

Tabla de Contenidos

| | |
|---|-----------|
| 1. Descripción y objetivo del entregable..... | 4 |
| 2. Datos básicos del proyecto..... | 5 |
| 3. Objetivos | 6 |
| 4. Acciones realizadas | 7 |
| 5. Principales resultados obtenidos | 8 |
| 5.1. Estudio y selección de materiales para condiciones severas..... | 8 |
| 5.1.1. Análisis de materiales..... | 8 |
| 5.1.2. Búsqueda de propiedades en bases de datos. | 15 |
| 5.1.3. Evaluar y seleccionar en base a las propiedades. | 19 |
| 5.2. Diseño y planificación de ensayos. | 21 |
| 5.2.1. Evaluación de ensayos para aplicación de condiciones severas. | 21 |
| 5.2.2. Diseño de probetas y utillaje..... | 23 |
| 5.2.3. Definición del plan de ensayos..... | 29 |
| 5.3. Control del proceso de soldadura y preparación de probetas. | 30 |
| 5.3.1. Definición de las fases de ejecución de la soldadura | 30 |
| 5.3.2. Identificar operaciones críticas y los parámetros de control. | 34 |
| 5.4. Desarrollo de cálculos de elementos finitos y análisis de resultados | 35 |
| 5.4.1. Preparación del 3D y mallado de elementos finitos. | 35 |
| 5.4.2. Generación de modelos implícitos lineales, quasi-lineales y modelos explícitos. | 37 |
| 5.4.3. Ajuste de los distintos modelos con las propiedades teóricas del material. | 38 |
| 5.4.4. Análisis de resultados..... | 40 |
| 5.5. Realización de ensayos..... | 45 |
| 5.5.1. Preparación del montaje y ajuste de la instrumentación. | 45 |
| 5.5.2. Ejecución y toma de datos de la tanda de ensayos con la probeta 1. | 47 |
| 5.5.3. Ejecución y toma de datos de la tanda de ensayos con la probeta 2. | 58 |
| 5.5.4. Ejecución y toma de datos de la tanda de ensayos con la probeta 3. | 61 |
| 5.6. Correlación de resultados | 64 |
| 5.6.1. Combinación de resultados para la correlación. | 64 |
| 5.6.2. Identificación de opciones de ajuste en el modelo de simulación..... | 69 |
| 5.7. Conclusiones | 72 |
| 6. Elementos innovadores..... | 73 |

7. Referencias bibliográficas..... 74

1. Descripción y objetivo del entregable

Este proyecto está encuadrado en la línea estratégica de actuación que lleva a cabo AIDIMME en el campo del desarrollo de productos y sistemas (diseño, cálculo, análisis, simulación, nuevas funcionalidades) cuyas sublíneas de trabajo son la optimización funcional y topológica, el modelado digital de productos y procesos, y las soluciones avanzadas de diseño para productos tradicionales.

El proyecto SIMUPROD plantea una investigación sobre el análisis y simulación del comportamiento de materiales en condiciones severas de trabajo para desarrollar una metodología que permita diseñar productos que prevengan los posibles fallos o roturas derivados de las exigencias especiales.

En el presente documento se recopilan las principales tareas realizadas durante la ejecución del proyecto SIMUPROD, con el objetivo de resumir los principales resultados obtenidos durante el año 2020 y difundir sus resultados.

2. Datos básicos del proyecto

PROYECTO: SIMUPROD (Modelos de caracterización de comportamiento en productos sometidos a condiciones de alta presión y/o temperatura)

PROGRAMA EN EL QUE SE DESARROLLA:

Líneas de I+D independiente del Plan de Actividades de carácter no económico de AIDIMME 2020

LÍNEA ESTRATÉGICA:

DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE PRODUCTO. Desarrollo de productos y sistemas (diseño, cálculo, análisis, simulación, nuevas funcionalidades).

SUBLÍNEAS DE TRABAJO:

DOP1 Optimización funcional y topológica

DOP2 Modelado digital de productos y procesos

DOP3 Soluciones avanzadas de diseño para productos tradicionales

ACTIVIDADES DE I+D INDEPENDIENTES:

| | |
|---|-----------|
| IVACE FONDOS FEDER (Enero 2017-Junio2020) | MEND-ME |
| IVACE FONDOS FEDER | GIROSCOPE |
| FONDOS GVA 2020 | SIMUPROD |

3. Objetivos

El objeto del proyecto es investigar la generación de modelos de simulación, que reproduzcan y puedan predecir el comportamiento de materiales y productos sometidos a condiciones severas en servicio y prevenir así posibles fallos o roturas. En concreto, se estudian las superaleaciones base níquel, que son de gran interés en sectores como el petroquímico, nuclear, centrales térmicas, automóvil, aeronáutico y aeroespacial, ya que presentan buenas prestaciones en condiciones de altas presiones, temperatura y corrosión

El interés del proyecto reside en el estudio de una metodología para uniones soldadas, en las cuales se puede producir avances de grieta y/o efectos de fragilización debida al hidrógeno, producida en ambientes corrosivos, y su implementación en modelos de análisis numérico. Este fenómeno se ve potenciado por la temperatura.

Como la predicción de este fallo no está contemplada en los modelos de material utilizados en la simulación por elementos finitos, se plantea realizar estudios, basados en ensayos instrumentados sobre probetas y simulaciones numéricas para tratar de obtener un modelo que refleje la ley de comportamiento que mejor se ajuste a las pruebas realizadas. El objetivo es disponer de métodos numéricos adaptados a las características de estas uniones, para reproducir las condiciones en las que se produce el evento de fallo o fenómeno que se busca.

Estos estudios no son habituales en la industria, sino que entran en el campo de las investigaciones del comportamiento de los materiales. Se hacen estos estudios debido a la dificultad de implementar las pruebas en laboratorios, y correlacionarlos con modelos no definidos para cada material, etc.

4. Acciones realizadas

Las acciones realizadas durante la consecución del proyecto se pueden sintetizar en las siguientes acciones principales:

- Estudio y selección de materiales para condiciones severas.
- Diseño y planificación de ensayos.
- Control del proceso de soldadura y preparación de probetas
- Desarrollo de cálculos de elementos finitos y ajuste del modelo de material utilizando herramientas de estudio paramétrico acopladas con las simulaciones realizadas con Optistruct y Radioss .
- Ajuste de los medios auxiliares y realización de ensayos en medio corrosivo.
- Captura y tratamiento de los datos de ensayo. (fuerza actuador, deformación registrada en galgas, evolución de la temperatura, tiempo hasta la rotura, etc.)
- Correlación de los nuevos resultados.

5. Principales resultados obtenidos

5.1. Estudio y selección de materiales para condiciones severas.

En este apartado se han examinado los materiales más comunes empleados en conductos, intercambiadores y reactores sometidos a condiciones de temperatura y presión. A continuación se ha realizado un análisis de los materiales con buenas propiedades en condiciones de trabajo severas no utilizados habitualmente, teniendo en cuenta los factores debilitadores como ambientes corrosivos. Por último, se han seleccionado los materiales metálicos de interés, recopilando los valores teóricos de composición y propiedades resistentes, y se ha elegido el más apropiado para el estudio.

5.1.1. Análisis de materiales.

Habitualmente, en la fabricación de componentes sometidos a condiciones de presión y temperatura, se emplean materiales con una buena resistencia estructural tanto para soportar la presión interna como las fuerzas externas derivadas de su funcionamiento. En el caso de componentes para transmisión térmica, como los intercambiadores, se necesita además que el material sea un buen conductor del calor. Para los conductos, accesorios y reactores sometidos a presión y temperatura, la principal característica es la resistencia y no es necesario que se trate de un buen conductor térmico sino todo lo contrario. Se precisan materiales que no transmitan bien la temperatura para reducir pérdidas y favorecer que la temperatura de las superficies accesibles sea menor. Tanto es así que en ocasiones se utilizan aislantes para recubrir las caras exteriores. Siguiendo estas dos vías de producto se analizan los materiales utilizados y sus propiedades.

Intercambiadores

La base de los intercambiadores es la transmisión de calor de un fluido a otro a través de una barrera sólida que los separa. Desde el punto de vista constructivo se puede realizar una clasificación en las siguientes tipologías:

- Tubería doble
- Enfriado por aire
- Tipo placa
- Carcasa y tubos.

En el caso concreto de los intercambiadores de carcasa y tubos se puede decir que es un tipo de intercambiador bastante común. Tanto es así que existe una normativa de referencia generada por un conjunto de fabricantes que se denomina Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association[1]. En dicho documento se detallan todo tipo de recomendaciones relativas al diseño y fabricación de intercambiadores.

Inicialmente se hace una división de los intercambiadores de carcasa y tubos por tipo de servicio y condiciones definiendo las clases R, C y B como:

- Clase R: Servicio en condiciones severas de procesamiento de petróleo y derivados.
- Clase C: Servicio en condiciones moderadas de productos genéricos y comerciales.
- Clase B: Servicio de procesos químicos.

Posteriormente, dependiendo de esa clasificación, describe las condiciones de corrosión admisibles para tres tipos de materiales: Acero al carbono, hierro fundido y aleaciones.

RCB-1.5 STANDARD CORROSION ALLOWANCES

The standard corrosion allowances used for the various heat exchanger parts are as follows, unless the conditions of service make a different allowance more suitable and such allowance is specified by the purchaser.

Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association

MECHANICAL STANDARDS TEMA CLASS R C B

SECTION 5

RCB-1.51 CARBON STEEL PARTS

R-1.511 PRESSURE PARTS

All carbon steel pressure parts, except as noted below, are to have a corrosion allowance of 1/8" (3.2 mm).

CB-1.511 PRESSURE PARTS

All carbon steel pressure parts, except as noted below, are to have a corrosion allowance of 1/16" (1.6 mm).

Figura 1. Limitaciones de corrosión acero al carbono.

Fuente: Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association[1]

RCB-1.52 ALLOY PARTS

Alloy parts are not required to have corrosion allowance.

R-1.53 CAST IRON PARTS

Cast iron pressure parts shall have a corrosion allowance of 1/8" (3.2 mm).

CB-1.53 CAST IRON PARTS

Cast iron pressure parts shall have a corrosion allowance of 1/16" (1.6 mm).

RCB-1.6 SERVICE LIMITATIONS

RB-1.61 CAST IRON PARTS

Cast iron shall be used only for water service at pressures not exceeding 150 psi (1034 kPa).

C-1.61 CAST IRON PARTS

Cast iron shall not be used for pressures exceeding 150 psi (1034 kPa), or for lethal or flammable fluids at any pressure.

Figura 2. Limitaciones de corrosión aleaciones y hierro de fundición.

Fuente: Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association[1]

Según el documento, la permisividad de corrosión es mucho menor en el acero al carbono y en los hierros de fundición para los intercambiadores de uso general y de productos químicos (clases C y B). En el caso de los aceros al carbono esta restricción viene condicionada al uso a presión de los elementos. Para los materiales de aleación, en cambio, no se exige ninguna limitación de corrosión.

El condicionante de la temperatura aparece claramente reflejado en la tabla de dimensionado y separación de los tubos no soportados:

TABLE RCB-4.52
MAXIMUM UNSUPPORTED STRAIGHT TUBE SPANS
Dimensions in Inches (mm)

| Tube OD | Tube Materials and Temperature Limits ° F (° C) | |
|--------------|---|--|
| | Carbon Steel & High Alloy Steel, 750 (399) Low Alloy Steel, 850 (454) Nickel-Copper, 600 (316) Nickel, 850 (454) Nickel-Chromium-Iron, 1000 (538) | Aluminum & Aluminum Alloys, Copper & Copper Alloys, Titanium Alloys At Code Maximum Allowable Temperature |
| 1/4 (6.4) | 26 (660) | 22 (559) |
| 3/8 (9.5) | 35 (889) | 30 (762) |
| 1/2 (12.7) | 44 (1118) | 38 (965) |
| 5/8 (15.9) | 52 (1321) | 45 (1143) |
| 3/4 (19.1) | 60 (1524) | 52 (1321) |
| 7/8 (22.2) | 69 (1753) | 60 (1524) |
| 1 (25.4) | 74 (1880) | 64 (1626) |
| 1-1/4 (31.8) | 88 (2235) | 76 (1930) |
| 1-1/2 (38.1) | 100 (2540) | 87 (2210) |
| 2 (50.8) | 125 (3175) | 110 (2794) |

Notes:

- (1) Above the metal temperature limits shown, maximum spans shall be reduced in direct proportion to the fourth root of the ratio of elastic modulus at temperature to elastic modulus at tabulated limit temperature.
- (2) In the case of circumferentially finned tubes, the tube OD shall be the diameter at the root of the fins and the corresponding tabulated or interpolated span shall be reduced in direct proportion to the fourth root of the ratio of the weight per unit length of the tube, if stripped of fins to that of the actual finned tube.
- (3) The maximum unsupported tube spans in Table RCB-4.52 do not consider potential flow induced vibration problems. Refer to Section 6 for vibration criteria.

