el análisis de convergencia se observa que, en las primeras iteraciones, la tensión aparenta converger; sin embargo, estos valores no resultaban representativos debido a que la malla inicial no lograba adaptarse correctamente al radio de acuerdo, dada la diferencia de dimensiones entre elemento y radio de acuerdo. A partir de los refinamientos aplicados en las soluciones 9 y 10, el valor obtenido se considera consistente y ajustado a las características reales del diseño.

5.5.4.4 Criterio de falla local en soporte de sello

En la Figura 5.61 se presentan los resultados punto a punto de esta evaluación.

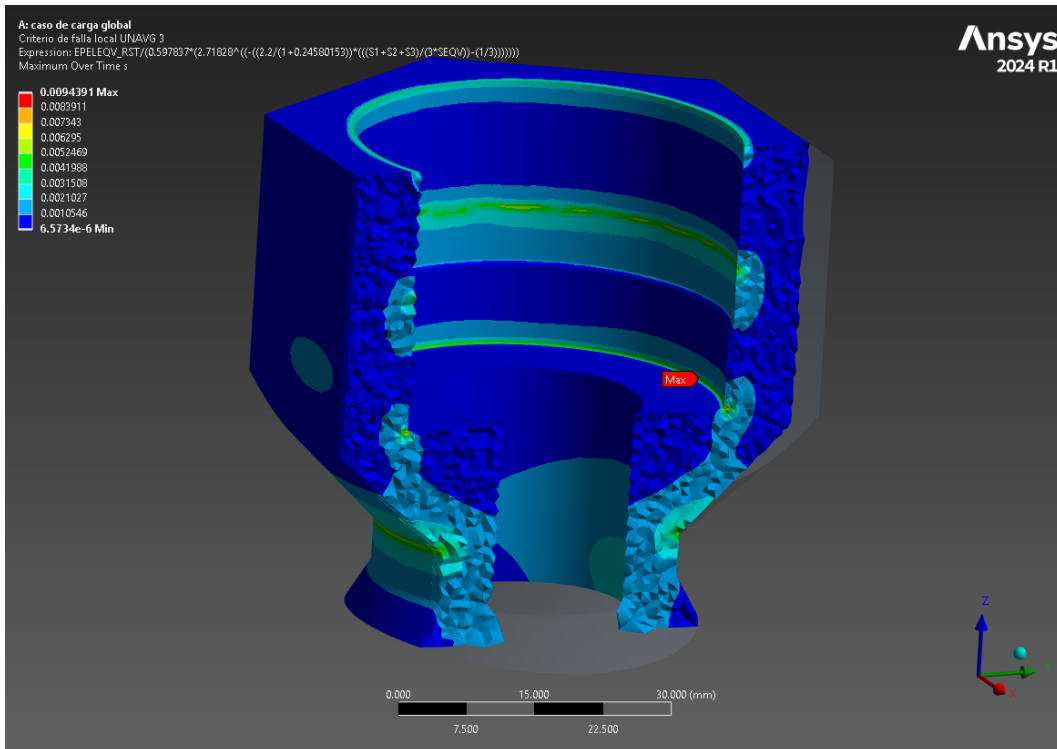


Figura 5.61 Componente soporte de sello en corte. Se observa que todos los puntos cumplen el criterio de falla local.

Se observa que todos los puntos del componente cumplen el criterio de falla local, lo que confirma la integridad estructural del soporte de sello bajo las condiciones de carga aplicadas.

5.5.5 Análisis del componente tapón de sello

5.5.5.1 Cargas en componente

Las solicitaciones que actúan en el tapón de sello son la fuerza ejercida por la reacción de compresión del sello, la presión generada durante la compresión de la varilla por el sistema de sujeción y la fuerza de reacción de compresión sobre el tapón de sujeción transmitida al tapón de sello por el contacto tipo *bonded* entre tapón de sello/tapón de sujeción.

5.5.5.2 Características y malla

El mallado definitivo aplicado para este análisis se muestra en la Figura 5.62 y la Figura 5.63, mientras que la distribución de calidad de los elementos se presenta en la Figura 5.64, evidenciando el cumplimiento de los criterios de refinamiento y calidad establecidos para garantizar la convergencia y la precisión en zonas críticas.

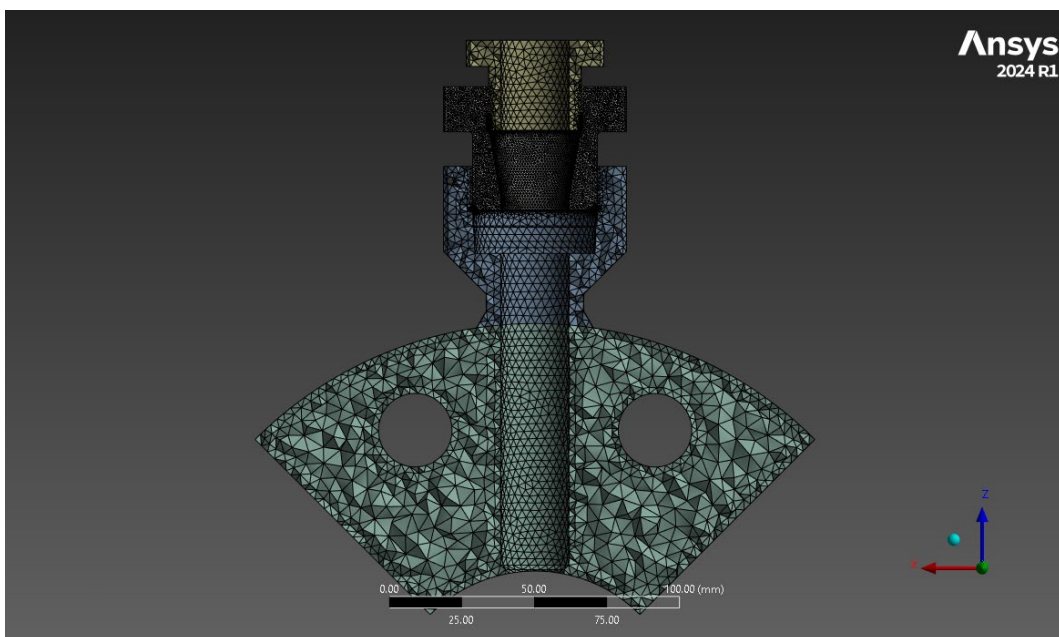


Figura 5.62 Modelo en corte, mallado final de componente tapón de sello.

Haciendo un detalle en la zona de la brida, en corte podemos ver el tamaño y características de la malla final en el componente:

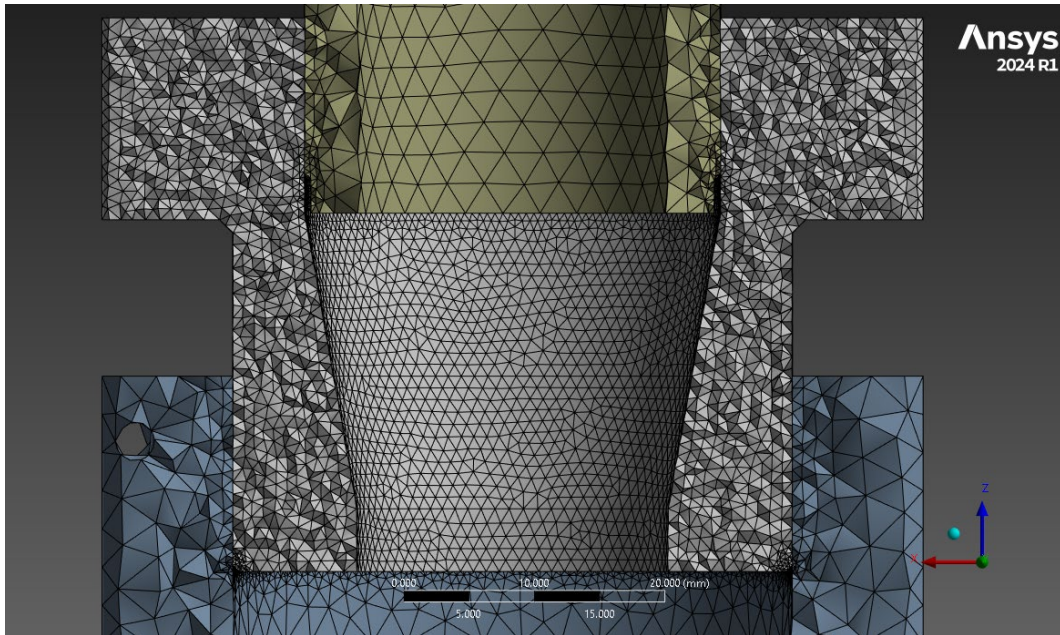


Figura 5.63 Vista en corte con topografía (elementos completos en plano de corte) de la malla en componente tapón de sello.

Siendo su distribución de calidad de elementos la siguiente:

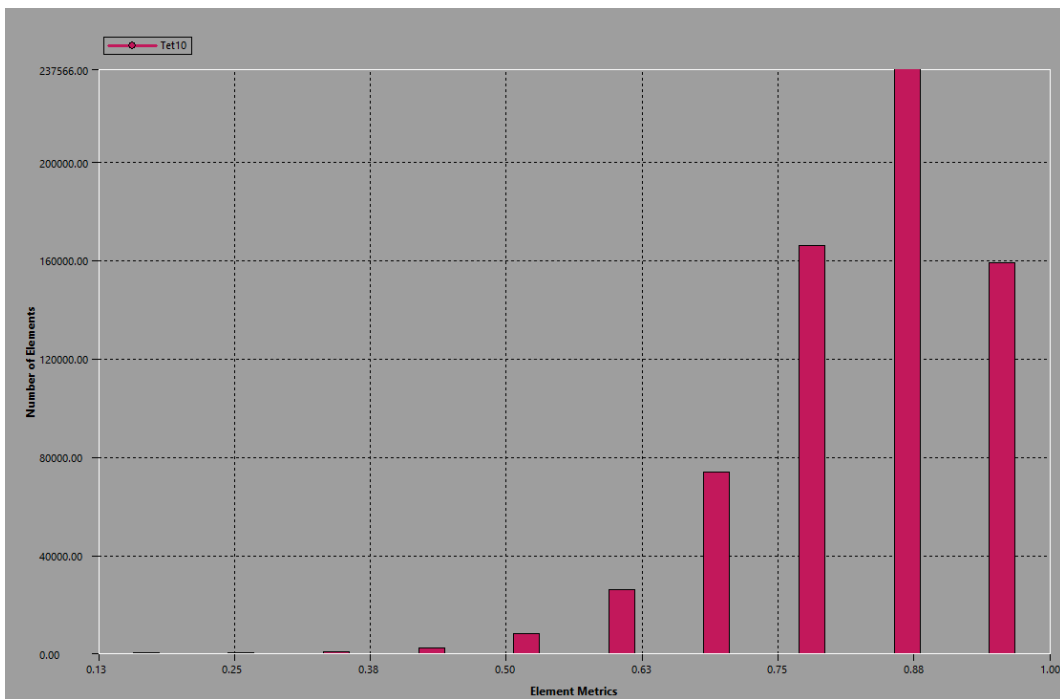


Figura 5.64 Distribución de métrica compuesta de calidad de elementos Ansys.

El procedimiento aplicado para refinar la malla es el indicado en la Tabla 5-8. Mientras que en la Figura 5.65 se observan las zonas donde se aplicaron los controles mencionados.

Solución	Malla general (mm)	Observaciones*	Elementos
1	15	Aplicado a todo el modelo	493
2	10	Aplicado a todo el modelo	775
3	7	Aplicado a todo el modelo	1 884
4	5	Aplicado a todo el modelo	4 081
5	3	Aplicado a todo el modelo	17 396
6	2*	*A partir de este punto, el mallado de la brida se fija en 5 mm y tapón de sujeción y tapón de sello en 2 mm	55 096
7	1,5*	Aplicado solo al componente	131 912
8	1*	Aplicado solo al componente	434 548
9	1*	CH 0,25 mm	457 089
10	1*	CH <i>refinement</i> 2, ZC 0,5 mm	507 950

Notas:
CH: superficie de chaflan en base de zona roscada, tipo de control de malla aplicado *Face sizing* en solución 9 y *refinement* en solución 10.
ZC: superficie de zona de contacto entre tapón de sujeción y tapón de sello, tipo de control de malla aplicado *Face sizing*.

Tabla 5-8 Control de malla utilizado en cada solución y cantidad de elementos obtenidos.

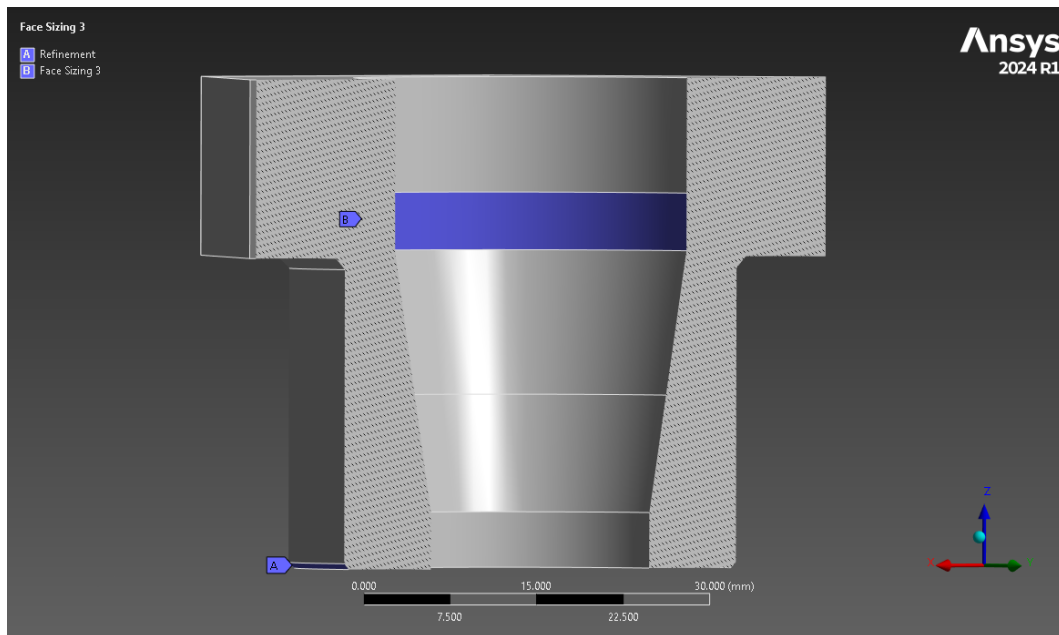


Figura 5.65 Vista en corte del componente soporte de sello. Se observa la superficie de “CH” macada como A y la zona de contacto “ZC” marcada como B.

5.5.5.3 Criterio elasto-plástico en tapón de sello

En la Figura 5.66 se muestra el resultado final del modelo, mientras que en la Figura 5.67 se presenta el análisis de convergencia.

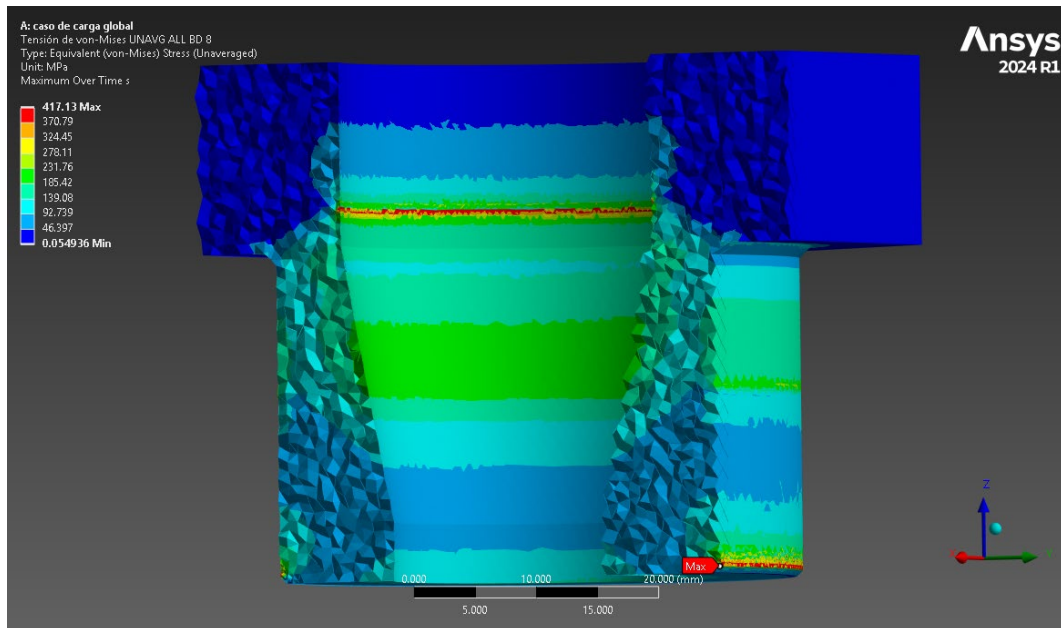


Figura 5.66 Componente tapón de sello en corte, se ve zona de máxima tensión en “CH”. El modelo converge.

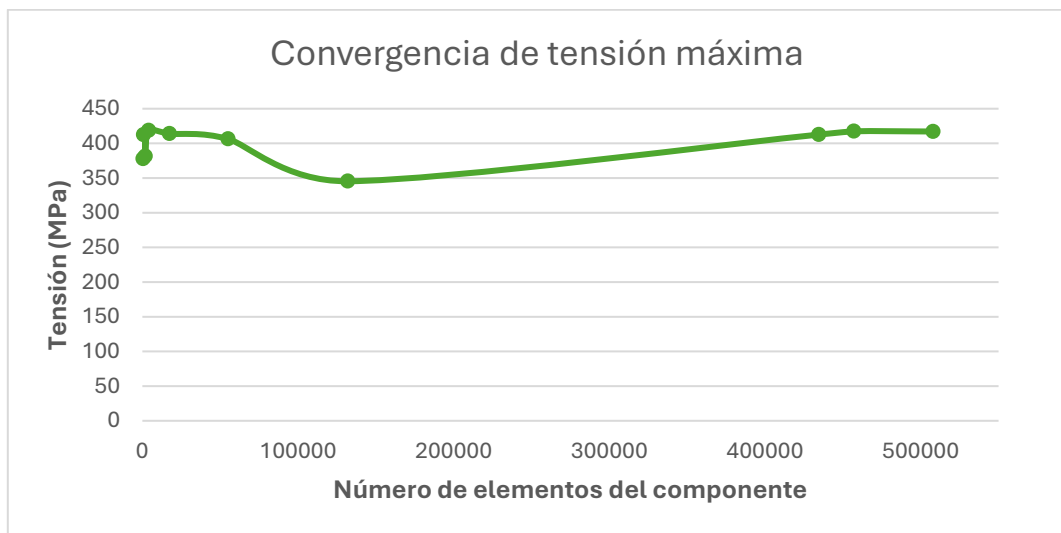


Figura 5.67 Análisis de convergencia de tensión máxima en componente tapón de sello.

En este análisis se observa que, una vez que el tamaño de los elementos se aproxima a las dimensiones del chaflán, las tensiones convergen hacia un valor estable. Las variaciones registradas en las primeras iteraciones se deben, entre otros factores, a la dificultad de la malla para reproducir con precisión la geometría, lo que genera aproximaciones demasiado groseras en las zonas críticas.

5.5.5.4 Criterio de falla local en tapón de sello

Este criterio se considera satisfactorio cuando la relación calculada es inferior a 1; en caso contrario, el diseño debe modificarse para cumplirlo. En la Figura 5.68 se observa que el componente satisface dicho criterio en todos los puntos

analizados, confirmando su aceptabilidad bajo las condiciones de carga más críticas.

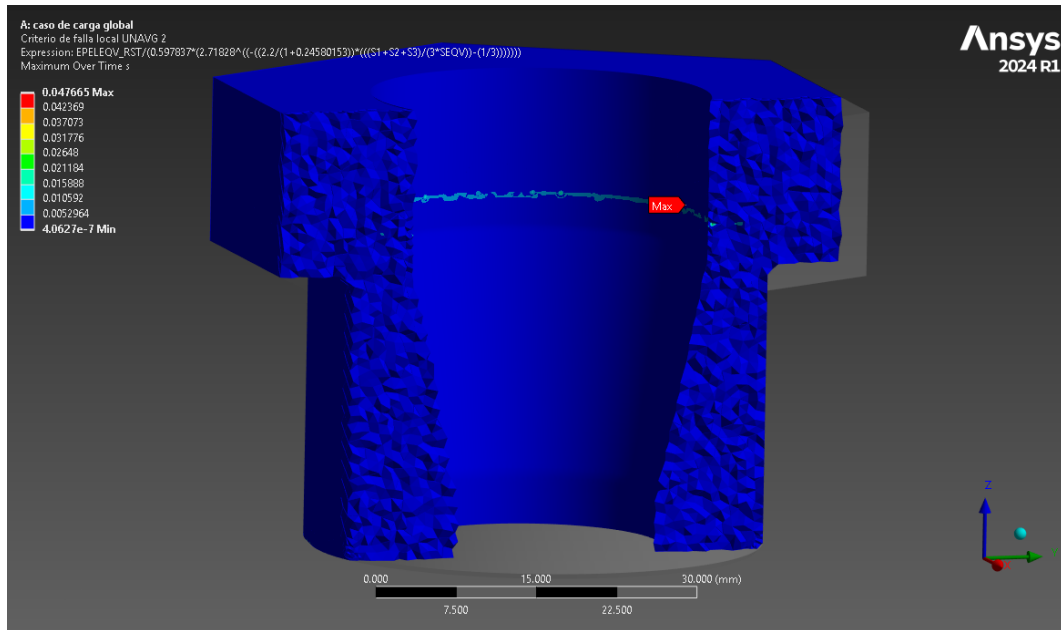


Figura 5.68 Componente tapón de sello en corte. Se observa que todos los puntos cumplen el criterio de falla local.

5.5.6 Análisis del componente tapón de sujeción

5.5.6.1 Cargas en componente

La carga que actúa sobre este componente es la fuerza de reacción generada por el apriete de las cuñas de sujeción.

5.5.6.2 Características y malla

El mallado definitivo aplicado para este análisis se muestra en la Figura 5.69 y, con mayor detalle, en la Figura 5.70.

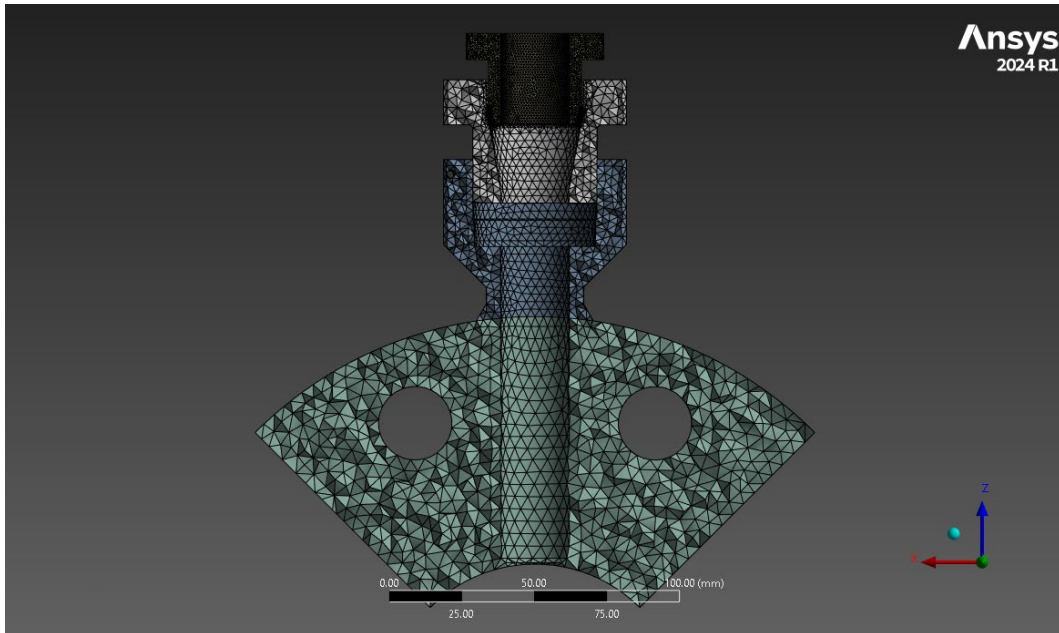


Figura 5.69 se observa corte del modelo completo, malla final de análisis en componente tapón de sujeción.

Haciendo un detalle en la zona del tapón de sujeción, en corte podemos ver las zonas de mayor refinamiento de la malla, coincidente con la zona de máxima tensión.

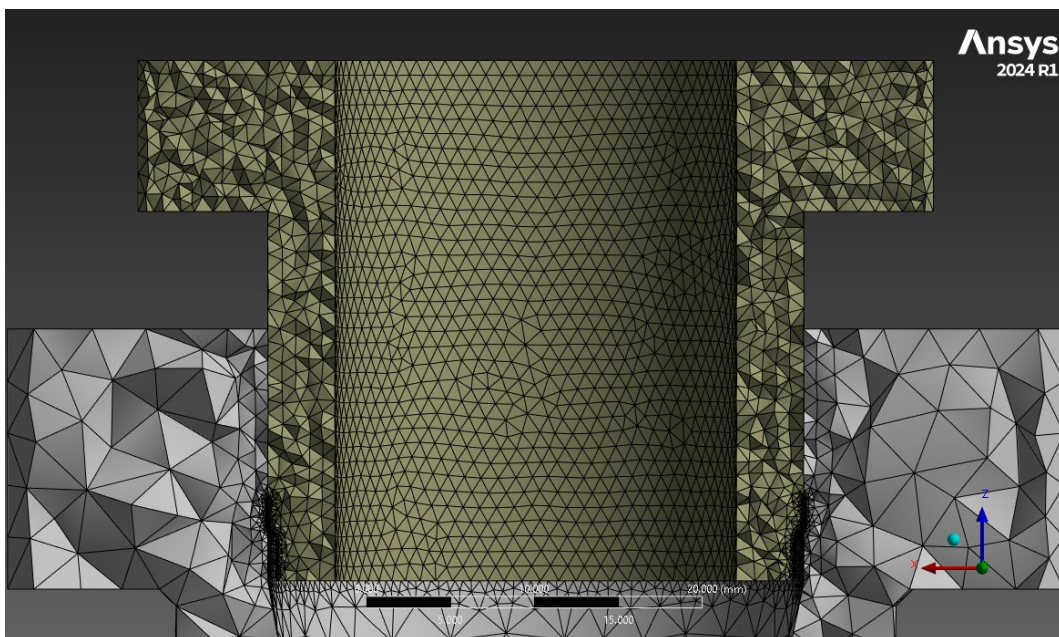


Figura 5.70 Vista en corte con topografía (elementos completos en plano de corte) de malla final de componente tapón de sujeción.