Figura 3. Separación para tubos dependiente de la temperatura.

Fuente: Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association[1]

A partir de la tabla de la Figura 3 se puede deducir que en la medida que los diámetros de tubo aumentan se tiene que respetar una mayor separación entre tubos. Se puede deducir que cuando se quiere una mayor capacidad de transmisión de calor se tiene que dimensionar el intercambiador con tuberías de diámetro exterior mayor y a su vez hay que mantener separaciones mayores.

Sin embargo, desde el punto de vista de la selección de material es más interesante analizar las temperaturas máximas que aparecen en el encabezado de las dos columnas. En la primera columna se agrupan los aceros y aleaciones de níquel siendo la combinación de níquel-cromo-hierro la que mayor temperatura de trabajo presenta (538°C). En la segunda columna aparece el aluminio, cobre, titanio y sus aleaciones pero no se muestran las temperaturas máximas y se referencia a otro documento.

En alusión a la resistencia frente a vibraciones se explica en otro apartado que los aceros ferríticos y los aceros inoxidables austeníticos tienen una mayor resistencia ya que tienen un módulo elástico más alto que en el caso del aluminio y el latón. Si se analizan los valores del módulo de elasticidad disponible en la siguiente tabla se puede comprobar que los materiales con módulos de elasticidad más altos.

**TABLE D-10 M
MODULUS OF ELASTICITY**

| MATERIAL | TEMP. DEG. C. | kPo X 10 ⁺⁶ | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 21.1 | 37.8 | 93.3 | 148.9 | 204.4 | 260.0 | 315.6 | 371.1 | 426.7 | 482.2 | 537.8 | 593.3 | 648.9 |
| C STL, C-MO, MN-MO | 201.3 | 199.9 | 196.5 | 193.1 | 188.9 | 186.2 | 182.0 | 174.4 | 164.8 | 153.1 | 138.6 | 122.7 | 105.5 | |
| AUSTENITIC STN STL | 195.1 | 193.7 | 190.3 | 186.2 | 182.7 | 177.9 | 174.4 | 171.0 | 166.2 | 162.0 | 157.2 | 152.4 | 146.2 | |
| LOW CHROMES THRU 2% | 204.8 | 203.4 | 199.9 | 196.5 | 192.4 | 189.6 | 185.5 | 181.3 | 175.8 | 171.0 | 164.8 | 158.6 | 150.3 | |
| 2-1/4 CR-1 MO & 3 CR-1 MO | 211.0 | 209.6 | 205.5 | 202.7 | 198.6 | 195.1 | 191.0 | 186.8 | 181.3 | 176.5 | 169.6 | 163.4 | 155.1 | |
| INT CR-MO (5-9% CR) | 213.0 | 211.7 | 207.5 | 204.8 | 199.9 | 197.2 | 193.1 | 188.2 | 180.0 | 170.3 | 156.5 | 140.7 | 125.5 | |
| 12, 13, 15 & 17% CR | 201.3 | 199.9 | 196.5 | 192.4 | 188.2 | 184.1 | 180.0 | 176.5 | 170.3 | 160.0 | 148.2 | 131.7 | 114.5 | |
| LOW NI STEELS THRU 3-1/2% | 191.7 | 190.3 | 186.8 | 184.1 | 180.0 | 177.2 | 173.7 | 169.6 | 158.6 | 147.5 | 135.8 | 120.7 | 105.5 | |
| NI-CU ALLOY 400 (N04400) | 179.3 | 177.9 | 175.1 | 172.4 | 170.3 | 167.5 | 166.2 | 163.4 | 159.3 | 155.8 | 152.4 | 149.6 | 146.2 | |
| 90-10 CU-NI (C70600) | 124.1 | 123.4 | 121.3 | 119.3 | 116.5 | 114.5 | 110.3 | 106.2 | | | | | | |
| ALUMINUM | 68.9 | 68.3 | 66.2 | 63.4 | 60.0 | 55.8 | | | | | | | | |
| NI-CR-FE ALLOY 600 (N06600) | 213.7 | 212.4 | 208.2 | 206.2 | 203.4 | 199.9 | 197.9 | 194.4 | 190.3 | 186.2 | 182.0 | 178.6 | 174.4 | |
| NI-FE-CR (N08800 & N08810) | 196.5 | 195.1 | 191.7 | 188.9 | 186.8 | 183.4 | 182.0 | 178.6 | 175.1 | 171.0 | 166.9 | 164.1 | 160.0 | |
| NI-MO ALLOY B (N10001) | 214.4 | 213.0 | 208.9 | 206.2 | 203.4 | 200.6 | 198.6 | 195.1 | 191.0 | 186.8 | 182.0 | 179.3 | 174.4 | |
| NI-MO-CR ALLOY C-276 (N10276) | 205.5 | 204.1 | 200.6 | 197.2 | 195.1 | 192.4 | 190.3 | 186.8 | 182.7 | 178.6 | 174.4 | 171.7 | 167.5 | |
| NICKEL 200 (N02200) | 206.8 | 205.5 | 202.0 | 198.6 | 196.5 | 193.7 | 191.7 | 188.2 | 184.1 | 180.0 | 175.8 | 173.1 | 168.9 | |
| COPPER & AL-BRONZE | 117.2 | 116.5 | 114.5 | 112.4 | 110.3 | 107.6 | 104.1 | 100.0 | | | | | | |
| COMMERCIAL BRASS | 103.4 | 102.7 | 100.7 | 99.3 | 97.2 | 95.1 | 92.4 | 88.3 | | | | | | |
| ADMIRALTY | 110.3 | 109.6 | 107.6 | 106.2 | 103.4 | 101.4 | 97.9 | 94.5 | | | | | | |
| TITANIUM | 106.9 | 106.2 | 103.4 | 100.7 | 96.5 | 91.7 | 86.9 | 82.0 | 77.2 | | | | | |
| 70-30 CU-NI (C71500) | 151.7 | 151.0 | 148.2 | 145.5 | 142.7 | 139.3 | 135.1 | 129.6 | | | | | | |
| NI-MO ALLOY B-2 (N10665) | 216.5 | 215.1 | 211.0 | 207.5 | 205.5 | 202.0 | 199.9 | 197.2 | 192.4 | 188.2 | 184.1 | 180.6 | 176.5 | |
| NI-FE-CR-MO-CU (N08825) | 193.1 | 191.7 | 188.2 | 185.5 | 183.4 | 180.6 | 178.6 | 175.8 | 171.7 | 168.2 | 164.1 | | | |
| MUNTZ (C36500) | 103.4 | 102.7 | 100.7 | 99.3 | 97.2 | 95.1 | 92.4 | 88.2 | | | | | | |
| ZIRCONIUM (R60702) | 99.3 | 95.8 | 92.4 | 85.5 | 79.3 | 73.8 | 68.3 | | | | | | | |
| NI-CR-MO-CB (N06625) | 206.8 | 202.0 | 198.6 | 196.5 | 193.7 | 191.7 | 188.2 | 184.1 | 180.0 | 175.8 | 173.1 | 168.9 | 165.5 | |
| 7 MO (S32900) | 199.9 | 198.6 | 193.1 | 189.6 | | | | | | | | | | |
| 7 MO PLUS (S32950) | 199.9 | | | | | | | | | | | | | |
| TP 439 STN STL | 199.9 | | | | | | | | | | | | | |
| AL-6XN STN STL (N08367) | 195.1 | 193.7 | 188.9 | 184.8 | 180.0 | 175.8 | 171.0 | 166.2 | 161.3 | 157.2 | 152.4 | | | |
| AL-29-4-2 | 199.9 | | | | | | | | | | | | | |
| SEA-CURE | 213.7 | | | | | | | | | | | | | |
| 2205 (S31803) | 199.9 | 198.5 | 194.4 | 190.3 | 186.1 | 183.4 | 180.6 | | | | | | | |
| 3RE60 (S31500) | 199.9 | 197.9 | 189.6 | 184.8 | 179.2 | 174.4 | 168.9 | 164.1 | 158.6 | | | | | |

REFERENCES:

ASME SECTION II, D, 1998 EDITION
R.A. MOEN (COLLECTED PAPERS, LETTERS & DATA)
HUNTINGTON ALLOYS, INC. BULLETIN #15M1-76T-42
ALLEGHENY LUDLUM STEEL CORP.
CABOT-STELLITE
TELEDYNE WAH CHANG ALBANY

INTERNATIONAL NICKEL CO.
ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION # 181
CARPENTER TECHNOLOGY
TRENT TUBE
AIRCO, INC.
SANDVIK TUBE

Figura 4. Módulo Elástico de materiales para intercambiadores.

Fuente: Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association [1]

A la vista de la documentación examinada y tras realizar una búsqueda entre los fabricantes de intercambiadores, se puede concluir que la corrosión juega un papel importantísimo en la selección del material junto con las condiciones de presión y temperatura. De la documentación disponible en alguno de ellos como Hidroterm [2] se agrupan una serie de indicaciones relacionadas con la selección de material que se exponen a continuación.

- **Coste de los materiales.** Este es un factor que condiciona la selección de materiales resistentes a la corrosión ya que su coste es más alto. Normalmente no se hace un uso generalizado de aceros inoxidable austeníticos u otro tipo de aleaciones con base níquel, cobre o titanio si no es estrictamente necesario. Se recomienda que el fluido más corrosivo fluya por el interior de los tubos para mantener la carcasa a

salvo y en caso de que no sea posible se deben plantear montajes que permitan el mantenimiento y la sustitución de las piezas.

- **Corrosión.** El acero al carbono es el material más comúnmente utilizado en los intercambiadores a pesar de los problemas de corrosión que puede presentar. En servicios más exigentes de plantas químicas o en procesos de refinado de petróleo también es habitual hacer uso de acero inoxidable. Otra opción es combinar varios tipos de material dependiendo del tipo de fluido que circulará por los elementos y del grado de corrosión que pueden provocar. Este último caso exige precaución para no generar un par galvánico con ataque electrofítico.

En usos de enfriamiento por agua se utilizan aleaciones de cobre, especialmente el latón, para la construcción de deflectores o de placas tubulares de intercambiadores. Para el uso con agua también existen aleaciones de aluminio con uniones metalúrgicas entre un cuerpo central y una capa exterior de distinta composición. Estas distintas aleaciones funcionan a modo de ánodo de sacrificio por el exterior y presentan mejores características resistentes gracias a la aleación del núcleo.

Otras soluciones incorporan incluso hierro de fundición con un recubrimiento de pintura, plomo o incluso plásticos sin embargo su funcionamiento con temperaturas elevadas no está contemplado.

- **Materiales bimetálicos.** Si las condiciones de corrosión del fluido o la temperatura son demasiado elevadas una opción puede ser el uso de materiales bimetálicos. Al igual que en el caso del aluminio existen combinaciones entre tipos de aceros en formato de tubos con el material más resistente a la corrosión en la parte interna y el material con mejores propiedades mecánicas en la parte exterior. Esta solución tiene inconvenientes en los extremos si queda expuesto el par galvánico y en las uniones soldadas si existen incompatibilidades entre los materiales.

Reactores

La búsqueda de materiales utilizados para la construcción de reactores se centra en dos fuentes de información: bases de datos de materiales y fabricantes de materiales para condiciones de trabajo severas.

En la base de datos MatWeb[3] se puede realizar un filtrado de materiales por categorías entre las que se han preseleccionado las que se muestran en el siguiente esquema:

Figura 5. Clasificación de categorías de materiales. Fuente: Elaboración propia a partir de MatWeb[3]

De esas categorías tiene especial interés el grupo de Pressure Vessel Steel ya que se trata de aceros de uso recomendado para recipientes a presión. Dentro de esta denominación se encuentran los siguientes materiales que se van a tener en cuenta en el análisis.

- ASTM A285, A516 y A414
- Bissalloy Steels BisPlate
- High performance Austenitic Stainless. Outokumpu 904L, 254SMO y 4565

Desde la perspectiva de los materiales que ofrecen los fabricantes es especialmente interesante la información ofrecida por Parrinst [4] . En su web se ofrece un listado de los materiales utilizados para fabricación de reactores y las características de cada uno de ellos que se detalla a continuación:

- Acero Inoxidable Tipo 316/316L

En general este tipo de inoxidable está indicado para sistemas con compuestos orgánicos con alguna excepción pero los ácidos acético y fórmico se utilizan normalmente sin presentar problemas.