En la Figura 5.71 podemos observar la distribución de calidad de elementos según la métrica compuesta de Ansys. Valores que resultan aceptables.

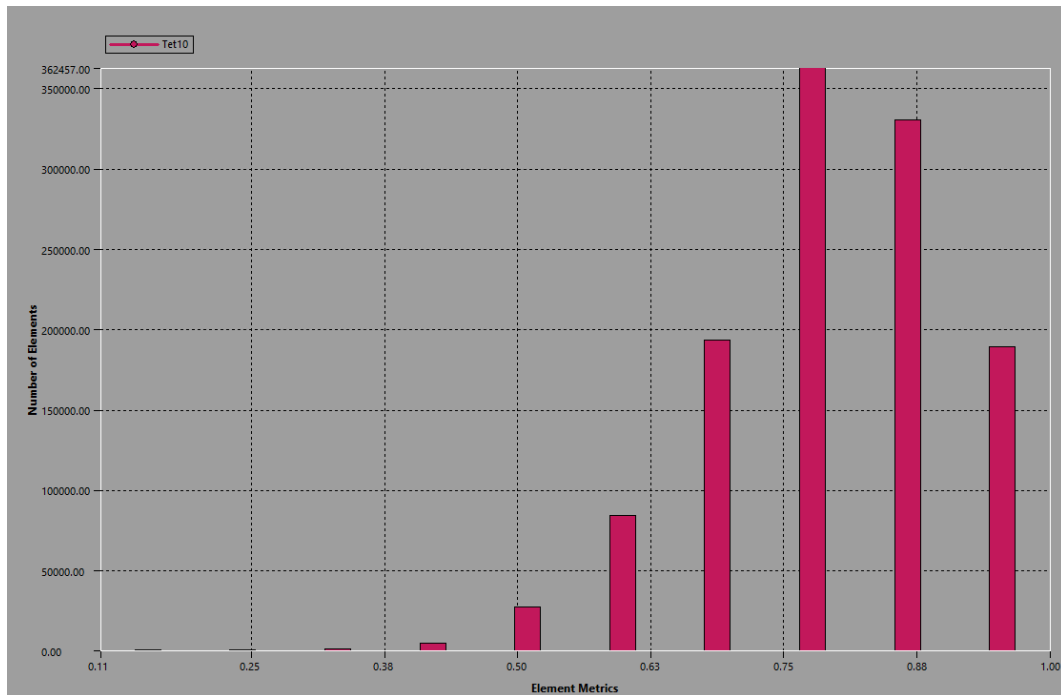


Figura 5.71 Distribución métrica compuesta de calidad elementos según criterio Ansys.

El procedimiento de refinamiento de la malla se detalla en la Tabla 5-9, mientras que la representación gráfica de las referencias aplicadas se muestra en la Figura 5.72. Este esquema permite visualizar las zonas donde se aplicaron controles específicos para garantizar la calidad del mallado y la convergencia del análisis.

Solución	Malla (mm)	Observaciones	Elementos
1	5	Aplicado a todo el modelo	1 334
2	3	Aplicado a todo el modelo	6 189
3	2*	*A partir de este punto, el mallado de la brida se fija en 5 mm y tapón de sujeción y tapón de sello en 2 mm	18 472
4	1,5	Aplicado al componente	43 982
5	1	Aplicado al componente	142 891
6	1	RA 0,15	424 996
7	1	RA 0,125	537 551
8	1	RA 0,1	805 445
9	1	RA 0,075	1 291 742

Nota:
RA: zona de radio de acuerdo entre zona roscada y superficie de empuje de cuñas que incluye las superficies laterales, tipo de control de malla aplicado *Face sizing*.

Tabla 5-9 No se representan los datos de malla general en 15, 10 y 7 mm debido a que por las magnitudes de la pieza esos tamaños están fuera de escala.

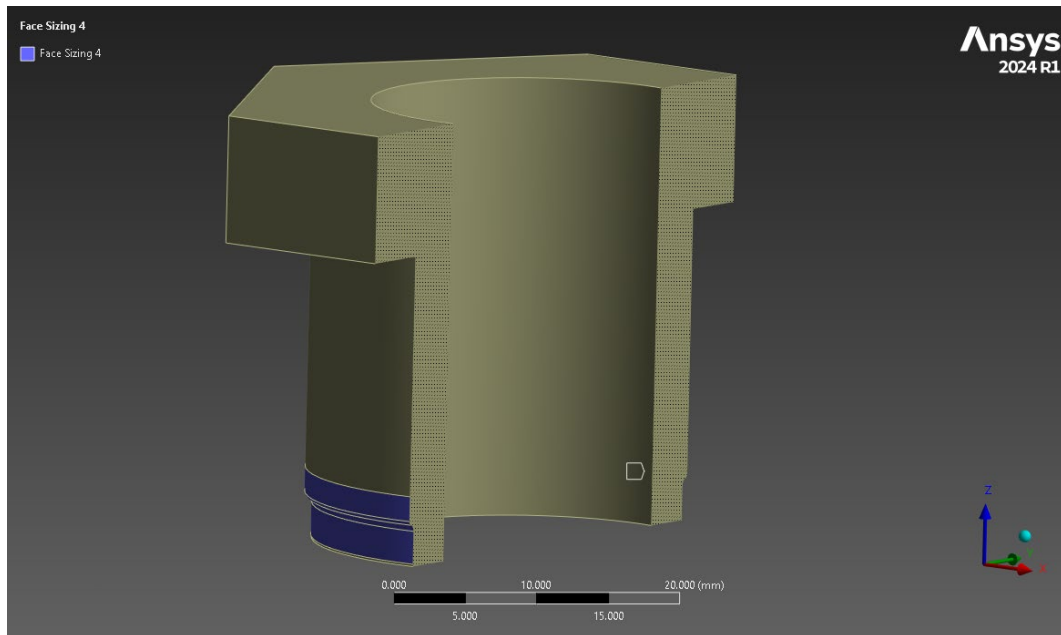


Figura 5.72 Vista en corte del componente tapón de sujeción se observa la superficie de RA.

5.5.6.3 Criterio elasto-plástico en tapón de sujeción

El resultado final se muestra en la Figura 5.73 y el análisis de convergencia correspondiente en la Figura 5.74.

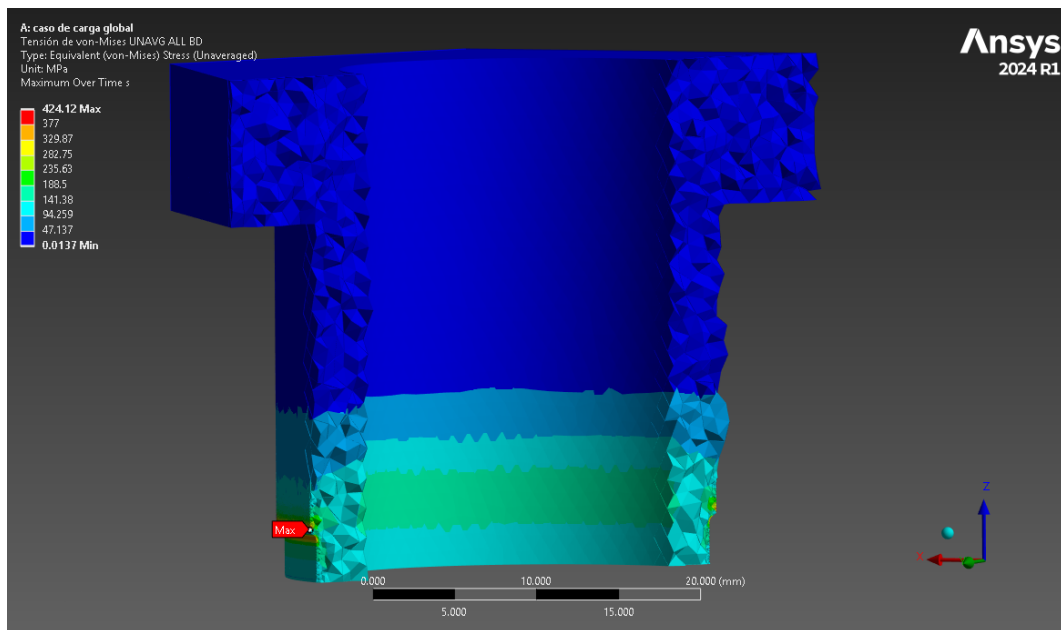


Figura 5.73 Vista en corte del componente tapón de sujeción. Distribución de tensiones. El modelo converge.

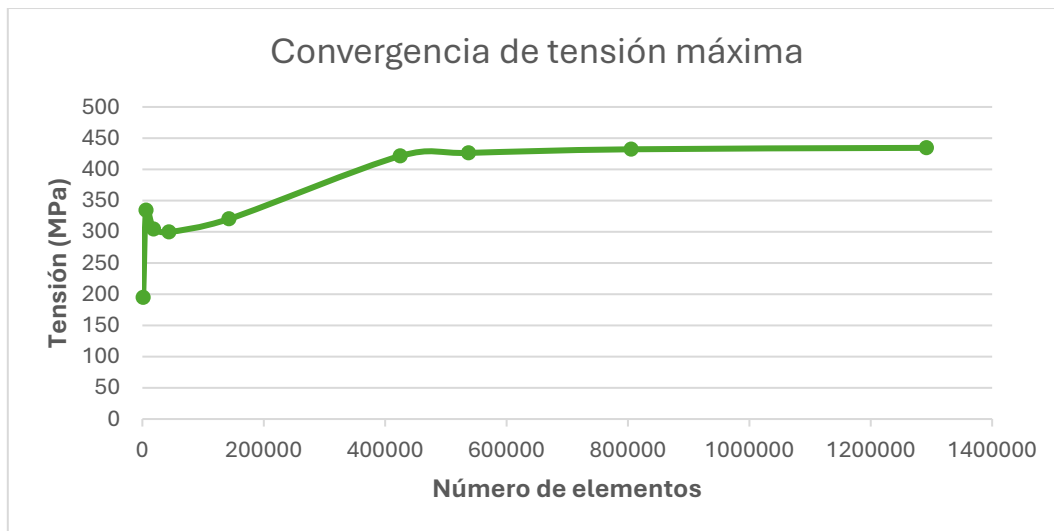


Figura 5.74 Análisis de convergencia de tensión máxima en componente tapón de sujeción.

A diferencia de los demás componentes, el tamaño inicial de la malla general comienza en 5 mm y no en 15 mm. Esto se debe a que, por las dimensiones reducidas de las piezas, las mallas de 15, 10 y 7 mm resultaban excesivamente groseras y no representaban adecuadamente la geometría del componente. Nuevamente, se observa que cuando el tamaño de los elementos se aproxima al radio de acuerdo, los valores convergen, confirmando la estabilidad del modelo.

5.5.6.4 Criterio de falla local en soporte de sello

En la Figura 5.75 se observan los resultados de esta evaluación en este componente.

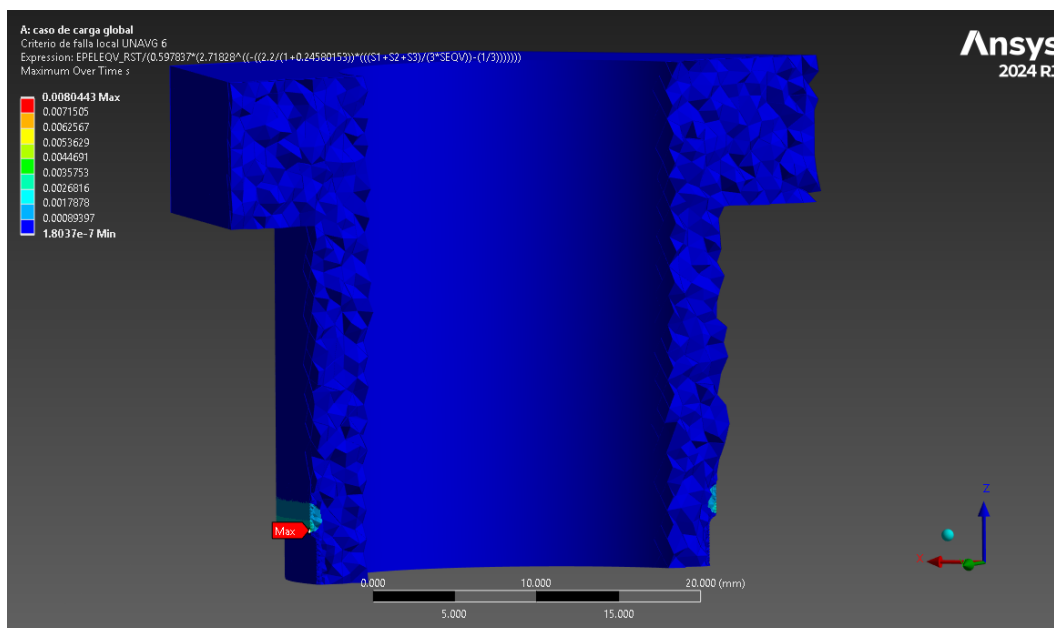


Figura 5.75 Vista en corte de tapón de sujeción, criterio de falla local. Todos los puntos cumplen el criterio.

Según lo definido previamente, los resultados del postprocesado indican que el criterio de falla local se cumple en todos los puntos del modelo. Este resultado

confirma que las deformaciones plásticas locales permanecen dentro del límite establecido por el código ASME, garantizando la integridad del componente bajo las condiciones de carga.

5.5.7 Resumen de resultados del análisis estructural

Resumiendo, los resultados del análisis estructural de todos los componentes se presentan en la Tabla 5-10.

Componente	Elasto-plástico	Por usuario	Falla local
Brida	Converge	<0,25 mm	<1
Soporte de sello	Converge	No Aplica	<1
Tapón de sello	Converge	No Aplica	<1
Tapón de sujeción	Converge	No Aplica	<1

Tabla 5-10 resumen de resultados de criterios ASME por componente.

Podemos ver que todos los componentes verifican los criterios establecidos.

6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Síntesis del trabajo realizado

El objetivo principal de esta tesis fue diseñar, mediante análisis por elementos finitos (FEA), un dispositivo modular para monitoreo interno en líneas de producción, capaz de integrar sensores electroquímicos sin requerir intervenciones intrusivas ni modificaciones estructurales en la cañería.

Este análisis permitió descartar modelos preliminares y optimizar el diseño previo a la construcción de un primer prototipo, demostrando la capacidad del análisis *FEA* de reducir costos relacionados al desarrollo de prototipos experimentales.

El diseño se desarrolló bajo los criterios del código ASME VIII Div. 2 Parte 5, considerando condiciones críticas de operación (presión hasta 100 kg/cm², temperatura 100 °C) y un ambiente típico del Oil & Gas.

Se abordaron tres aspectos fundamentales:

- Sistema de sellado elastomérico, evaluando su capacidad para mantener la estanqueidad bajo variaciones térmicas.
- Sistema de sujeción mecánica, analizando la presión de contacto y la reacción necesaria para contrarrestar el empuje inducido por la presión interna.
- Integridad estructural del conjunto, verificando el cumplimiento de los criterios normativos frente a cargas combinadas.

6.2 Principales hallazgos

El dispositivo diseñado cumple con los criterios de aceptación del código ASME para colapso plástico y falla local, incluso bajo el factor de carga más exigente ($\beta = 2,4$).

El sistema de sellado alcanzó presiones de contacto entre 20 y 30 MPa, superando el criterio de diseño ($\geq 2 \times$ presión de operación), lo que asegura la estanqueidad en condiciones extremas.

El sistema de sujeción mecánica logró una presión promedio de 35 MPa, suficiente para garantizar la estabilidad de la varilla porta-sensores frente al empuje generado por la presión interna.

El análisis elasto-plástico confirmó que las deformaciones en las caras de las bridas son un orden de magnitud menor al límite establecido por ASME PCC-1 (0,25 mm), asegurando el correcto sellado del conjunto.

La elección del acero inoxidable dúplex SA-182 F60 (2205) y del elastómero FKM-90 se validó como adecuada para el entorno operativo, equilibrando resistencia mecánica, comportamiento frente a la corrosión y viabilidad económica.

6.3 Implicancias prácticas

El diseño propuesto representa una solución modular y versátil para el monitoreo interno en líneas de producción, permitiendo:

- Instalación en servicio sin necesidad de soldaduras ni by-pass, reduciendo riesgos y costos operativos.
- Integración de múltiples técnicas (EIS, LPR, cupones) en una misma plataforma. Con la posibilidad de modificar la posición de los elementos y el tipo de técnica.
- Mantenimiento simplificado, gracias a los puertos retráctiles y la posibilidad de limpieza in situ mediante evolución de hidrógeno.

Este enfoque contribuye a mejorar la gestión de integridad en la industria del Oil & Gas, optimizando la toma de decisiones y reduciendo la probabilidad de fallas catastróficas.

6.4 Trabajos futuros

Para consolidar y ampliar el alcance del diseño, se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Evaluación de materiales alternativos: considerar aleaciones de níquel (Alloy 625) para ambientes más agresivos y elastómeros de mayor rango térmico (FFKM, FEPM).
- Validación experimental: fabricación de prototipo y pruebas en banco para verificar el comportamiento real bajo presión, temperatura y ciclos operativos.
- Integración tecnológica: desarrollo de sistemas de adquisición de datos y comunicación en tiempo real para monitoreo continuo.
- Desarrollo de la metodología para fabricación nacional de varillas con sensores aplicables al sistema para las diversas técnicas posibles.
- Ampliación del alcance: adaptación del diseño a otras series o *ratings* de bridas y diámetros.
- Diseño de herramientas específicas: uno de los puntos a mejorar en términos de seguridad es la utilización de herramientas para inserción y remoción de la varilla en servicios de alta presión.

6.5 Cierre

Este trabajo sienta las bases para el desarrollo de soluciones modulares, seguras y versátiles para monitoreo interno, abriendo oportunidades para mejorar la gestión de integridad en la industria del Oil & Gas. La validación conceptual mediante *FEA* y criterios *ASME* demuestra la viabilidad técnica del diseño, marcando el camino hacia su implementación práctica y futura evolución.

7 Glosario de símbolos

Se ordenan los símbolos y su definición según orden de aparición.

Capítulo 2

Φ = potencial eléctrico.

q^M = carga del metal.

q^S = carga de la solución.

E = potencial de electrodo.

E^0 = potencial normal de electrodo.

E_{eq} o $E_{equil.}$ = potencial de equilibrio.

A_i = factor pre exponencial que depende de la actividad iónica en modelo de Arrhenius para velocidad de corrosión.

ΔG^* = energía de activación del proceso.

R = constante de los gases.

F = constante de Faraday.

I = corriente en Amperes.

i = densidad de corriente.

VC = velocidad de corrosión del material.

PM = peso atómico del metal.

ρ = densidad del material.

i_0 = densidad de corriente de intercambio.

η = sobrepotencial.

$\Delta G_{polarizado}^*$ = energía de activación para un sistema polarizado.

α = factor de simetría.

E_{corr} = potencial de corrosión.

i_{corr} = densidad de corriente de corrosión.

i_{anod} = densidad de corriente anódica.

i_{catod} = densidad de corriente catódica.

m = masa.

t = tiempo.

A_c = área del cupón de corrosión.

K = factor de cambio de unidades.

A_{ER} = sección transversal del elemento de resistencia eléctrica.

r_m = resistividad del metal.

ZRA = amperímetro de resistencia cero.

b_a y b_c = pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente.

B = constante de LPR, depende del sistema.

R_p = resistencia a la polarización.

R_n = resistencia electroquímica de ruido.

σ_E = desviación estándar de potencial.

σ_i = desviación estándar de la corriente.

ω = frecuencia angular.

U_0 = amplitud de polarización alrededor del potencial de equilibrio.

i_1, i_2, i_3 = amplitudes de las componentes armónicas.

R_s = resistencia de la solución.

R_r = resistencia del revestimiento.

Z = impedancia eléctrica.

Z'' = componente imaginaria del vector impedancia.

Z' = componente real del vector impedancia.

R_u = resistencia descompensada o resistencia del electrolito entre el electrodo de referencia y el de trabajo.

C_{dl} = capacitancia del capacitor de doble capa formada entre electrodo/electrolito.

CPE = elemento de fase constante.

Y_0 = parámetro de capacitancia.

n = factor de desviación respecto del comportamiento ideal.

G = conductividad eléctrica de las emulsiones petróleo-en-agua.

σ_m = constante de conductividad de la mezcla.

σ_d = constante de conductividad de la fase dispersa.

σ_c = constante de conductividad de la fase continua.

α_d = fracción volumétrica de la fase dispersa.

ϵ_m = constante dieléctrica de la mezcla.

ϵ_d = constante dieléctrica de la fase dispersa.

ϵ_c = constante dieléctrica de la fase continua.

R_o = resistencia de petróleo.

CPE_o = elemento de fase constante de petróleo.

$R_{w/o}$ = resistencia de emulsión agua en petróleo.

$CPE_{w/o}$ = elemento de fase constante de emulsión agua en petróleo.

Capítulo 3

σ_{ij} = representa la componente de tensión con la dirección i aplicada al plano j .
Donde i y j pueden ser, x , y y z .

f_i = componente de fuerza externa en la dirección i donde i puede ser, x , y y z .

\ddot{u}_i = componente de aceleración en la dirección i donde i puede ser, x , y y z .

$[K_p]$ = matriz de propiedades, en elasticidad representa la matriz de rigidez.

\vec{u} = vector de comportamiento en elasticidad representa el desplazamiento.

\vec{F} = vector de acción, en elasticidad representa el vector de cargas.

E_T = módulo tangente del material o pendiente plástica, simplificada como el módulo secante entre tensión de fluencia y tensión última real.

E_y = módulo de elasticidad del material.

σ_0 = tensión de fluencia real.

σ_y = tensión última real.

ϵ^{el} = componente elástica de deformación.

ϵ^{pl} = componente plástica de deformación.

$\Delta\sigma$ = rango de tensión plástica.

W = densidad de energía de deformación.

λ_1 = alargamiento en la dirección principal 1, pudiendo ser también 2 y 3.

C_{ij} = constantes del material obtenida por ensayos.

D_k = constantes del material obtenida por ensayos.

V = volumen.

I_1, I_2 = invariantes volumétricas.

J = cociente volumétrico total.

G_0 = módulo de corte inicial.

D_1 = compresibilidad inicial.

μ_i = constante de ajuste del modelo de Ogden para el termino i .

α_i = constante de ajuste del modelo de Ogden para el termino i .

Capítulo 4

β = factor de carga caso general.

β_T = factor de carga en condición de prueba.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tensiones principales en las direcciones 1, 2 y 3 respectivamente.

σ_e = tensión equivalente o tensión de Von Mises.

ε_{peq} = deformación plástica equivalente.

ε_L = deformación triaxial límite.

ε_{Lu} = deformación uniaxial límite.

α_{sl} = factor del material dependiente de la estructura cristalográfica.

m_2 = coeficiente de endurecimiento por deformación.

ε_{cf} = deformación de conformado.

p = presión hidrostática.

σ_i^c = tensión de Cauchy en la dirección principal i .

σ^c = tensión de Cauchy.

YS = tensión de fluencia.

UTS = tensión de rotura.

A_r = Alargamiento a rotura.

E = Módulo de elasticidad.

ε_{YS} = Def. tensión de fluencia.

ε^{el} = Def. tensión de fluencia real.

ε_{UTS} = Def. a la rotura real.

ε^{pl} = Rango de deformación plástica.

σ_0 = Tensión de fluencia real.

σ_y = Tensión ultima real.

$\Delta\sigma$ = Rango de tensión plástica.

E_T = Pendiente plástica.

Capítulo 5

ERESX = Comando de extrapolación de resultados de los puntos de integración a los nodos. La opción "YES" implica extrapolación, "NO" implica copiar

directamente el valor y la opción "DEFA" implica que, si existe deformación plástica los copia, si no, los extrapola.

8 Referencias

- [1] D. Corbin y E. Willson, «New Technology for Real-Time Corrosion Detection,» de *TRI-SERVICE CORROSION CONFERENCE*, 2007.
- [2] M. Peatfield, «Developments in real-time corrosion monitoring; recent advances in techniques and the management, display and correlation of data,» *Measurement and Control*, vol. 35, pp. 261-265, 2002.
- [3] K. Wold y H. Jenssen, «SOLUTIONS FOR CORROSION MONITORING IN REFINERIES,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.emersonautomationexperts.com/wp-content/uploads/2014/12/Solutions-for-Corrosion-Monitoring-in-Refineries.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [4] NACE INTERNATIONAL, *CORROSIÓN BÁSICA - Manual del estudiante 2.01: Curso "Corrosión Basica", NACE International 2000*, 2014.
- [5] J. R. GALVELE y G. S. DUFFO, *DEGRADACIÓN DE MATERIALES - I : CORROSIÓN*, Jorge Baudino Ediciones / Universidad Nacional de San Martín., 2007.
- [6] R. M. Carranza, *TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN*, Apunte de cátedra: Corrosión - Instituto Sabato (USNAM / CNEA) - Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, 2016.
- [7] Metal Samples Company, «Corrosion Coupons & Weight Loss Analysis,» [En línea]. Available: [https://www.alspi.com/coupons\(intro\).pdf](https://www.alspi.com/coupons(intro).pdf). [Último acceso: 12 12 2025].
- [8] Metal Samples Company, «Electrical Resistance Monitoring,» [En línea]. Available: <https://www.alspi.com/ERMonitoring.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [9] F. Soleymani, «Internal Corrosion Monitoring of Pipelines Using Electrochemical Techniques: A Comprehensive Review,» *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, vol. 59, nº 5, pp. 1045 - 1061, 2023.
- [10] J. E. Torres Ramírez, G. S. Duffó y S. B. Farina, «Sensores de corrosión de estructuras de hormigón armado, basados en el principio de pares galvánicos,» [En línea]. Available: <https://inis.iaea.org/records/7t7av-60528/files/52078589.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].