Cuando se trata de compuestos inorgánicos existen más problemas. El acero inoxidable 316 se puede utilizar con amoníaco y sus compuestos. Además presenta una resistencia útil a temperatura ambiente frente a ácidos sulfúrico, fosfórico, sulfuroso y nítrico diluidos, pero esto cambia a temperaturas y presiones elevadas aumentando su vulnerabilidad. Para procesos con ácidos halógenos son especialmente desaconsejables a cualquier temperatura.

Es llamativo que su resistencia a la corrosión superficial por cáusticos es excelente si no se superan los 100°C y también se puede utilizar con cloruros siempre que el material no se someta a tensión ya que esto fomentaría la corrosión.

- Aleación C-276

Esta aleación es una de las más utilizadas en trabajos de investigación después del acero inoxidable 316. Su composición es una combinación de níquel cromo y molibdeno. Su propósito específico es el uso con cloro húmedo y otros compuestos clorados pero en general ofrece una resistencia muy amplia en comparación con el resto de aleaciones.

- Níquel 200

Se trata de una denominación comercial del níquel. Está indicado para procesos con ambientes cáusticos con temperaturas elevadas pero no es muy utilizado debido al elevado coste que supone mecanizarlo.

- Titanio

Se recomienda su uso para agentes oxidantes del tipo ácido nítrico, agua regia, algunos ácidos mixtos e incluso es bastante resistente a los iones cloruro. Con ácidos reductores tipo sulfúrico o clorhídrico se puede utilizar titanio reducido si existen iones oxidantes para inhibir la acción de corrosión. Es necesario advertir que en condiciones de presión y temperatura elevadas junto con oxígeno es peligroso dado que puede entrar en combustión.

- Circonio

Comercialmente se encuentra como Grado 702 y Grado 705. El primero tiene una mayor disponibilidad y presenta una resistencia a la corrosión mayor pese a que el 705 tenga mejores propiedades resistentes a alta presión y temperatura. En su uso debe evitarse los iones oxidantes férricos, cúpricos así como los fluoruros. Esta recomendado para ácidos clorhídrico y sulfúrico, siendo bastante resistente también a los ácidos fosfóricos, nítrico y a las soluciones alcalinas.

- Aleación 20

Es un acero inoxidable enriquecido que permite ampliar la utilidad del SS316 para usos con ácido sulfúrico diluido a temperaturas elevadas y puede utilizarse para ácido nítrico y fosfórico.

- Aleación 400

Esta aleación está formada por níquel y cobre en proporción de 2/3 por 1/3 respectivamente. Sus propiedades frente a la corrosión son casi similares al níquel pero se aumenta su capacidad de trabajo a presiones y temperaturas elevadas. Adicionalmente, las operaciones de mecanizado se pueden realizar con más facilidad lo que reduce el coste de manufactura.

Las aplicaciones con soluciones causticas y sales de cloruro son soportadas por esta aleación ya que no produce corrosión por agrietamiento ni debida a la tensión. Por el contrario, al tener cobre en una gran proporción, no está indicada en procesos con amoníaco y ácido nítrico.

- Aleación 600

Se trata de una aleación con un contenido de níquel alto con un comportamiento excepcional con cáusticos y cloruros en condiciones de presión y temperatura elevadas incluso en presencia de compuestos de azufre. Sus características resistentes en condiciones severas de presión y temperatura y su amplia gama de resistencia a la corrosión están muy bien consideradas pero su uso está normalmente limitado por su coste elevado.

- Aleación B-2/B-3

Su composición tiene gran cantidad de níquel y molibdeno y su resistencia a la corrosión es inigualable en el uso con ácidos de reducción como clorhídrico, sulfúrico y fosfórico. Sin embargo, sus características ante la corrosión se pueden debilitar enormemente si existen iones oxidantes y ferríticos incluso en proporciones muy bajas.

- Aleación 625

La resistencia a la corrosión de esta aleación es similar al C-276 pero sus propiedades mecánicas son mucho mejores y está especialmente indicado para usos a altas presiones y temperaturas.

- Aleación 230

Su composición está formada mayormente por níquel, cromo tungsteno y cobalto. Posee unas propiedades ante la corrosión similar a la aleación 600 pero al igual que en el caso anterior sus características mecánicas a altas temperaturas son superiores. Tanto es así que está indicado para funcionar hasta 980°C y se utiliza también como material para tornillería.

- Aleación A-286

Esta aleación tiene una resistencia muy elevada a 371°C y se utiliza de forma habitual para fabricación de tornillería. Por su composición se clasifica dentro de la familia de los aceros inoxidables.

Partiendo de los materiales analizados y descritos anteriormente se realiza una preselección de aquellos que presentan propiedades que los hacen más interesantes en su uso a altas temperaturas y presiones. Se dejarán fuera los materiales base aluminio y cobre por tener unas características mecánicas insuficientes en condiciones severas y aquellos que por coste no resultan tan interesantes como el níquel 200, las aleaciones de titanio y las de circonio. En cambio en esta primera selección incluirá el acero inoxidable austenítico 316 por ser la referencia más común, las aleaciones 20 y A-286 de familia de aceros inoxidables y las aleaciones de níquel C-276, 625 y 230. Se descartan el resto de aceros o aleaciones níquel por considerar que sus propiedades son similares o inferiores.

5.1.2. Búsqueda de propiedades en bases de datos.

Las propiedades relevantes para el estudio de los materiales preseleccionados son la composición química y las características resistentes que vienen dadas por el módulo elástico y los límites elástico y de rotura. Es especialmente importante recopilar el comportamiento frente a temperatura de dichas características resistentes. También es interesante conocer el

comportamiento a corrosión con datos de concentración, tiempos y rotura o ratios de corrosión.

Los materiales en cuestión para la búsqueda de propiedades son el acero inoxidable 316, las aleaciones 20 y A-286 de familia de aceros inoxidables y las aleaciones de níquel C-276, 625 y 230. Los valores recopilados se han extraído de las bases de datos Total Material [5] y Matweb [3] así como de las páginas webs de los fabricantes Haynes Internacional [6] y Special metals [7].

Composición

La composición de los materiales a estudiar se descompone en los porcentajes de cada elemento de la tabla periódica que lo forma. Estos porcentajes pueden variar dentro de unos rangos establecidos en las normas o especificaciones que los regulan pero para compararlos se escogen los valores característicos. Hay que resaltar que en muchos casos existen elementos en porcentajes casi despreciables y, por lo general, el porcentaje de hierro es el que varía para ajustar el balance.

| Material | Composición | | | | | | |
|----------------|-------------|----|------|-----|-----|-------|------------|
| | Fe | Ni | Cr | Mo | Mn | Otros | |
| Acero Inox 316 | 65 | 12 | 17 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | Si |
| Aleación 20 | 35 | 34 | 20 | 2.5 | 2.0 | 6.5 | Cu, Cb |
| A-286 | 53 | 25 | 15 | 1.2 | 2 | 3.8 | Si, Ti, Al |
| C-276 | 6.5 | 53 | 15.5 | 16 | 1 | 8 | W, Co |
| Aleación 625 | 5 | 58 | 22 | 9 | 0.5 | 5.5 | Cb+Ta |
| Aleación 230 | 3 | 52 | 22 | 2 | 0.7 | 20.3 | Si, Co, W |

Tabla 1. Tabla comparativa composición. Fuente: Elaboración propia a partir de [3], [5], [6] y [7].

Se representan los valores en el siguiente gráfico para compararlos de manera más visual:

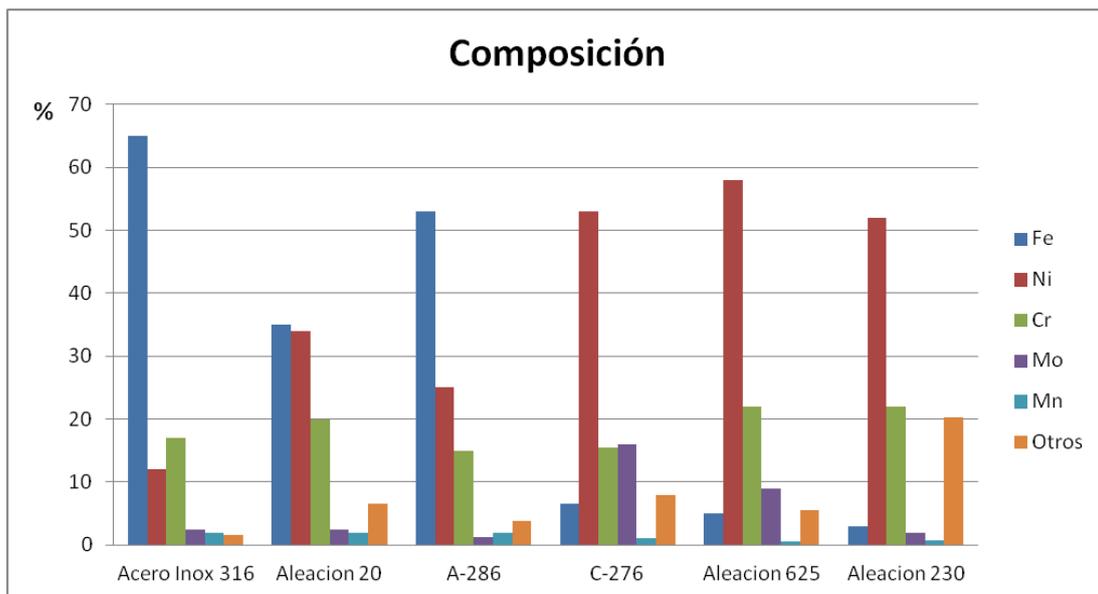


Figura 6. Gráfico comparativo composición. Fuente: Elaboración propia a partir de [3],[5],[6] y [7].

Como es de esperar el acero 316, la aleación 20 y la A-286 tienen una proporción mayoritaria de hierro ya que se clasifican como aceros inoxidable. En el caso de la aleación 20 puede observarse que el porcentaje de níquel es elevado pero no puede considerarse aleación base níquel como son las aleaciones C-276, 625 y 230. El porcentaje de cromo es muy similar en todas ellas rondando entre el 15-22%. Sin embargo, el molibdeno aparece en cantidades discretas para todos excepto para las aleaciones C-276 y 625.

Módulo elástico

El módulo elástico define el comportamiento del material en la fase elástica. Los datos para cada material en función de la temperatura se representan en la siguiente gráfica.

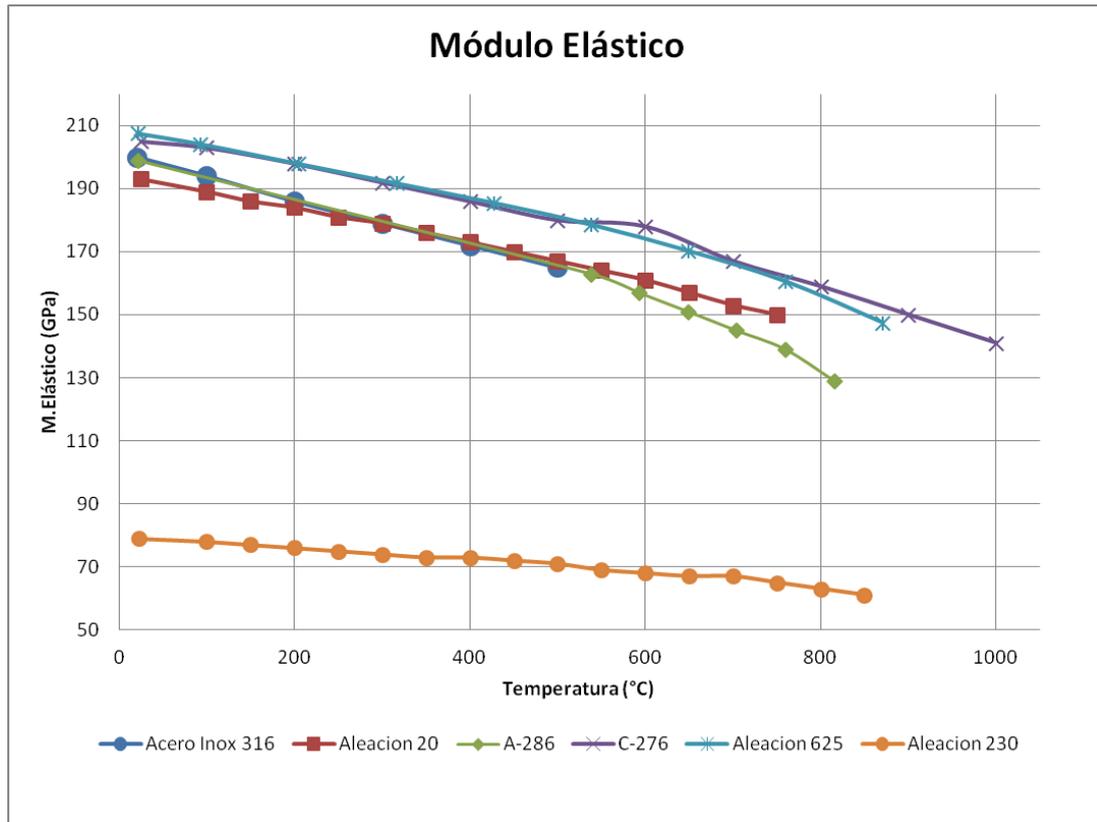


Figura 7. Gráfico comparativo Módulo Elástico. Fuente: Elaboración propia a partir de [3], [5], [6] y [7].

Los valores y los rangos de temperatura para los que se evalúa el módulo pueden ligeramente distintos ya que las propiedades se han extraído de las diferentes fuentes de información indicadas anteriormente al comienzo de la sección.

Se puede comprobar que los tres materiales que pertenecen a la familia de los aceros inoxidable tienen un valor de módulo elástico con una evolución con respecto a la temperatura muy similar. Si se observan las aleaciones en base níquel, tanto la C-276 como la 625 tienen valores superiores de módulo elástico pero en cambio la aleación 230 posee los valores más bajos de todos los materiales de estudio. Esto provoca que a una misma carga este material tenga una deformación mayor.

Límite elástico 0,2%

El límite elástico al 0,2% de deformación es un valor característico a la hora de definir la máxima tensión que puede soportar el material antes de producirse la deformación permanente.

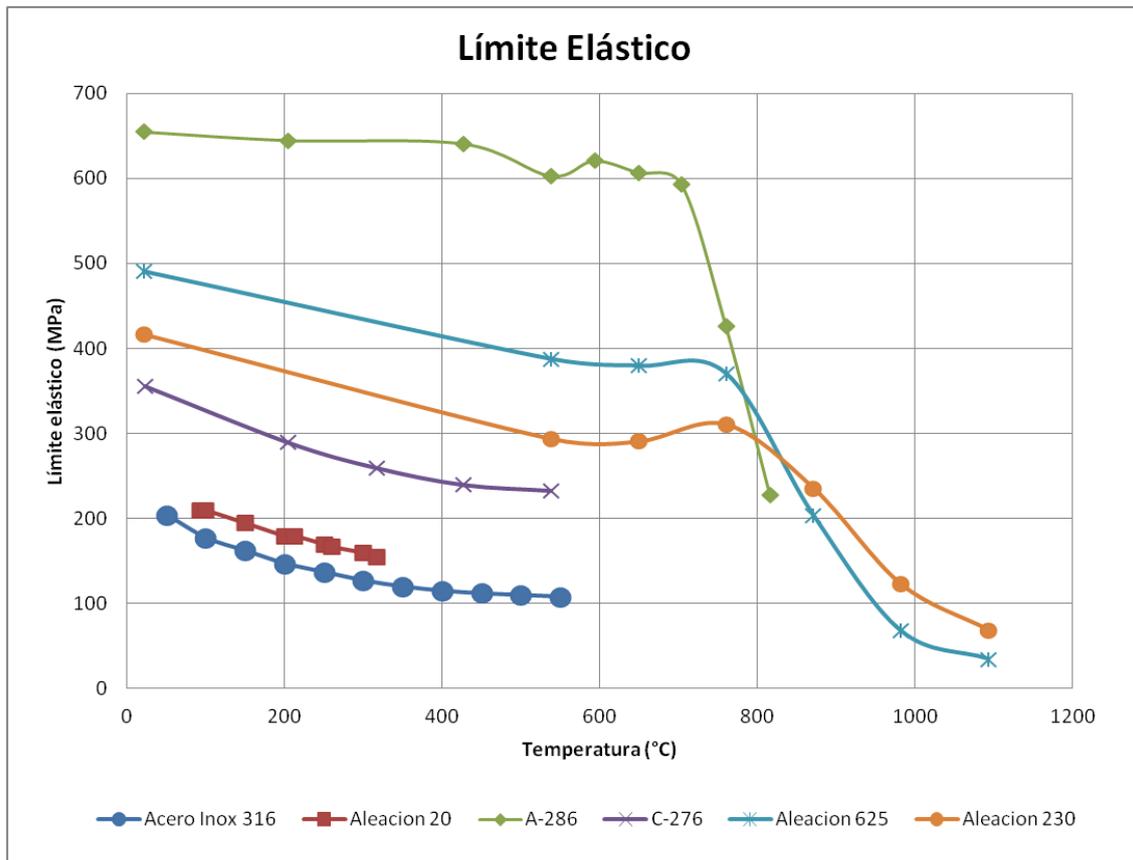


Figura 8. Gráfico comparativo Límite Elástico. Fuente: Elaboración propia a partir de [3], [5], [6] y [7].

La aleación A-286 muestra un comportamiento excepcional a temperaturas por debajo de 800°C mientras el resto de materiales del grupo de aceros inoxidables tienen unas propiedades mucho más limitadas. Del grupo de materiales en base níquel son las aleaciones 625 y 230 las que muestran un mayor límite elástico. Aunque sus valores disminuyen considerablemente con la temperatura destaca la existencia de datos con temperaturas hasta 1100°C cuando en el resto de materiales no están consideradas esas temperaturas tan elevadas.

Límite rotura

Esta característica indica la resistencia última del material. Al igual que en las anteriores propiedades se ha generado un gráfico contemplando el comportamiento de todos los materiales frente a la temperatura.

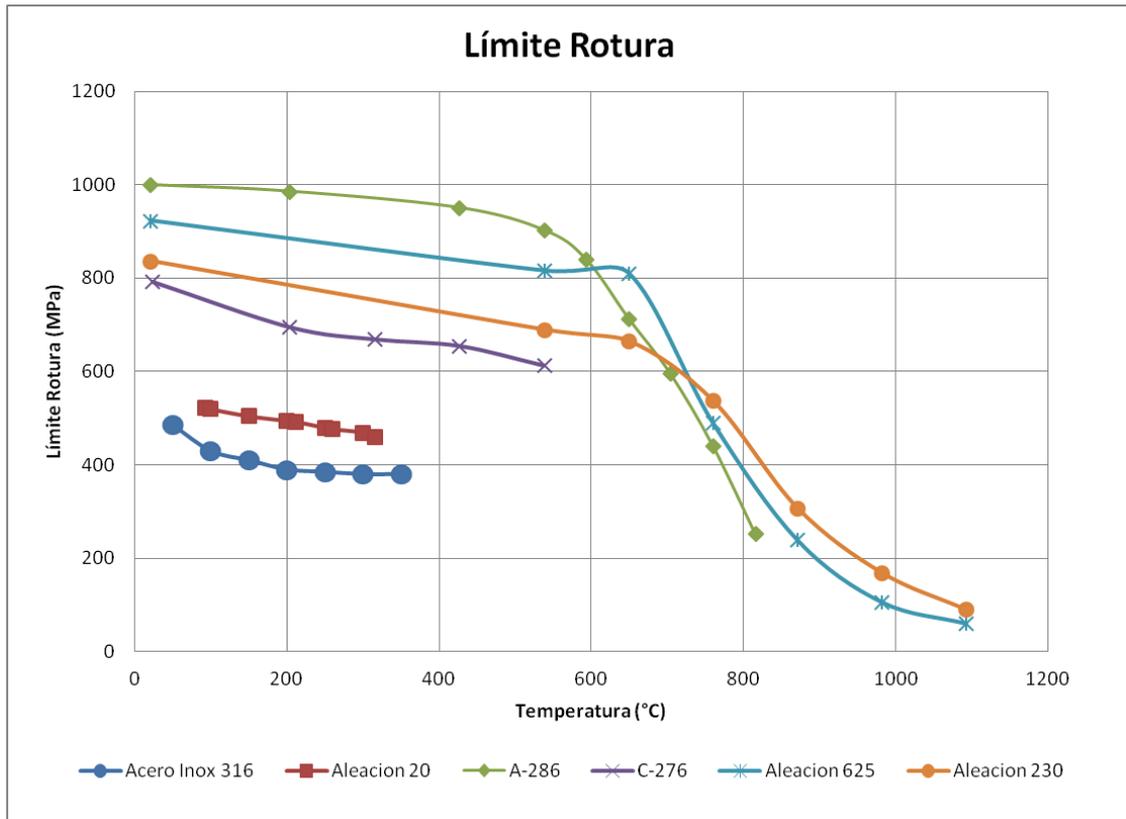


Figura 9. Gráfico comparativo Límite de Rotura. Fuente: Elaboración propia a partir de [3], [5], [6] y [7].

La evolución de los valores es muy similar al registrado para el límite elástico. De igual forma destacan los resultados en las aleaciones 625 y 230 tanto por el amplio rango de temperaturas como por su alta resistencia. Por debajo de 600°C la aleación A-286 sigue siendo la que tiene unos valores de límite de rotura más elevados.

5.1.3. Evaluar y seleccionar en base a las propiedades.

La evaluación y selección del material de estudio se realiza en base a las características recogidas en el apartado anterior. Para entender las diferencias entre las propiedades mecánicas se dispone de la composición de los materiales considerados de acuerdo a la información disponible en normativa o por los fabricantes. En base a los porcentajes de los distintos componentes mayoritarios se pueden extraer varias conclusiones.

En primer lugar se comprueba que el porcentaje de hierro de los tres primeros materiales (316, 20 y A-286) es el más elevado ya que se trata de aceros inoxidables. En los tres últimos materiales (C-276, 625 y 230), por contra, el elemento mayoritario es el níquel como es de esperar para aleaciones en base níquel. De esta primera observación destaca la aleación 20 que tiene un contenido muy similar de hierro (35%) y níquel (34%) y por tanto está entre ambos grupos.

Si se observa el contenido en cromo se puede apreciar que el nivel general es muy similar en todos ellos. El porcentaje varía entre el 15% y el 22% entre las distintas aleaciones. Aunque cabe destacar que para las aleaciones 625 y 230 se tienen los porcentajes de cromo más elevados.

Con respecto al molibdeno, su contenido es muy reducido en el grupo de aceros inoxidables (1,2-2,5%). Dentro del grupo de aleaciones en base níquel se puede comprobar que en la aleación C-276 es la de mayor contenido en molibdeno seguida de la aleación 625.

Cabe destacar que el porcentaje de otros elementos minoritarios es muy elevado en la aleación 230 debido a que su alto contenido en wolframio (14%) que no está presente en las demás aleaciones a excepción de la C-276 (4%).

Examinando los valores del módulo elástico en relación a la temperatura de la Figura 7 se aprecia un comportamiento muy similar entre todas las aleaciones menos para el caso de la aleación 230. Todas sufren una caída del valor del módulo elástico a medida que se aumenta la temperatura con una pendiente muy similar. Desde el punto de vista de la deformación interesan valores de módulo elástico elevados para favorecer que a una misma carga la deformación resultante sea menor. Las aleaciones con valores más altos son la C-276 y la 625.

Los valores de límite elástico y límite de rotura son importantes para garantizar un rango amplio de utilización frente a los esfuerzos provocados por la presión u otras sollicitaciones. Tanto en el gráfico de la Figura 8 como en la Figura 9 se observa que solamente se dispone de datos a partir de 400°C para las aleaciones base níquel junto con el A-286, y por encima de 900°C solamente para la aleación 625 y 230. La evolución de los valores es homologa en ambos gráficos de tal forma que un valor alto de límite elástico se refleja en un alto límite de rotura siendo especialmente visible en la caída repentina de los valores que se produce alrededor de los 600°C.

A la vista de las propiedades analizadas se decide seleccionar la aleación 625 para la realización del estudio. Esta aleación tiene un valor de módulo elástico de los más elevados entre los materiales seleccionados junto con unos valores de límite elástico y límite de rotura también elevados en un rango de temperaturas muy amplio. En el caso de la aleación A-286 sus valores son los más altos pero cae por encima de los 800°C y en el caso de la aleación 230 la situación es la contraria siendo inferior que la 625 por debajo de los 800°C.