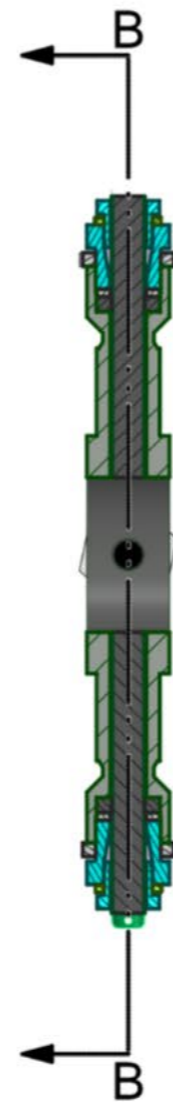
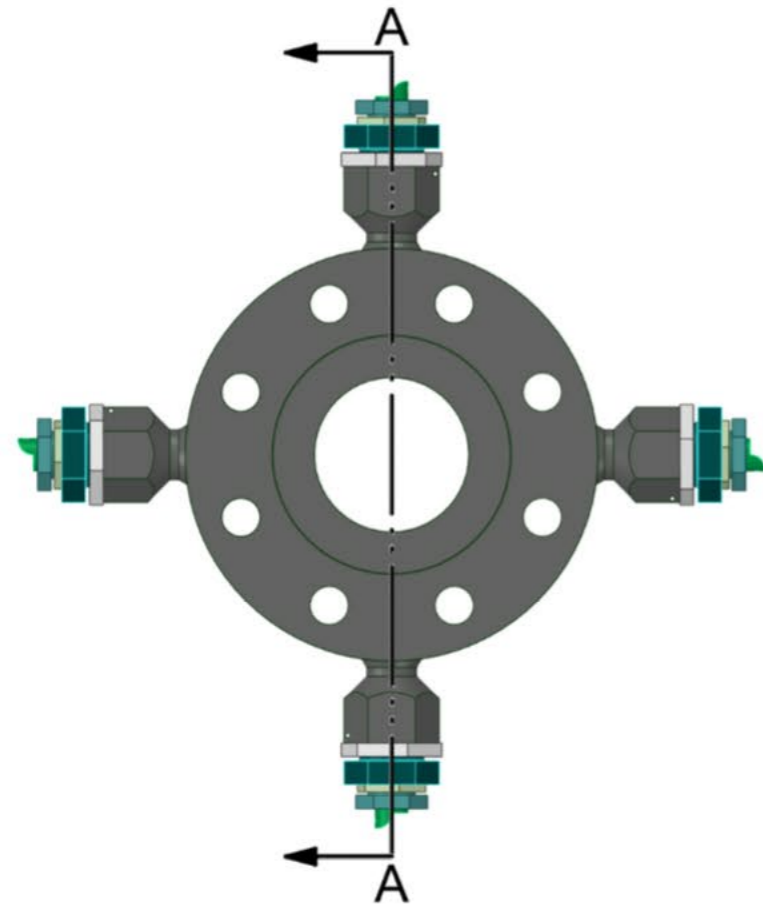
- [11] Metal Samples Company, «Linear Polarization Resistance Monitoring,» [En línea]. Available: <https://www.alspi.com/LPRMonitoring.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [12] ASTM, «G199 – 09 (Reapproved 2020) Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement,» [En línea]. Available: <https://store.astm.org/g0199-09r20e01.html>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [13] A. Cáceres, M. Casales y L. Martínez, «A comparative study of gravimetric and electrochemical techniques for the evaluation of corrosion inhibitor activity onset and efficiency in pipeline CO₂ environments,» *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 27, pp. 625-634, 2019.
- [14] A. C. Lazanas y M. I. Prodromidis, «Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial,» *ACS Measurement Science*, pp. 162-193, 2023 3 (3).
- [15] H. Herrera Hernández, A. M. Ruiz Reynoso, J. C. Trinidad González, C. O. González Morán, J. G. Miranda Hernández, A. Mandujano Ruiz, J. Morales Hernández y R. Orozco Cruz, «Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels,» *Electrochemical Impedance Spectroscopy. IntechOpen*, 16 12 2020.
- [16] Metal Samples Company, «nanoCorr™ Coupled Multielectrode Sensor (CMS),» [En línea]. Available: <https://www.alspi.com/nanocorr.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [17] Metal Samples, «HC Series Coupon Holders for High Pressure (HP™ and MH™) Access Systems,» [En línea]. Available: <https://www.alspi.com/holdershp.htm>. [Último acceso: 12 12 25].
- [18] N. Mastelari, M. Puttinati Casari, E. Spano Rosa y V. Bizotto Guersoni, «DETERMINATION OF WATER CONCENTRATION IN CRUDE OIL AND WATER EMULSIONS BY THE IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD,» de *IV Journeys in Multiphase Flows (JEM 2015)*, Campinas, SP, Brazil, March 23-27, 2015.
- [19] P. N., A. Prado, C. Sad, E. Castro y M. Freitas, «Electrochemical impedance spectroscopy for in situ petroleum analysis and water-in-oil emulsion characterization,» *Fuel*, vol. 91, n° 1, pp. 224-228, 2012.
- [20] M. Qing, H. Liang, J. Zhang y H. Zhan, «Impedance spectroscopy dependent water content detection in dynamic oil-water emulsions,» *AIP ADVANCES*, vol. 8, n° (10), 1 October 2018.
- [21] E. N. Padron, R. A. González-Carbonell y E. O. Diaz, Una introducción al

- Análisis por Elementos Finitos: aplicaciones y ejemplos, 1ra ed., E. P. d. Laosa, Ed., Editorial Universitaria, 2015.
- [22] ANSYS, «Ansys Help,» [En línea]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com/>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [23] R. González Carbonell, E. Álvarez García, J. L. Moya Rodríguez y K. Abreu González, «Modelos de materiales hiperelásticos para el análisis de los elastómeros usando el MEF,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 12, nº 3, pp. 57-66, 2009.
- [24] H. PATEL, «Experimental and advanced computational modelling study of downhole elastomer seal assemblies,» 2020. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/11244/324324>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [25] TESCO, «Anderson Greenwood Instrumentation Flushing and Bleed Rings,» [En línea]. Available: <http://emerson.com/TESCOM>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [26] TEADIT, «Datasheet ELECTRON® FFS - Junta Ailsante Electrica,» [En línea]. Available: <https://teadit.com/wp-content/uploads/2021/08/4AlioYDAyh11p26ttjkk0IBRmbdc5arnaBfHylKL.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [27] ASM International, ASM Handbook - Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, vol. 13A, 2003.
- [28] ASTM, «A322-24 Standard Specification for Steel Bars, Alloy, Standard Grades,» 2024. [En línea]. Available: <https://store.astm.org/standards/a322>. [Último acceso: 2025 12 12].
- [29] ASTM, «A182/A182M - 25 - Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service,» 2025. [En línea]. Available: https://store.astm.org/a0182_a0182m-25a.html. [Último acceso: 12 12 2025].
- [30] ASTM, «B564 - Standard Specification for Nickel Alloy Forgings,» 2022. [En línea]. Available: <https://store.astm.org/b0564-19.html>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [31] ASM International, CORROSION UNDERSTANDING THE BASICS, Materials Park, Ohio 44073-0002: J.R. Davis Davis & Associates, 2000.
- [32] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code - Section II Materials - Part D

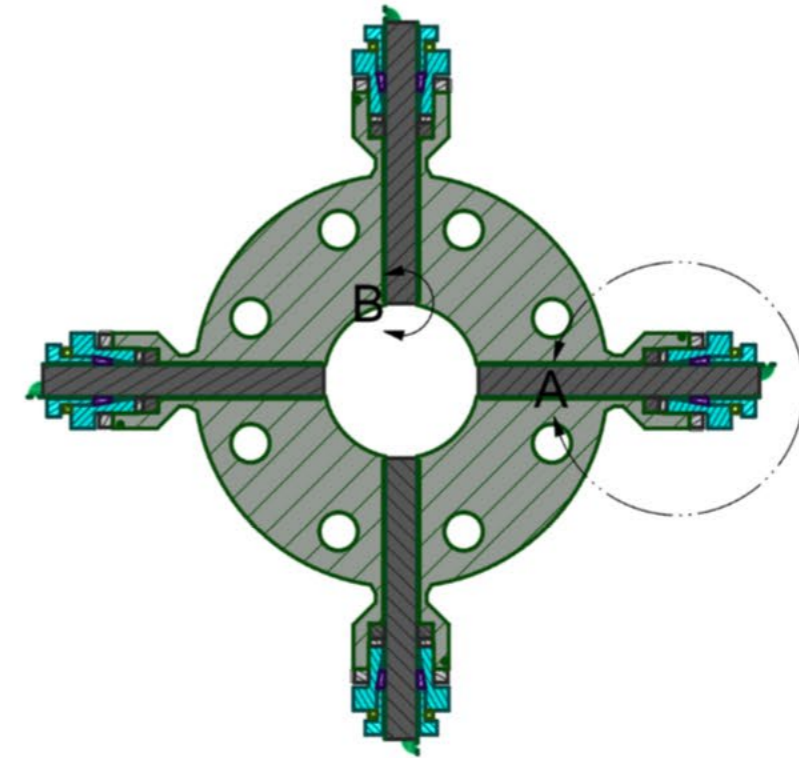
- Properties, ASME, 2023.
- [33] API, RP 581 Risk-Based Inspection Methodology, 4 ed., American Petroleum Institute, 2025.
- [34] API, RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry, 3 ed., American Petroleum Institute, 2023.
- [35] Batelle, Research on Safety Technology Verification for Materials and Corrosions in the U.S. Outer Continental Shelf (OCS), High Pressure High Temperature (HPHT) Material Evaluation, A. D. a. M. H. Joel D. Elhard, Ed., Columbus, Ohio 43201, 2017.
- [36] ASTM, «D1418 Standard Practice for Rubber and Rubber Latices— Nomenclature,» 2022. [En línea]. Available: <https://store.astm.org/d1418-22.html>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [37] G. S. Duffó, S. Farina y C. Giordano, «Embeddable reference electrodes for corrosion monitoring of reinforced concrete structures,» *Materials and Corrosion*, vol. 61, n° 6, 2010.
- [38] L. PAWLICK, G. STONER y G. CLEMENÑA, «DEVELOPMENT OF AN EMBEDDABLE REFERENCE ELECTRODE FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES,» 1998. [En línea]. Available: <https://vtrc.virginia.gov/media/vtrc/vtrc-pdf/vtrc-pdf/99-cr1.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [39] L. Freire, I. Ezpeleta, J. Sanchez y R. Castro, «Advanced EIS-Based Sensor for Online Corrosion and Scaling Monitoring in Pipelines of Geothermal Power Plants,» *Metals*, vol. 14, n° 279, 2024.
- [40] Q. Meiyi, L. Huaqing, Z. Jinjun y Z. Honglei, «The mechanism of detecting water content in oil-water emulsions using impedance spectroscopy,» *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 188, n° 106863, 2020.
- [41] ASME , Boiler and Pressure Vessel Code - Section VIII - Division 2: Alternative Rules, 2023.
- [42] ASME, Section VIII - Division 2 Example Problem Manual, 2013.
- [43] R. W. Ogden, «Large Deformation Isotropic Elasticity - On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids,» *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, n° 326, pp. 565-584, 1972.

- [44] D. Madier, "An Introduction to the Fundamentals of Mesh Generation in Finite Element Analysis," 2023. [Online]. Available: <https://www.fea-academy.com/pdf/FEA%20Academy%20-%20The%20Fundamentals%20of%20Mesh%20Generation%20in%20Finite%20Element%20Analysis.pdf>. [Accessed 12 12 2025].
- [45] F. Kaiser, D. Savio y R. Bactavatchalou, «Modelling of Static and Dynamic Elastomer Friction in Dry Conditions,» *Lubricants*, vol. 12, nº 250, 2024.
- [46] M. Mofidi, «Tribology of Elastomers,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:991285/FULLTEXT01.pdf>. [Último acceso: 12 12 2025].
- [47] ASME , «PCC-1 - Pressure Boundary Flange Joint Assembly,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/pressure-boundary-bolted-flange-joint-assembly>. [Último acceso: 12 12 25].
- [48] The Welding Research Council, Inc., «Determination of Pressure Boundary Joint Assembly Bolt Loads,» [En línea]. Available: https://store accuristech.com/standards/wrc-538?product_id=2190388&srsrtid=AfmBOop1HWrPMfL6mwBzxxZJWsSphITNeNgmSp2xsam_OJIBX8kNH-e8. [Último acceso: 12 12 2025].

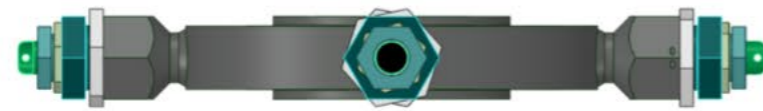
9 Anexo A – Planos dimensionales



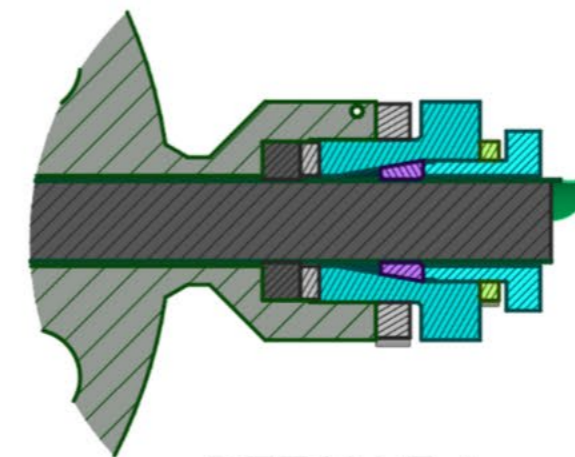
CORTE A-A



CORTE B-B



DETALLE B
ESCALA 1:2

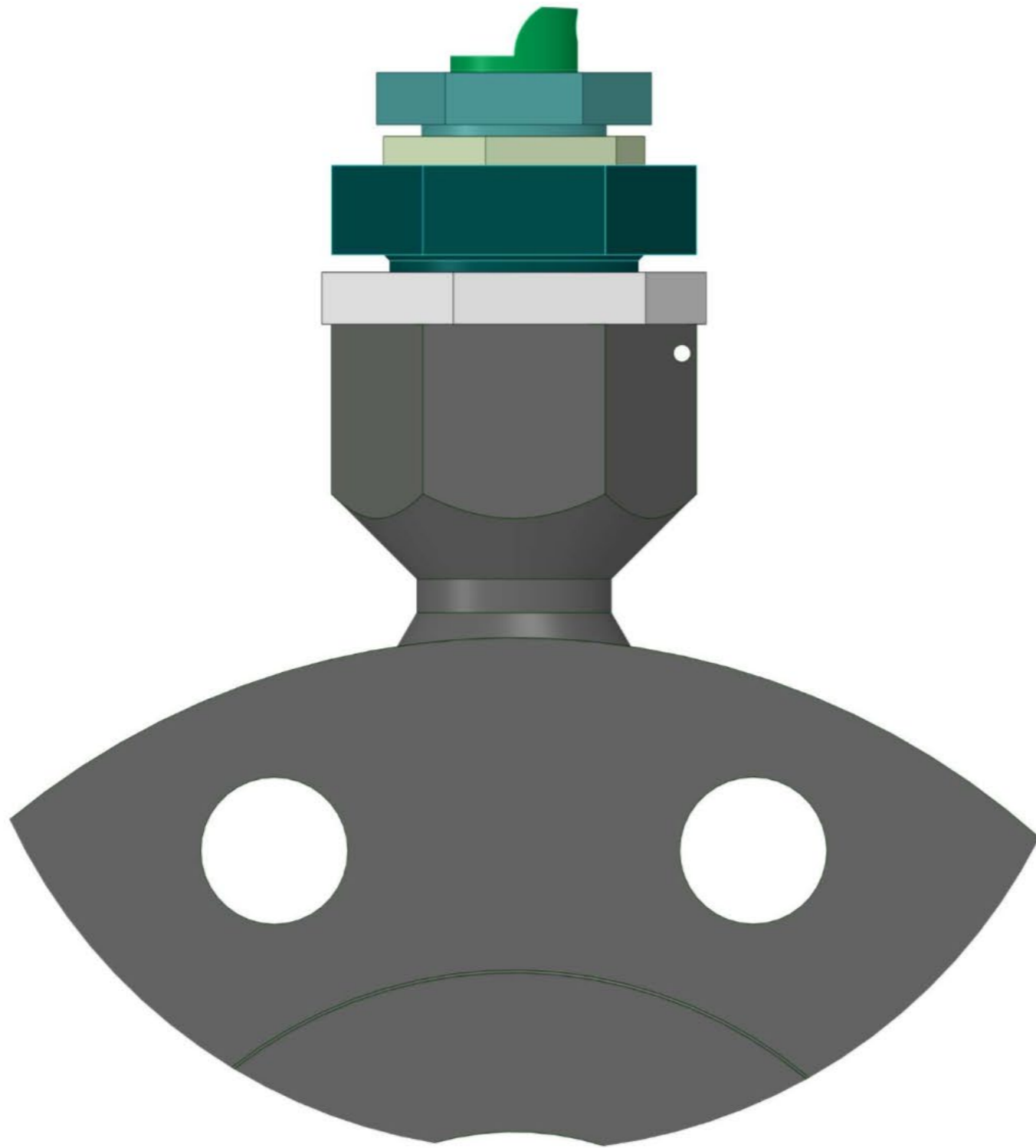


DETALLE A
ESCALA 1:2

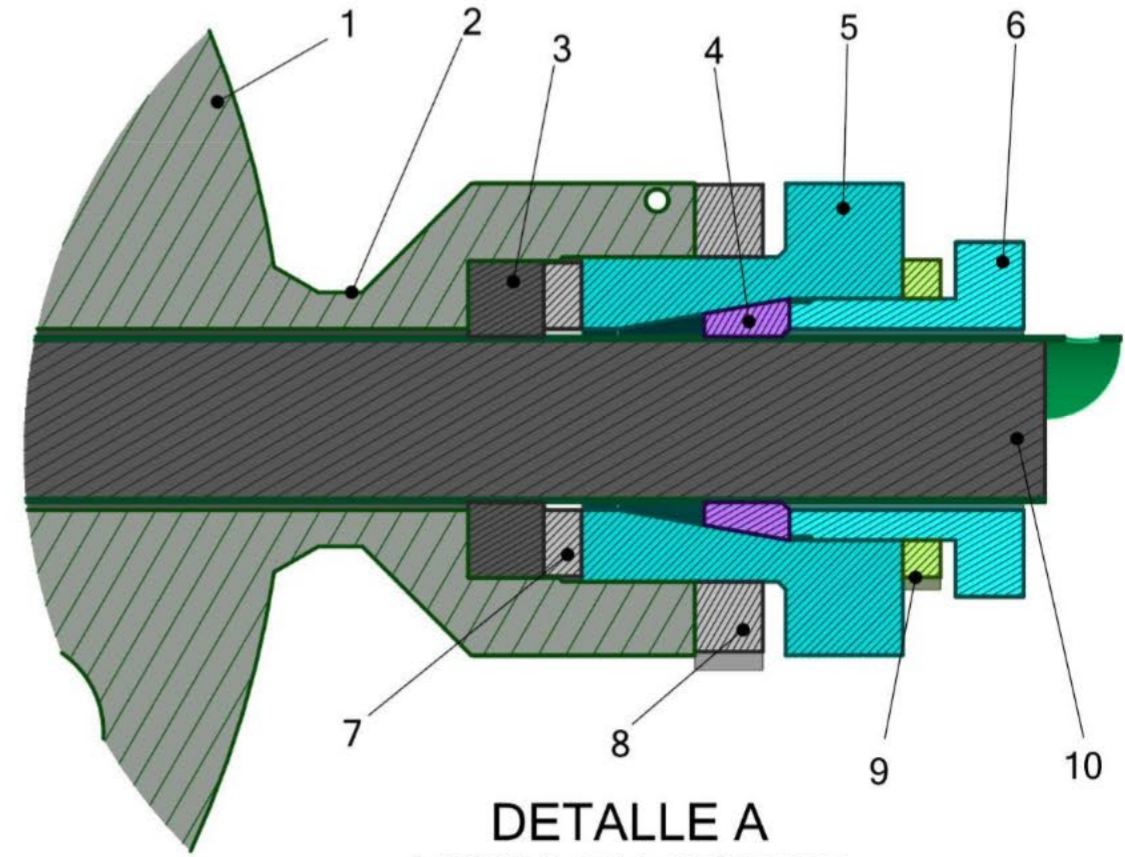
PLATAFORMA DE MONITOREO INTERNO

Conjunto general

TAM. A3	DWG NO. PMI-01-H1	REV 1
ESCALA 1:5	Realizó: A.M.B.	HOJA 1 de 2



DETALLE A
VISTA FRONTAL



DETALLE A
VISTA EN CORTE

1	Brida	SA-182 F60
2	Soporte de sello	SA-182 F60
3	Elastómero o sello	FKM-90
4	Cuñas o sujetadores	SA-182 F60
5	Tapón de sello	SA-182 F60
6	Tapón de sujeción	SA-182 F60
7	Arandela de compresión	SA-182 F60
8	Contratuerca de tapón de sello	SA-182 F60
9	Contratuerca de tapón de sujeción	SA-182 F60
10	Varilla porta sensores	SA-182 F60 + Epoxi

PLATAFORMA DE MONITOREO INTERNO

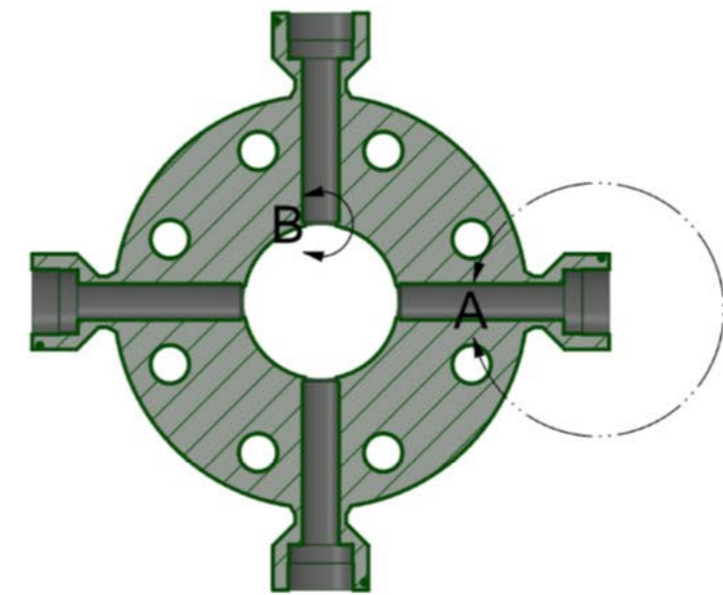
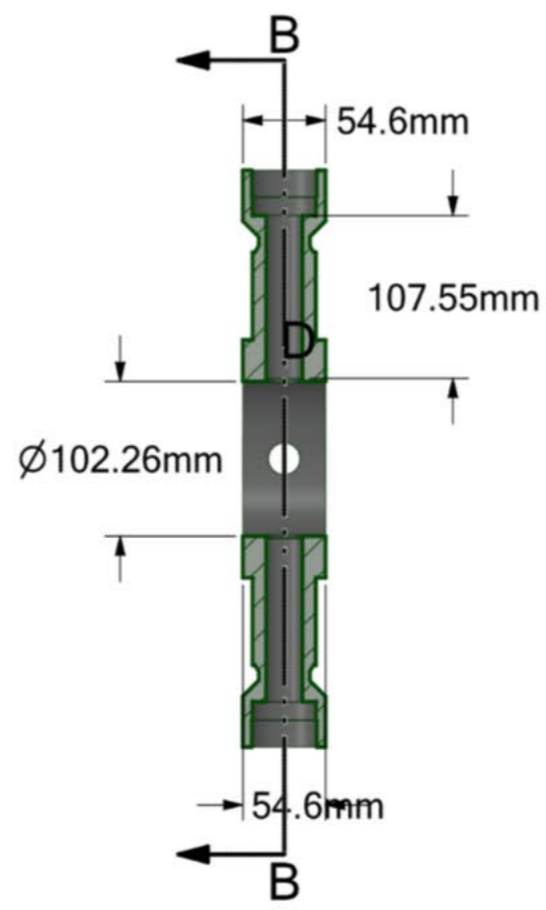
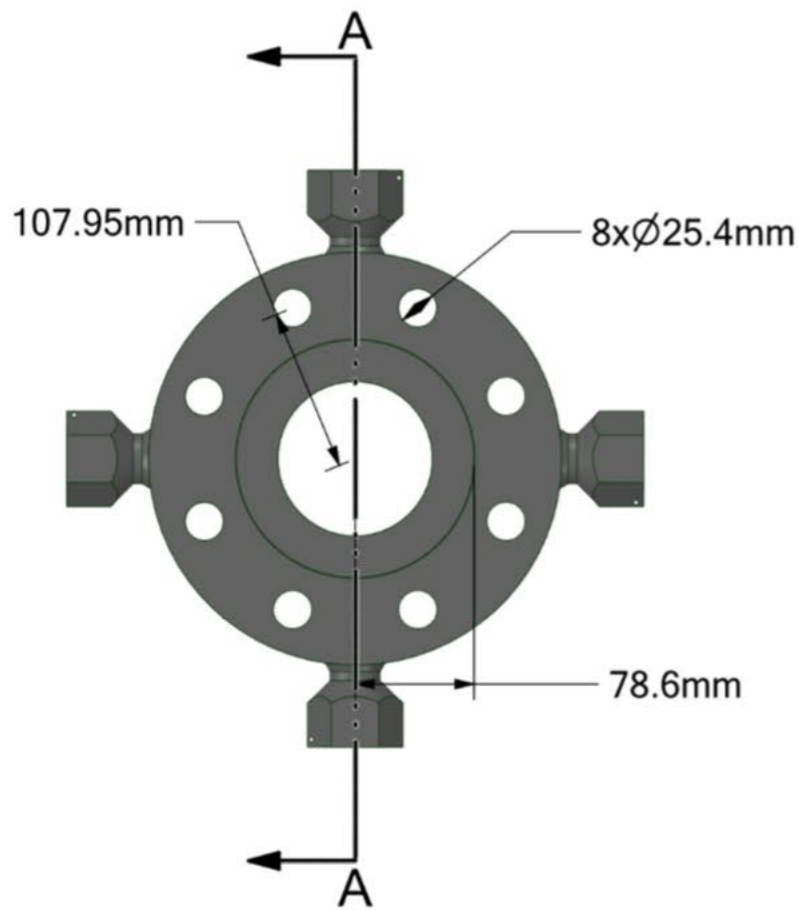
Conjunto General - Detalle A