5.2. Diseño y planificación de ensayos.

Una vez realizada la selección del material de interés se ha procedido a evaluar el tipo de ensayo más interesante para revelar el comportamiento frente a condiciones severas. Es especialmente interesante realizar los ensayos considerando los factores de fabricación o de ambiente corrosivo que revelen una modificación en el comportamiento teórico del material. Tras seleccionar los ensayos a ejecutar se ha realizado el diseño de las probetas de ensayo y del utillaje necesario para replicar las condiciones severas. Por último se ha planificado la realización de los ensayos estableciendo las condiciones de cada uno de ellos y los parámetros a medir.

5.2.1. Evaluación de ensayos para aplicación de condiciones severas.

En primer lugar se realiza una búsqueda de estudios en condiciones severas para el material seleccionado. La aleación 625 no es un material tan habitual como los aceros inoxidable pero presenta unas propiedades muy buenas de ante corrosión y existe numerosa documentación acerca de su comportamiento resistente a alta temperatura así como en ambientes corrosivos.

En el estudio realizado en *Versatile Corrosion Resistance for INCONEL alloy 625 in Various Aqueous and Chemical Processing Environments* [8] se puede corroborar que debido al alto contenido en níquel, cromo niobio y molibdeno, la aleación 625 tiene una corrosión en medio acuoso comparable a las aleaciones G-3, C-276, 622 o C-22. Se trata de un material resistente a la corrosión y al ataque intergranular en la mayoría de los ambientes en los procesos químicos industriales. Es muy resistente a la corrosión en aplicaciones de desulfuración de gases de combustión y en medios acuosos marinos. Así mismo, en ambientes con clorhídrico o sulfhídrico que puedan causar SCC (Stress Corrosion Cracking) o fragilizarían por hidrógeno muestra una buena resistencia.

Existen otros estudios realizados sobre la aleación 625 que profundizan en el efecto de corrosión por estrés SCC. Es especialmente interesante la experimentación llevada a cabo en *Stress Corrosion Cracking of Alloy 625 in pH 2 Aqueous Solution at High Temperature and Pressure* [9] precisamente porque se realiza en condiciones de alta temperatura y presión. En este artículo se evalúa el efecto del SCC experimentando sobre un tubo de aleación 625 estudiando los espesores de delaminación y las imágenes de microscopia y rayos X. Tal como se puede ver en la siguiente imagen, en el montaje del experimento se dispone del tubo de aleación 625 y se circula la disolución acuosa PH2 de HCl mediante una bomba para presurizarla, aplicando calor a través de un calefactor en la entrada. A lo largo de la longitud del tubo se tiene una distribución de temperaturas que permite estudiar las distintas condiciones a medida que disminuye la temperatura.

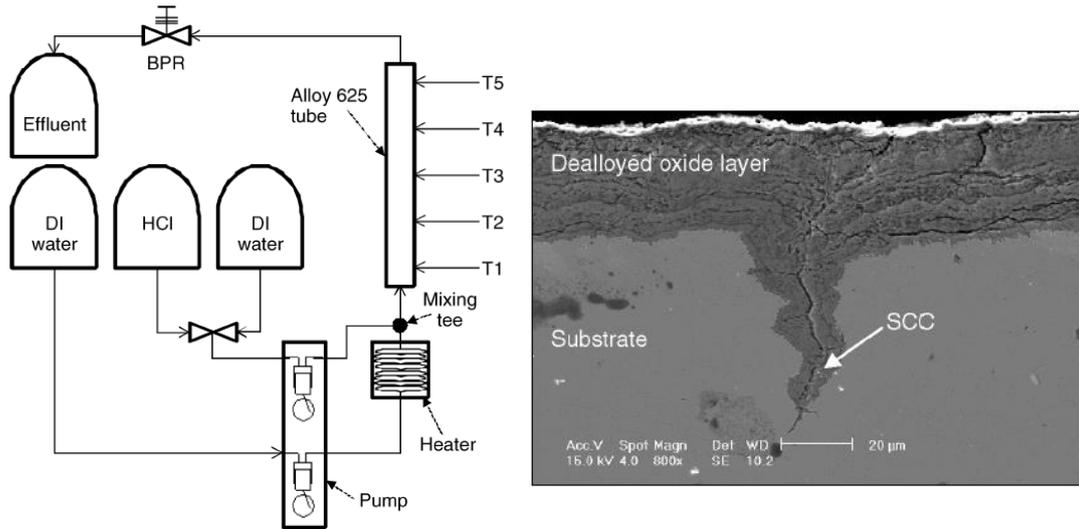


FIGURE 1. Simplified diagram of testing facility of Alloy 625.

Figura 10. Esquema del montaje del experimento e imagen de microscopia de electrones. Fuente: *Stress Corrosion Cracking of Alloy 625 in pH 2 Aqueous Solution at High Temperature and Pressure* [9]

Examinar estudios que incluyan ensayos de tracción es especialmente atractivo ya que la implementación del comportamiento del material en la simulación de elementos finitos necesita generalmente los valores extraídos en este tipo de ensayo. Dentro de estas características está el artículo: *Hot tensile properties and constant load stress corrosion cracking test data of autogenous weld joints of super 04HCu stainless steel in boiling MgCl₂ solution* [10]. El trabajo presentado propone una experimentación aplicando una presión sobre una probeta de tracción, en la que además, se recrean las condiciones de trabajo del material incluyendo la soldadura como factor debilitante. En este caso el esquema del montaje es distinto ya que se dispone un recipiente para la zona calibrada de la probeta, un termómetro para registrar y controlar la temperatura y un condensador para mantener el nivel de líquido en ebullición.

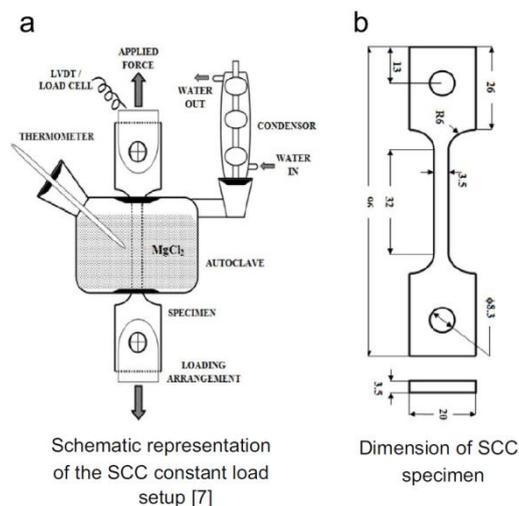


Figura 11. Esquema ensayo SCC y dimensiones de probeta. Fuente: *Hot tensile properties and constant load stress corrosion cracking test data of autogenous weld joints of super 04HCu stainless steel in boiling MgCl₂ solution*[10].

Los valores de rotura que se extraen en este estudio son validos para determinar la resistencia del material en las condiciones estudiadas.

Otro documento examinado de interés es el *Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens*[11]. En él se detallan procedimientos para ensayos de corrosión con barras tensionadas. La idea es asegurar la tensión sobre la probeta mediante un mecanismo que la deforme de manera constante y posteriormente introducir el conjunto en el baño del agente corrosivo. Este ensayo se realiza normalmente por debajo del límite elástico pero también puede utilizarse para la zona plástica y permite aplicar condiciones de temperatura deseadas. Por el contrario la medición toma de datos del comportamiento del material se limita a la deformación aplicada inicialmente sobre la probeta.

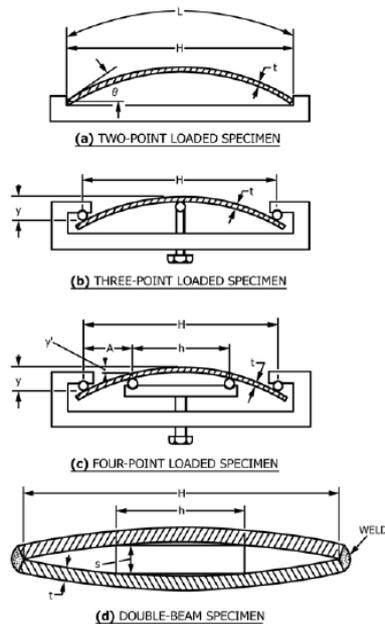


FIG. 1 Schematic Specimen and Holder Configurations

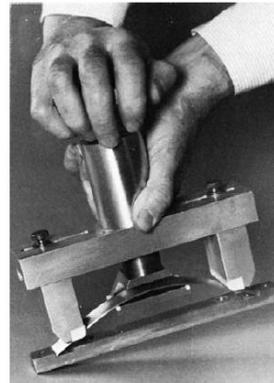


FIG. 2 Stressing Jig and Two-Point Loaded Specimen with Holder (approximately 1/4 actual size)

Figura 12. Sistemas de aplicación de la tensión en ensayos de Stress-Corrosion. Fuente: *Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens*[11].

Con la información anterior se decide optar por un ensayo utilizando la maquina universal de tracción para capturar los datos del ensayo pero haciendo uso de un envase que permita la aplicación del ambiente corrosivo sobre la probeta. De esta forma se combina la aplicación de la presión efectuada por la maquina, el ambiente corrosivo y la temperatura. Así mismo, se considera de interés estudiar probetas con soldadura ya que existe una modificación de las propiedades iniciales de la aleación y se puede propiciar con mayor facilidad el efecto de la fragilización por hidrógeno así como el stress cracking corrosión.

5.2.2. Diseño de probetas y utillaje.

Se ha realizado el modelo 3D para la fabricación y montaje de los componentes necesarios en el ensayo: probeta, adaptadores de las mordazas, pasadores, recipiente, termómetro, juntas de sellado, etc.

La probeta se ha definido tomando como referencia los valores utilizados en la experimentación *Hot tensile properties and constant load stress corrosion cracking test data of autogenous weld joints of super 04HCu stainless steel in boiling MgCl2 solution* [10]. Como

espesor se elige el valor de 3 mm porque es el más cercano para chapa normalizada de aleación 625 y el ancho de la longitud calibrada se ajusta a 6 mm debido a las dimensiones de la galga que se elige para la sensorización. La longitud total y otras características como los agujeros de los pasadores vienen impuestas por las exigencias del recipiente y del montaje en la máquina de tracción. Las dimensiones de la probeta se muestran a continuación:

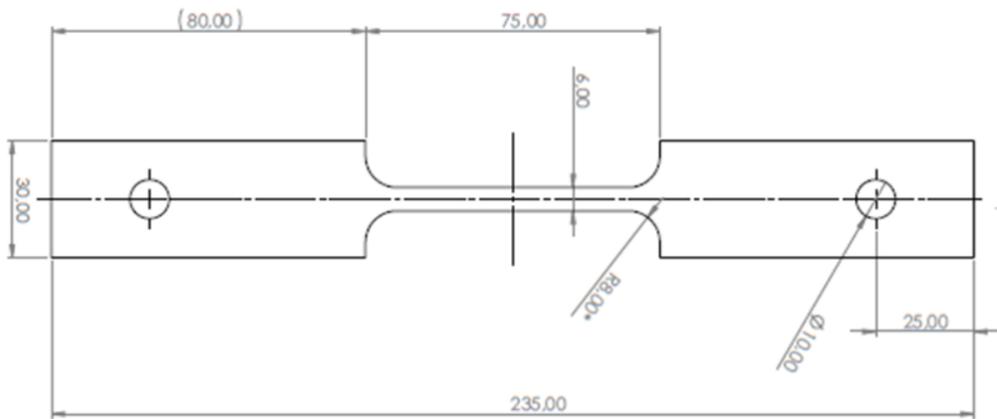


Figura 13. Dimensiones probeta. Fuente: Elaboración propia.

AIDIMME diseñó un recipiente de policarbonato en cuyo interior se aloja la parte central de la probeta y, gracias al uso de sellos impermeables, también puede contener líquidos. Dicho recipiente consta de un tubo y de dos tapas con ranuras en los extremos. Las ranuras permiten el paso de la probeta. La tapa superior posee dos puertos de entrada: uno para un termómetro que registre la temperatura del líquido y otro para permitir el flujo del líquido y sus vapores. Se optó por no dotar de puertos a la tapa inferior para minimizar el riesgo de fugas de líquido (pese a que esto supone que no hay un agujero de drenaje). Las tapas se unen entre sí con cuatro fijaciones roscadas que recorren todo el largo del recipiente. En las siguientes imágenes se muestra el modelo 3D y los planos de los diversos componentes del diseño del recipiente.