TAM. A3	DWG NO. PMI-01-H2	REV 1
------------	----------------------	----------

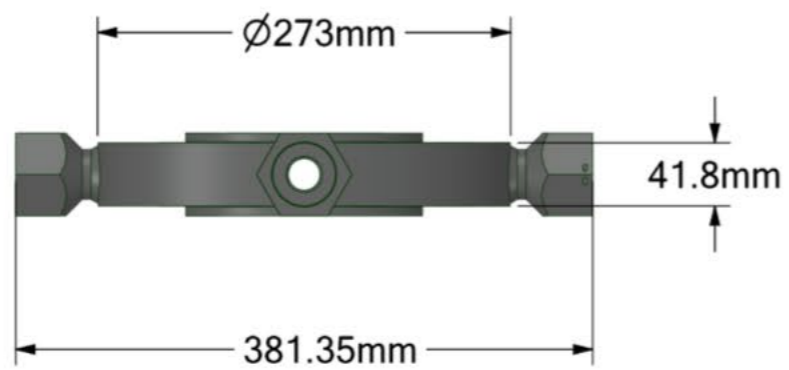
ESCALA 1:5

Realizó: A.M.B.

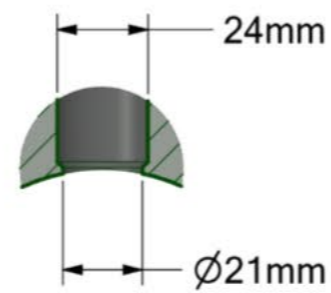
HOJA 2 de 2



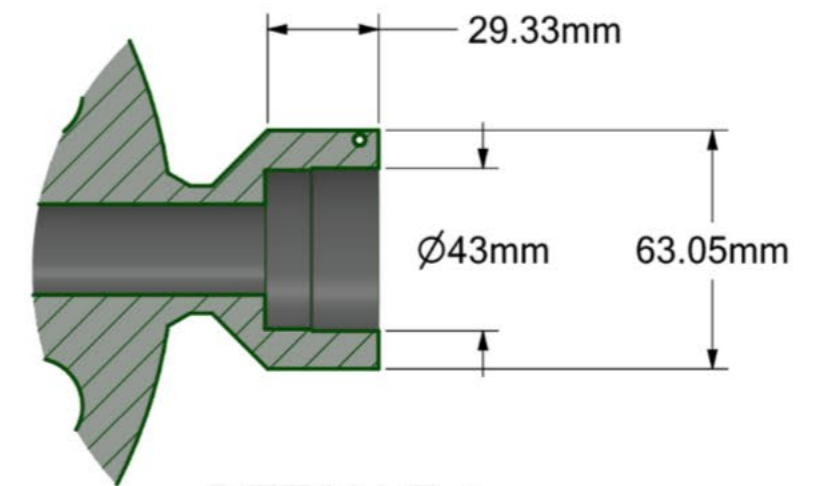
CORTE B-B



CORTE A-A



DETALLE B
ESCALA 1:2



DETALLE A
ESCALA 1:2

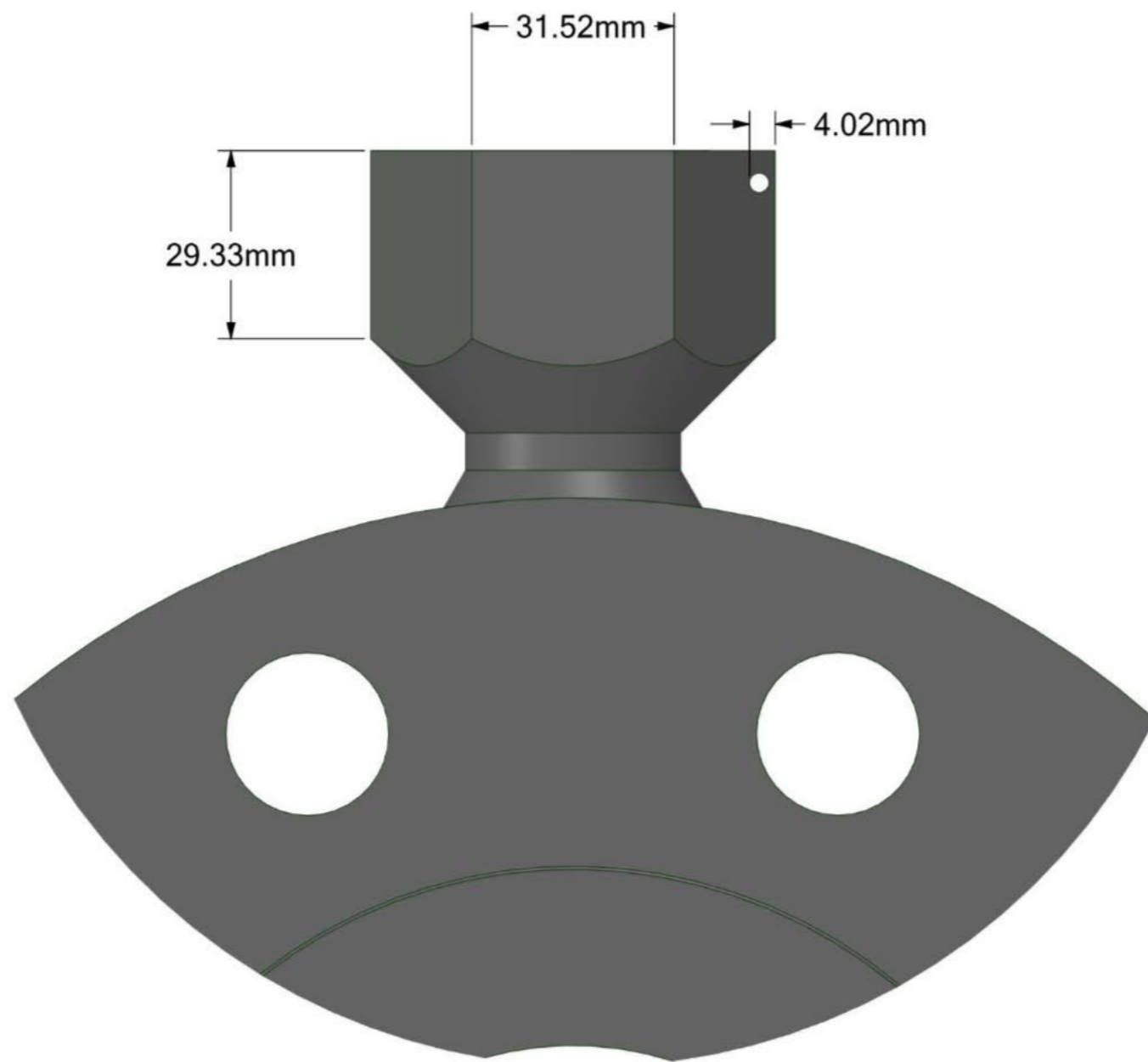


DETAIL D
SCALE 1:1

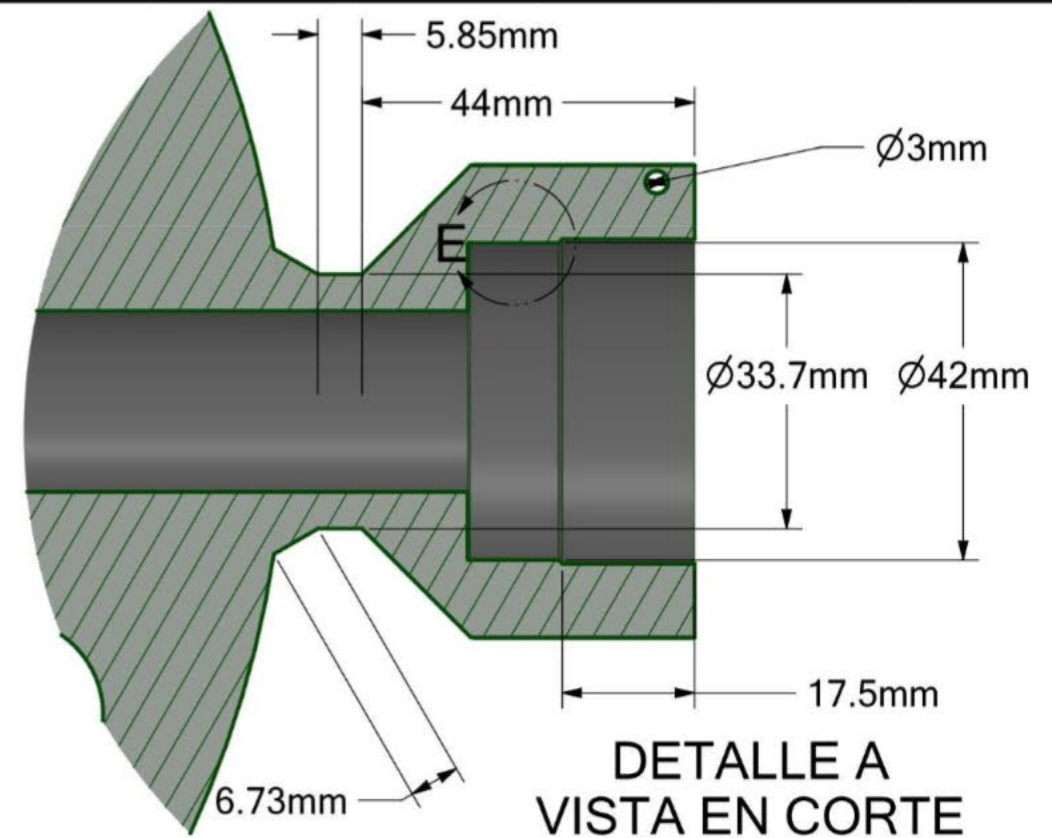
PLATAFORMA DE MONITOREO INTERNO

Brida y soporte

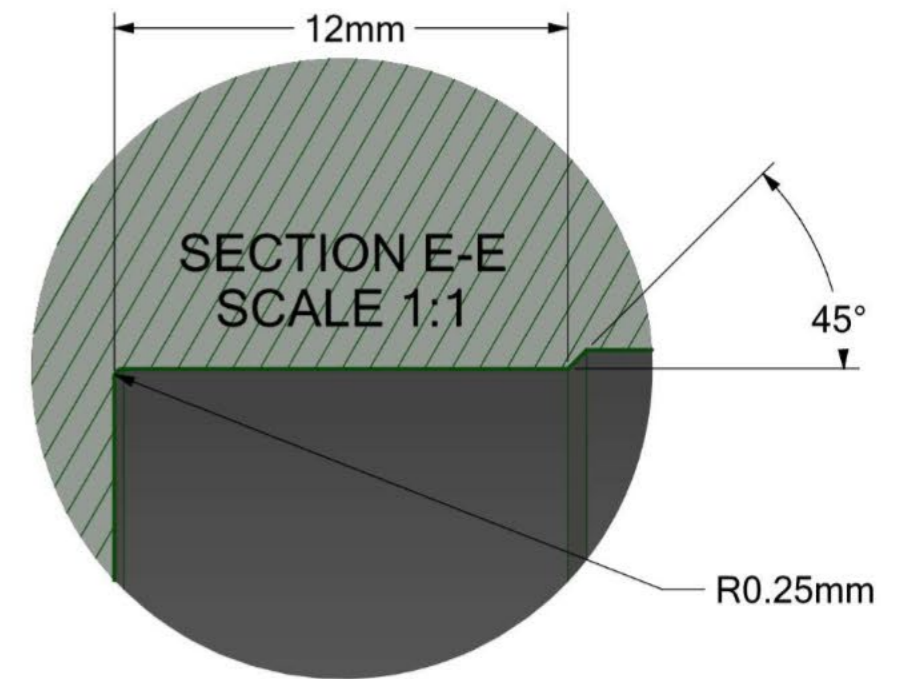
TAM. A3	DWG NO. PMI-02-H1	REV 1
ESCALA 1:5	Realizó: A.M.B.	HOJA 1 de 3



DETALLE A
VISTA FRONTAL



DETALLE A
VISTA EN CORTE

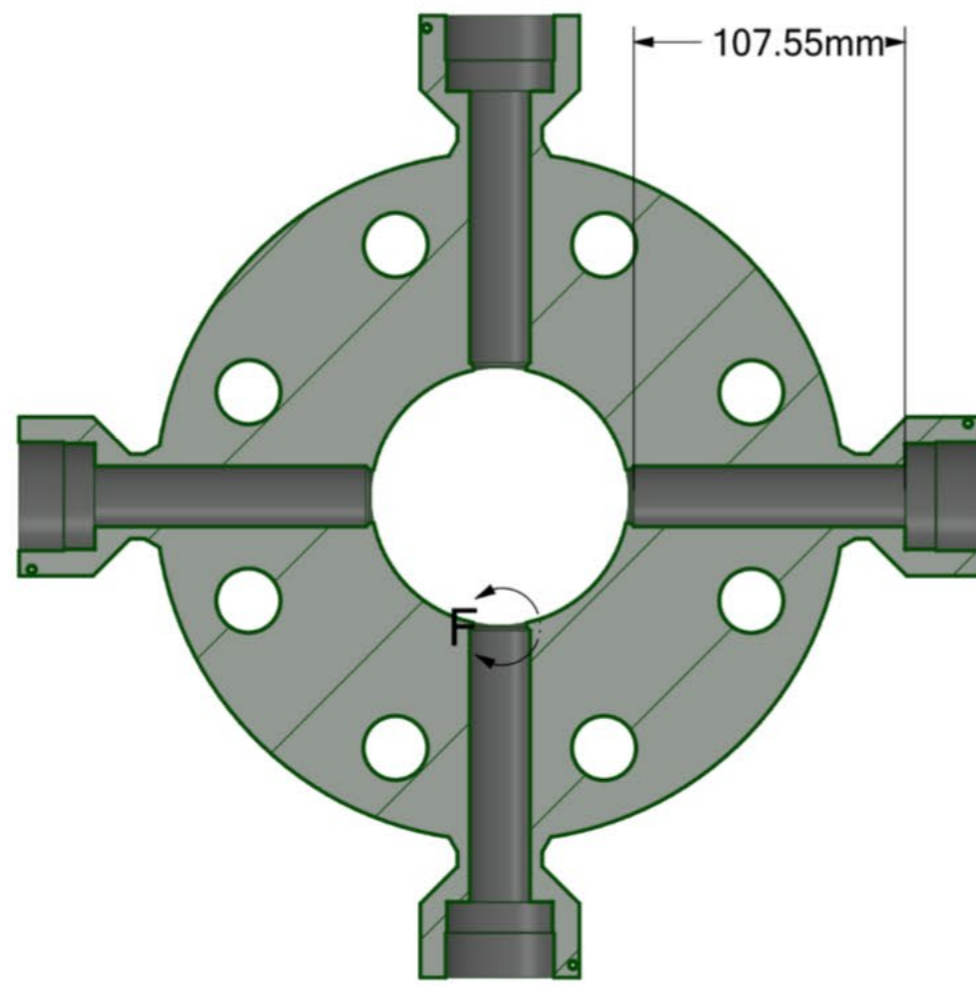


DETALLE E
ESCALA 5:1

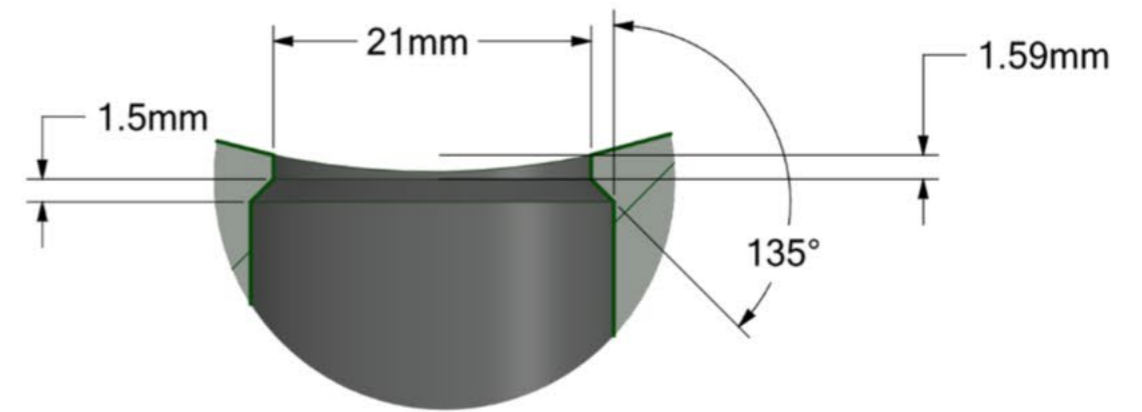
PLATAFORMA DE MONITOREO INTERNO

Brida y soporte - Detalles

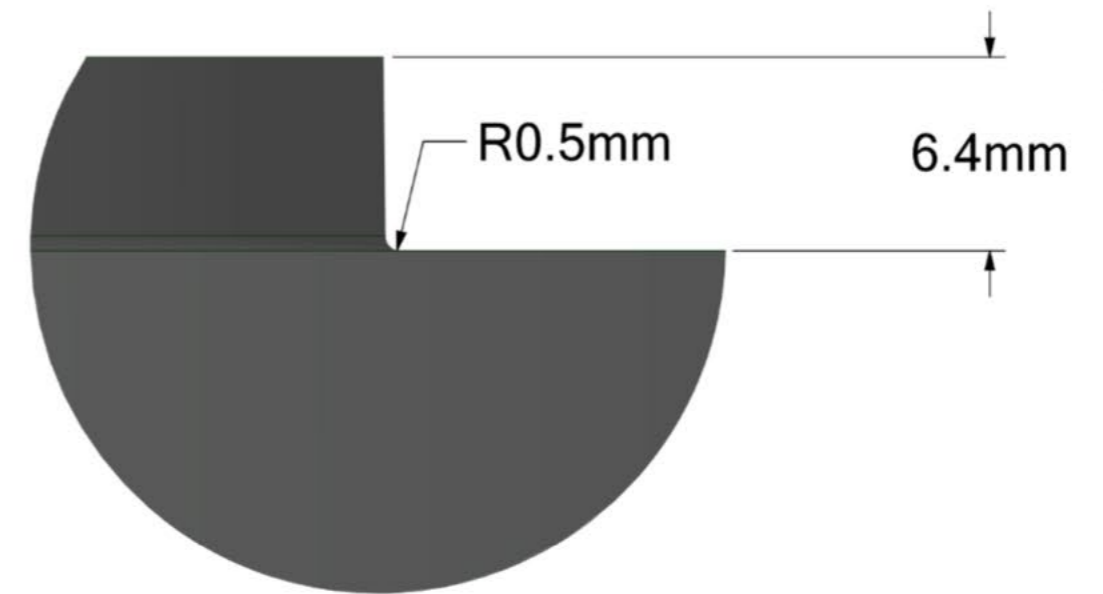
TAM. A3	DWG NO. PMI-02-H2	REV 1
ESCALA 1:5	Realizó: A.M.B.	HOJA 2 de 3



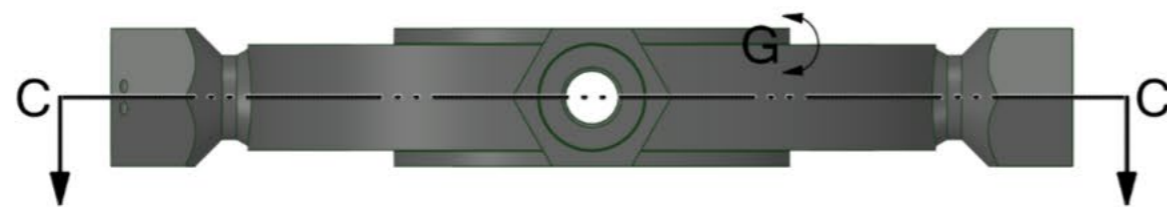
CORTE C-C



DETALLE F
ESCALA 2:1

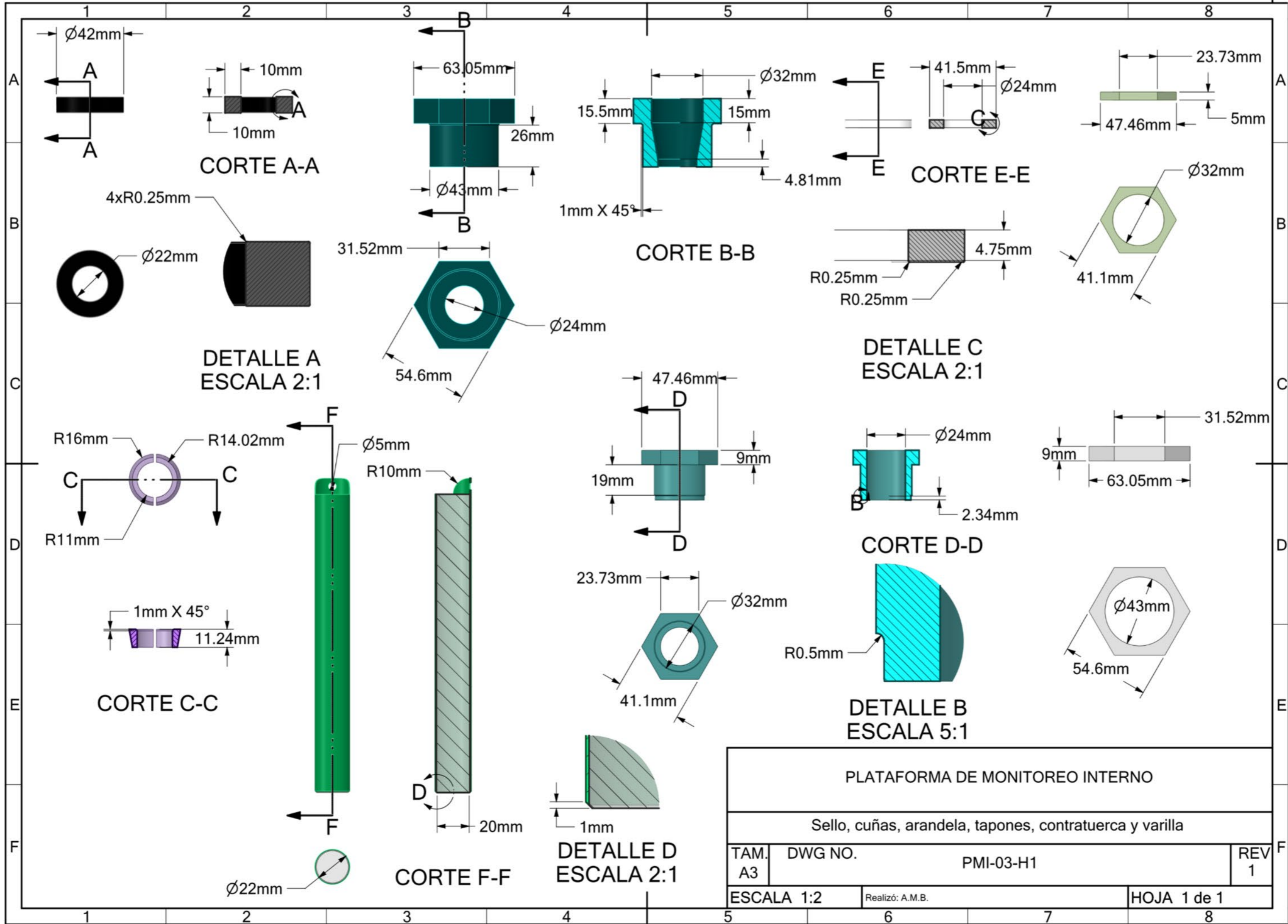


DETALLE G
ESCALA 4:1



ESCALA 1:3

PLATAFORMA DE MONITOREO INTERNO			
Brida y soporte - Detalles			
TAM. A3	DWG NO. PMI-02-H3	REV 1	
ESCALA 1:5	Realizó: A.M.B.	HOJA 3 de 3	



PLATAFORMA DE MONITOREO INTERNO			
Sello, cuñas, arandela, tapones, contratuerca y varilla			
TAM. A3	DWG NO. PMI-03-H1	REV 1	
ESCALA 1:2	Realizó: A.M.B.	HOJA 1 de 1	