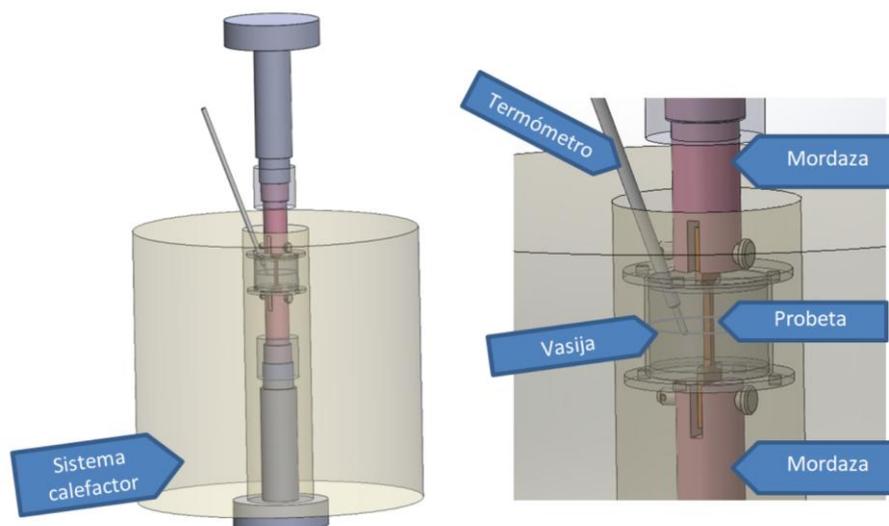


Figura 14. Detalle modelo 3D. Fuente: Elaboración propia.

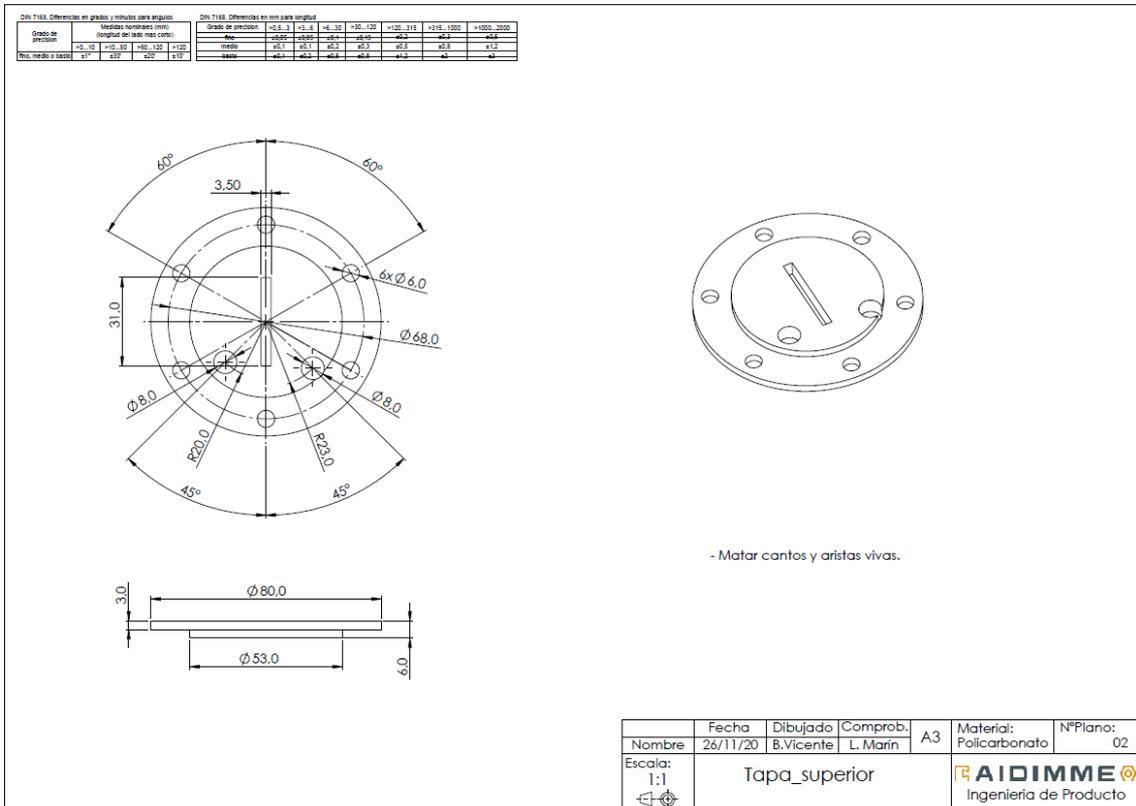
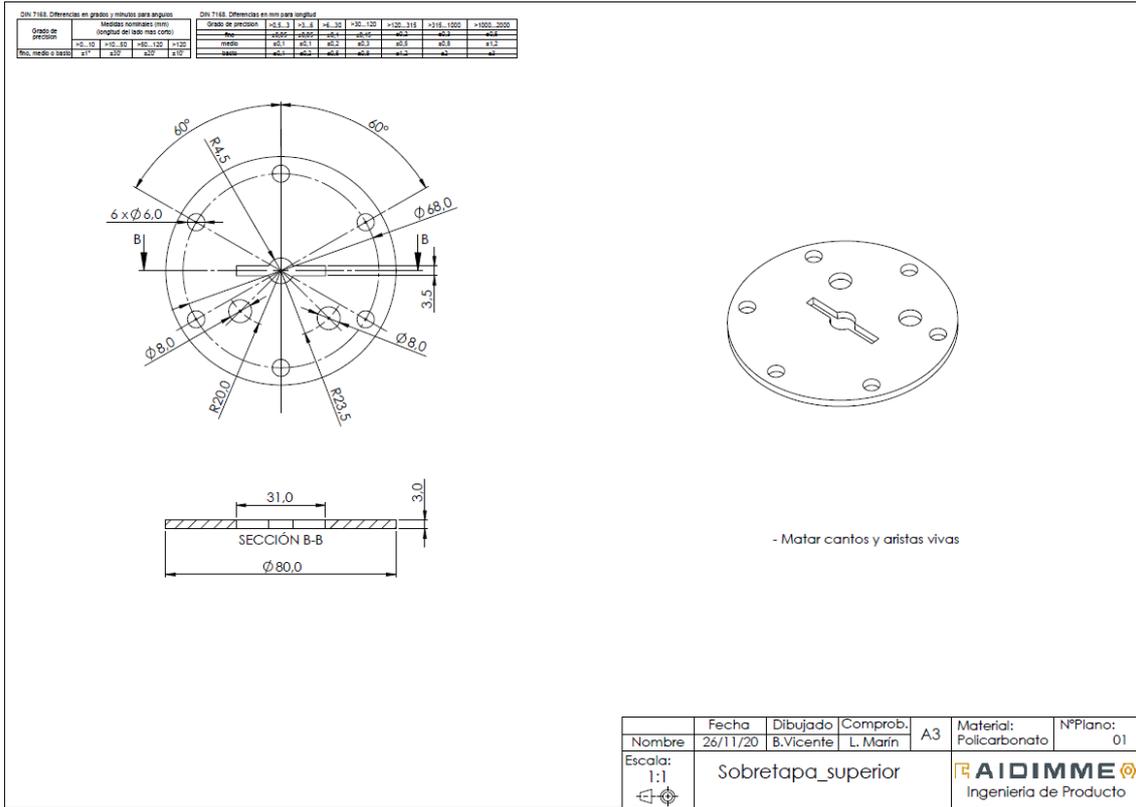


Figura 15. Planos tapa y sobretapa superior. Fuente: Elaboración propia.

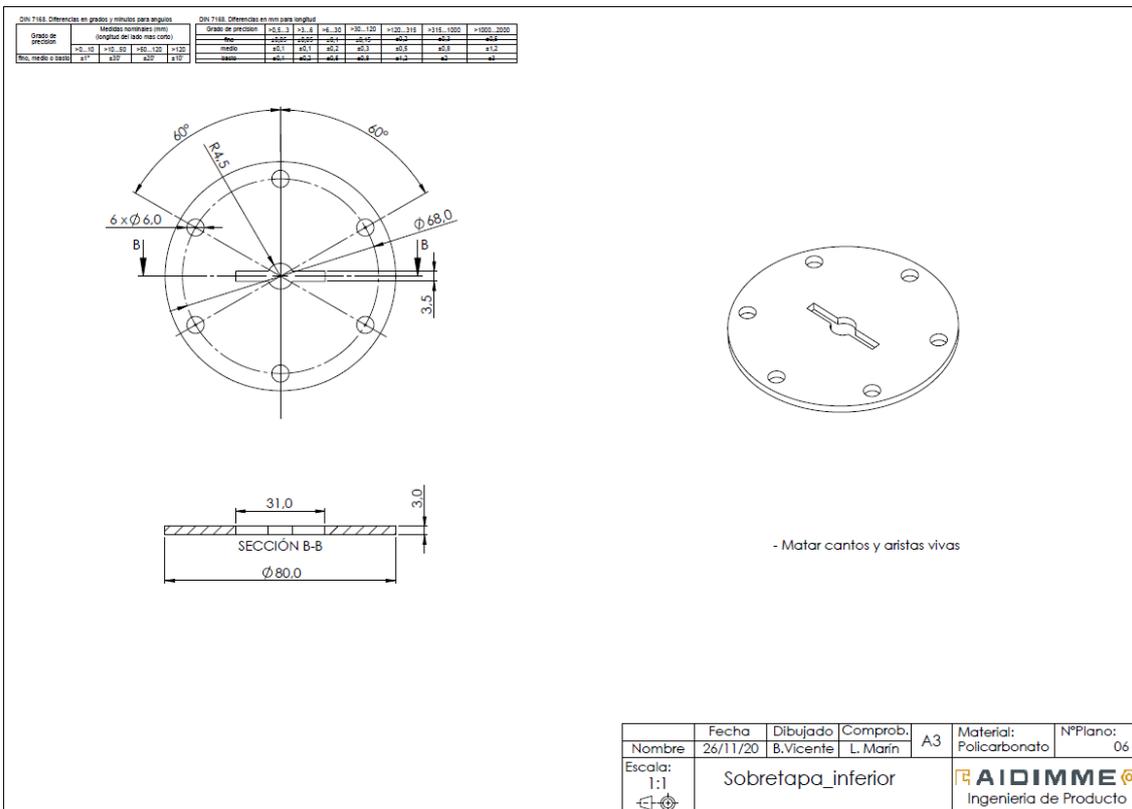
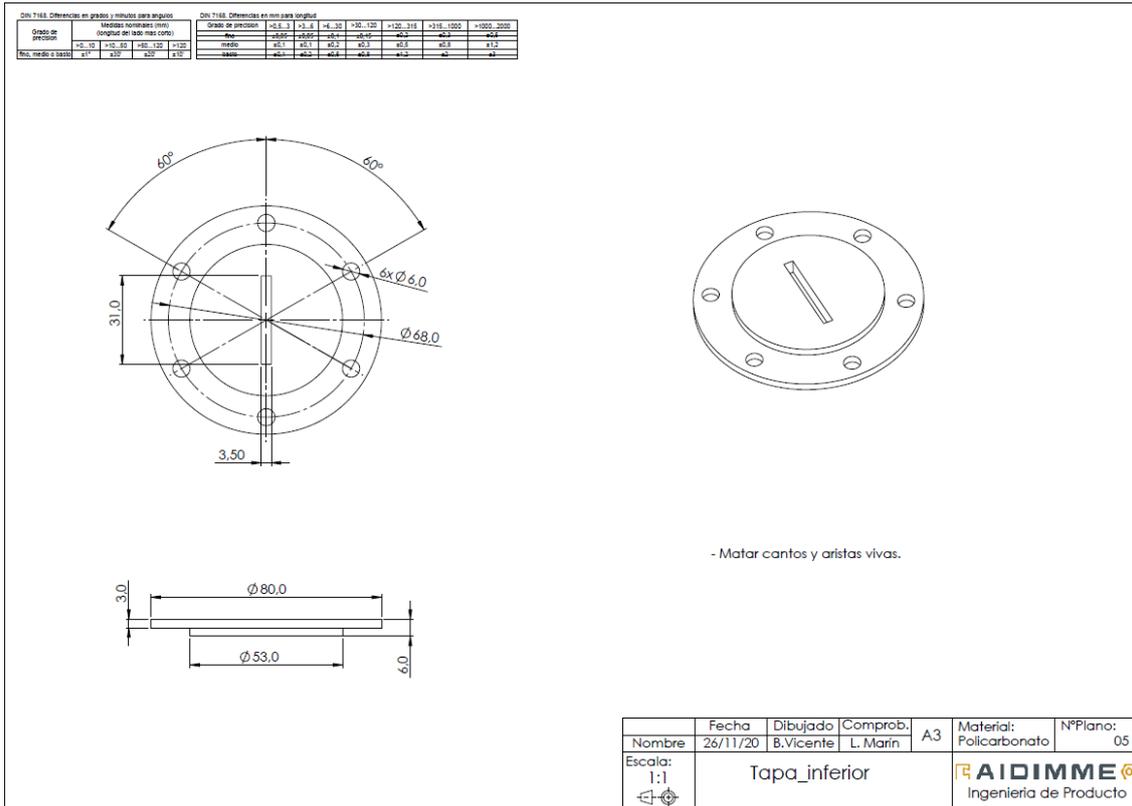


Figura 16. Planos tapa y sobretapa inferior. Fuente: Elaboración propia.

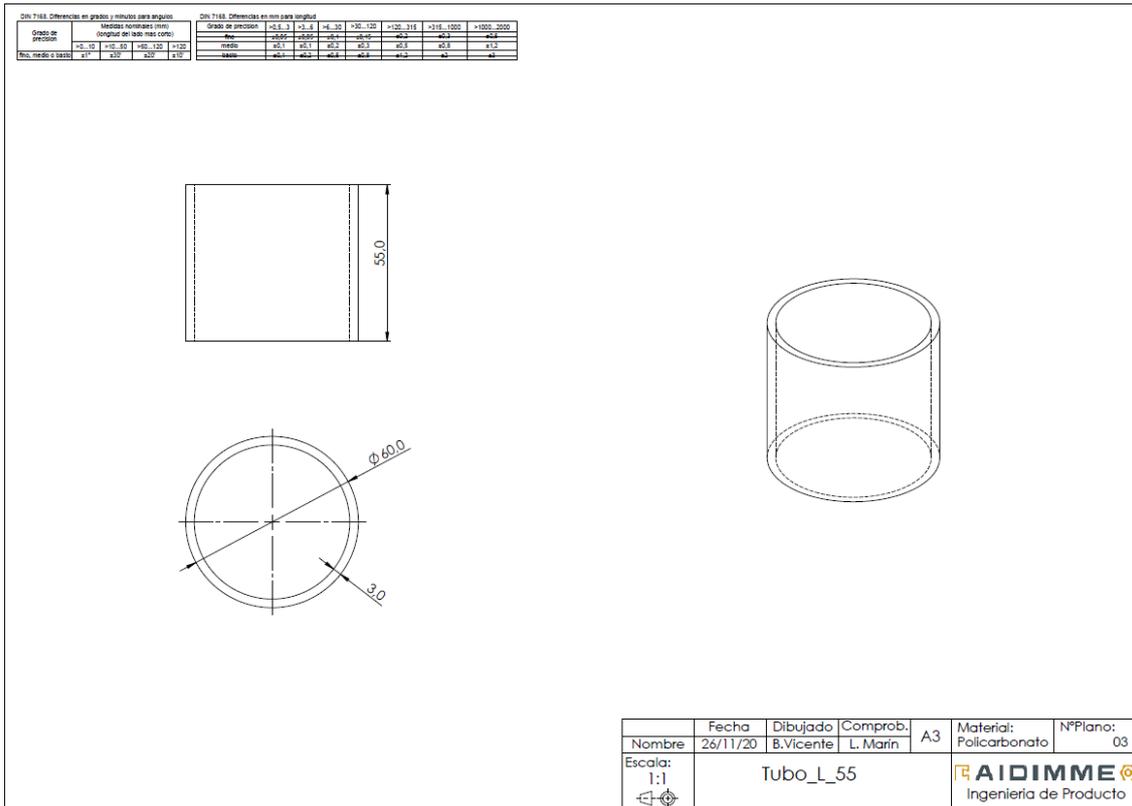


Figura 17. Plano tubo central. Fuente: Elaboración propia.

Cada tapa está compuesta por dos partes complementarias: la tapa propiamente dicha y la sobretapa. La sobretapa está diseñada para que, tras el montaje de la probeta, la ranura de la sobretapa quede perpendicular a la ranura de la tapa complementaria, con el objeto de imposibilitar el paso de la parte ancha de la probeta por ambas ranuras (que sólo puede ocurrir cuando las caras de las dos ranuras están la una frente a la otra).

El acoplamiento de la probeta con la máquina de tracción precisaba del diseño y fabricación de un adaptador para la mordaza. Este elemento permite aumentar el hueco de trabajo entre los actuadores y posibilita la sujeción de la mordaza mediante un pasador.



Figura 18. Modelo 3D e imagen real del adaptador para la mordaza. Fuente: Elaboración propia.

Se empleó un termómetro con sonda de platino PT100 para registrar la temperatura del líquido. Los dos electrodos del termómetro se conectan al amplificador HBM QuantumX MX1615B. En la siguiente imagen se muestra al termómetro.



Figura 19. Termómetro con sonda PT100.

Fuente: Proporcionado por el proveedor Safer Instrumentación SL.

Se empleó un refrigerante de bolas con dos olivas para los vapores emanados por el líquido del recipiente con el objeto de permitir que los vapores se enfríen y formen un condensado que retorne al recipiente por el mismo tubo por donde entraron los vapores, formando así un circuito cerrado para evitar el escape de vapores al medioambiente. La boca superior del refrigerante se empleará para el llenado del recipiente, y permanecerá cerrada con un tapón durante el ensayo. La boca inferior del refrigerante se conectará a una manguera que lleve hasta al puerto de entrada de líquidos del recipiente. La oliva inferior servirá de entrada de agua del grifo para refrigerar a los vapores. La oliva superior servirá de salida de agua hacia el sumidero del lavabo. En la siguiente imagen se muestra el refrigerante.

REFRIGERANTE DE BOLAS CON DOS OLIVAS

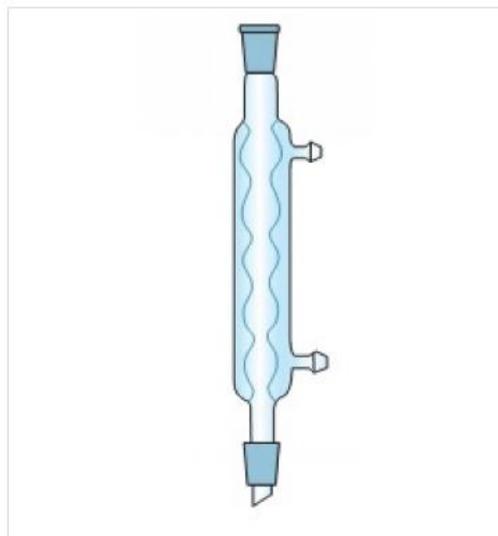


Figura 20. Refrigerante de bolas. Fuente: <https://www.vidrafoc.com/productos/categorias/fabricados-vidrafoc/refrigerantes/refrigerante-de-bolas-con-dos-olivas.html>

Otros elementos que se utilizaron son el tubo transparente de silicona de alta temperatura de 4,8 mm de diámetro interno empleado para conectar el refrigerante al recipiente y la silicona empleada para el montaje de las piezas del recipiente y la conexión con la probeta y los demás elementos. Ambos se seleccionaron con las características necesarias para soportar las condiciones de temperatura y ambiente corrosivo del ensayo.

5.2.3. Definición del plan de ensayos.

Se ha definido un plan teórico de ensayos con objeto de caracterizar el comportamiento resistente de la aleación 625 donde se incluyen ensayos del material a temperatura ambiente, aplicación de temperatura, ambiente corrosivo y uniones soldadas.

En su elaboración es primordial definir las condiciones de trabajo que se desean explorar y si es posible establecer combinaciones de las mismas para estudiar su influencia. También es recomendable plantear unas condiciones de control que permitan comparar los resultados obtenidos con otros que se tengan disponibles.

Los parámetros de control y de medida de los ensayos son los valores que permitirán establecer una relación entre las condiciones del ensayo y los resultados del comportamiento del material. Estos valores son para este caso de estudio: Lectura de galgas, carga aplicada en la máquina de ensayo, tiempo de rotura, curvas fuerza-desplazamiento.

Se ha elaborado una tabla para contemplar todas las combinaciones de interés para el estudio:

| PROGRAMA DE ENSAYOS SIMUPROD | | | | | | | |
|------------------------------|-------------|-----------|----------|-----------|------------|--------|-------|
| MATERIAL: | INCONEL 625 | | | | | | |
| ESPESOR: | 3 mm | | SECCION: | 3 x 6mm | | | |
| TANDA | TEMP (°C) | SOLDADURA | ACIDO | CARGA | CARGA(KN) | TIEMPO | GALGA |
| 1 | 20 | NO | NO | 100% L.R. | 827 | ROTURA | G1 |
| 2 | 20 | NO | HCl 20% | 80% L.E. | - | - | G2 |
| 3 | 20 | TIG 2mm | NO | 100% L.R. | 414 | ROTURA | G3 |
| 4 | 20 | TIG 2 mm | HCl 20% | 80% L.E. | - | - | G4 |
| 5 | Teb HCL | NO | NO | 100% L.R. | 818 | ROTURA | G5 |
| 6 | Teb HCL | NO | HCl 20% | 80% L.E. | - | - | G6 |
| 7 | Teb HCL | TIG 2 mm | NO | 100% L.R. | 809 | ROTURA | G7 |
| 8 | Teb HCL | TIG 2 mm | HCl 20% | 80% L.E. | - | - | G8 |

Figura 21. Tabla de combinaciones para las condiciones de ensayo. Fuente:Elaboración propia.

5.3. Control del proceso de soldadura y preparación de probetas.

En este apartado se detalla el proceso de soldadura explicando cada fase seguida durante la preparación y la ejecución de la unión soldada. Se puede dividir en cuatro pasos:

- Preparación de los útiles y herramientas.
- Preparación de los tramos a soldar.
- Ejecución de la primera pasada.
- Ejecución de la segunda pasada.

Una vez obtenido el cupón con la soldadura se han extraído las probetas realizando el corte de los tramos y el mecanizado que delimita las mordazas y la sección de control.

5.3.1. Definición de las fases de ejecución de la soldadura

Generalmente los procesos de soldadura exigen el cumplimiento de unas condiciones para obtener una buena ejecución de dichas uniones. Seguir las instrucciones es primordial para que no existan una serie de defectos que puedan limitar la resistencia y la capacidad de trabajo de los componentes así como para evitar el fallo en servicio de los mismos. Si para las aleaciones utilizadas habitualmente se tienen estos requisitos para las aleaciones no convencionales se magnifica aun más, pudiendo ser más exigente y debiendo controlarse más exhaustivamente.

En el caso concreto de la aleación 625 se dispone de las indicaciones aportadas por Haynes Internacional [6] que es uno de los fabricantes a nivel mundial.

Welding

HAYNES® 625 alloy is readily welded by Gas Tungsten Arc (GTAW), Gas Metal Arc (GMAW), electron beam welding, and resistance welding techniques. Its welding characteristics are similar to those for HASTELLOY® X alloy. Submerged-Arc welding is not recommended as this process is characterized by high heat input to the base metal and slow cooling of the weld. These factors can increase weld restraint and promote cracking.

Base Metal Preparation

The welding surface and adjacent regions should be thoroughly cleaned with an appropriate solvent prior to any welding operation. All greases, oils, cutting oils, crayon marks, machining solutions, corrosion products, paint, scale, dye penetrant solutions, and other foreign matter should be completely removed. It is preferable, but not necessary, that the alloy be in the solution-annealed condition when welded.

Filler Metal Selection

Matching composition filler metal is recommended for joining 625 alloy. For dissimilar metal joining of 625 alloy to nickel-, cobalt-, or iron-base materials, 625 alloy itself, 230-W® filler wire, 556® alloy, HASTELLOY® S alloy (AMS5838), or HASTELLOY® W alloy (AMS 5786, 5787) welding products are suggested, depending upon the particular case. Please see the "Welding and Fabrication" brochure or the Haynes Welding SmartGuide for more information.

Preheating, Interpass Temperatures, and Post-Weld Heat Treatment

Preheat is not required. Preheat is generally specified as room temperature (typical shop conditions). Interpass temperature should be maintained below 200°F (93°C). Auxiliary cooling methods may be used between weld passes, as needed, providing that such methods do not introduce contaminants. Post-weld heat treatment is not generally required for X alloy. For further information, please consult the "Welding and Fabrication" brochure.

Nominal Welding Parameters

Details for GTAW, GMAW and SMAW welding are given in the "Welding and Fabrication" brochure. Nominal welding parameters are provided as a guide for performing typical operations and are based upon welding conditions used in our laboratories.

Figura 22. Indicaciones de soldadura para la aleación 625. Fuente: Haynes Internacional [6]

De acuerdo a las indicaciones, la aleación 625 se puede soldar mediante el proceso GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) o más comúnmente llamado TIG y mediante el proceso GMAW (Gas Metal Arc Welding) o también llamada MIG/MAG. Otros métodos aceptados son la soldadura por Electron Beam o mediante soldadura por resistencia sin embargo no está recomendado para soldadura de arco sumergido debido a la alta temperatura que necesita y su largo periodo de enfriado.

El material base debe estar limpio en la zona de la soldadura y no debe tener óxido ni cualquier otro tipo de suciedad como grasa o lubricante. Recomienda la limpieza con disolvente y respecto al tratamiento térmico que sea preferiblemente solamente de recocido.

El material de aporte debe ser preferiblemente aleación 625 pero también está permitido utilizar un material distinto si son aleaciones con base cobalto, níquel o hierro. Otras aleaciones concretas que pueden utilizarse son la 230, 556, AMS5838 o AMS 5786 y 5787).

El precalentamiento es uno de los requisitos que pueden resultar problemáticos pero en el caso de la aleación 625 no es necesario y basta con la temperatura ambiente. La temperatura de proceso debe estar por debajo de 93 °C y no es necesario un tratamiento posterior a la soldadura.

Preparación de los útiles y herramientas:

Antes de iniciar el proceso de soldadura es necesario preparar el electrodo y ajustar la máquina de soldadura. Dependiendo del material a soldar se precisa de un acabado de la punta del electrodo distinto. Para materiales con alto punto de fusión como el acero y en este caso la aleación 625, el electrodo debe tener un extremo afilado en punta. Si se tratara de un material como el aluminio cuyo cordón será más ancho el electrodo debe tener un acabado romo.



Figura 23. Detalle material de aporte y afilado del electrodo. Fuente: Elaboración propia.

El ajuste de la máquina se realiza mediante pruebas sobre un trozo de material base. Para ello se recorta un trozo de 100 mm utilizando una herramienta de corte radial con disco fino de 1mm y se limpia la superficie para eliminar la capa de óxido, las impurezas y la suciedad que pueda tener. Sobre el tramo de material base se ejecutan varias soldaduras subiendo el valor de la intensidad para generar el cordón necesario sin que repercuta en un excesivo aporte de calor. El valor de intensidad se establece en un rango entre 110-125 A.

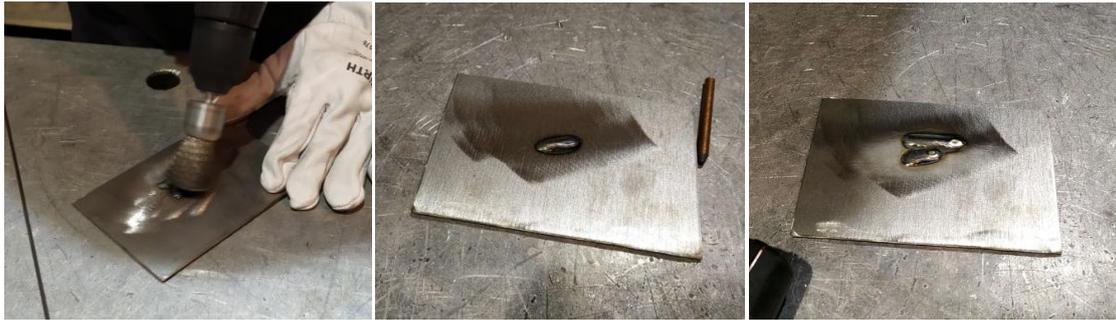


Figura 24. Pruebas de ajuste de la máquina de soldadura. Fuente: Elaboración propia.

Preparación de los tramos a soldar y ejecución de la primera pasada:

Dependiendo del espesor a soldar se debe plantear la preparación y el número de pasadas pero siempre será obligatorio limpiar las superficies a soldar. En el caso del cupón con chapa de 3 mm no es necesario realizar ninguna preparación de achaflanado y solamente se necesita dejar una separación de 2mm entre ambas. A pesar de ello no se puede realizar la soldadura de una sola pasada con penetración total y por tanto se plantean dos pasadas. Se disponen los dos tramos a soldar sobre perfiles para garantizar una superficie de respaldo en borde y se realizan dos puntos de soldadura en los extremos para garantizar la posición. Estos extremos se descartarán en la fase de mecanizado de las probetas. Finalmente, se realizará la primera pasada de soldadura controlando el avance para que no haya exceso de temperatura en la unión y el cordón sea del tamaño necesario.

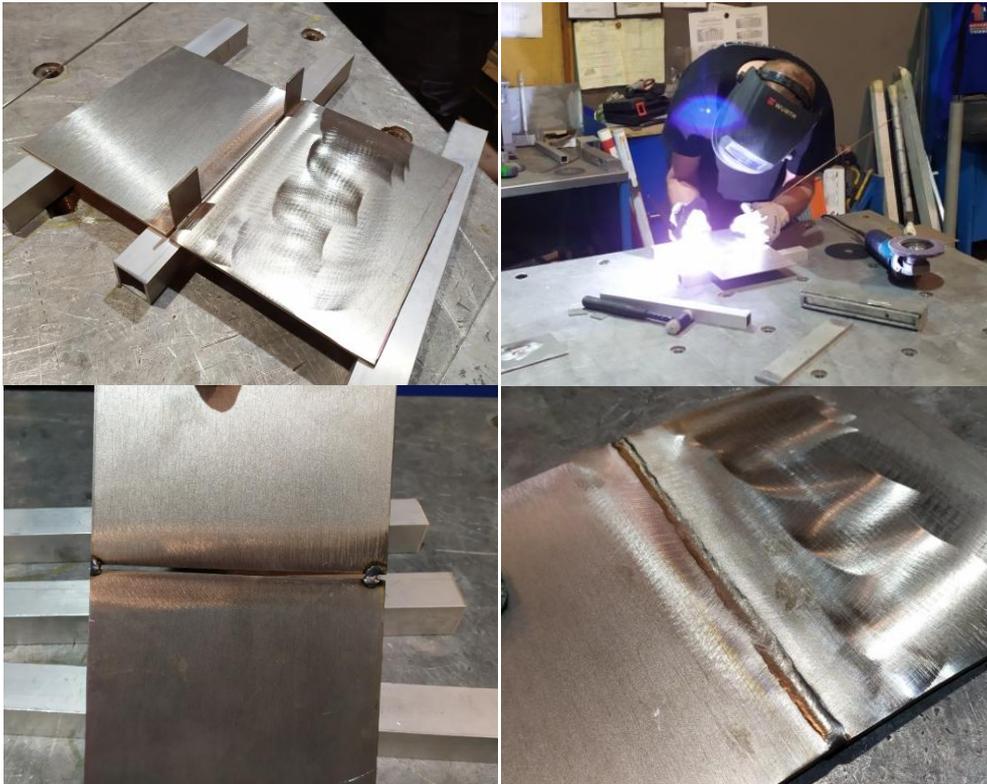


Figura 25. Preparación y ejecución de la primera pasada de soldadura. Fuente: Elaboración propia.

Preparación de la segunda pasada y ejecución.

La soldadura de la segunda pasada se puede ejecutar sin la necesidad del separador ni de los perfiles de soporte puesto que la primera pasada garantiza la posición. Es muy importante limpiar la zona de la soldadura para eliminar la capa de carbonilla, óxido y escoria generada por la primera pasada. Este paso se realiza con la herramienta radial penetrando en la unión desde la cara posterior. Una vez se ha limpiado se amarra el cupón a la mesa de trabajo para evitar posibles deformaciones provocadas por el calor del cordón. Por último se procede a soldar controlando el avance igual que en la primera pasada para que no haya exceso de temperatura en la unión y el cordón sea del tamaño necesario.



Figura 26. Preparación y ejecución de la segunda pasada de soldadura. Fuente: Elaboración propia.

Recorte y mecanizado de las probetas.

En los talleres de AIDIMME se realizaron los cortes del cupón de soldadura. De cada corte se extrajo una probeta conforme a las prescripciones del ensayo desechando los extremos. Para ello se delimitaron previamente los tramos de recorte con el ancho de la zona de mordazas de la probeta. Después de los cortes se selecciono la herramienta de mecanizado para el torno de control numérico y se elimino el material de la zona central de acuerdo al diseño de la probeta. El centro del cuello de la probeta se hizo coincidir con el centro del cordón de soldadura. Debido al abultamiento en el cordón producido por la aportación del material de soldadura, se rectificó también la probeta en la zona del cordón de soldadura para crear una superficie plana donde poder pegar la galga de extensometría. En las siguientes imágenes se muestran las diversas etapas del proceso de fabricación de las probetas.



Figura 27. Operaciones de recorte y mecanizado de las probetas. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2. Identificar operaciones críticas y los parámetros de control.

Del seguimiento del proceso de soldadura se ha determinado la siguiente tabla de operaciones críticas y parámetros de control:

| Operaciones críticas | Parámetro control |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Preparación de electrodo | Sí/No |
| Ajuste de máquina de soldadura | Rango de intensidad corriente |
| Planificación de pasadas | Nº de pasadas |
| | 1 lado / Ambos lados |
| Preparación de la unión | A tope/Con chaflán |
| Sujeción con utillaje | Si/No |
| Limpieza de la zona de unión | Cepillado/Disolvente |
| Precalentamiento | Valor de temperatura |
| Control de la temperatura de proceso | Valor de temperatura máxima |

Tabla 2. Operaciones críticas y parámetros de control. Fuente: Elaboración propia.

5.4. Desarrollo de cálculos de elementos finitos y análisis de resultados

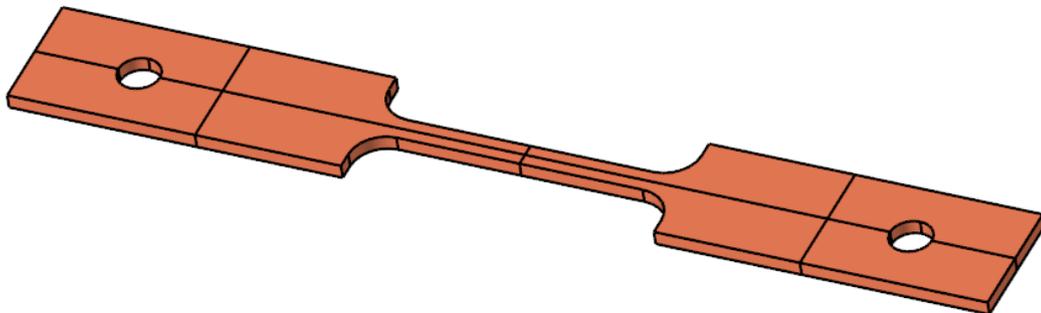
En este apartado se explican los aspectos más importantes del modelo de simulación del ensayo en el entorno virtual con el software de Altair Hypermesh. Se ha utilizado el motor de cálculo de Optistruct para realizar cálculos de tipo lineal y no lineal quasi-estático, y el motor de cálculo Radioss para cálculos de tipo explícito.

A continuación se detalla el proceso de preparación del modelo de cálculo desde el mallado y la introducción los datos de resistencia del material ajustados a las propiedades resistentes teóricas de los materiales, hasta la obtención de resultados.

5.4.1. Preparación del 3D y mallado de elementos finitos.

La preparación del 3D se realiza utilizando como punto de partida la geometría generada en la etapa de diseño. Las dimensiones tanto de la zona de sujeción y de los agujeros como de la zona calibrada se mantienen con las dimensiones del diseño sin contemplar las pequeñas diferencias debidas a la fabricación.

El sólido es relativamente simple y no tiene chaflanes ni redondeos que puedan ser susceptibles de simplificación. La preparación se limita a dividir las zonas donde se aplicaran las restricciones y a generar aquellos límites que faciliten y generación del mallado. El objetivo es, por una parte, posibilitar la selección de nodos para aplicar las restricciones, y por otra, facilitar que los elementos sean lo más regulares posibles y que el mallado de la probeta tenga cierta simetría. En la siguiente imagen se puede observar ambos casos como 1 y 2 respectivamente.



*Figura 28. Preparación del modelo 3D.
Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.*

Después de la preparación del 3D se procede al mallado. Como se trata de un sólido simple derivado del recorte de una chapa existe claramente una dirección para mapear el mallado desde una de las caras. Para ello se realiza primero un mallado 2D de la cara con un tamaño de elemento de 1,5mm y eligiendo los demás parámetros que se muestran en la siguiente figura.

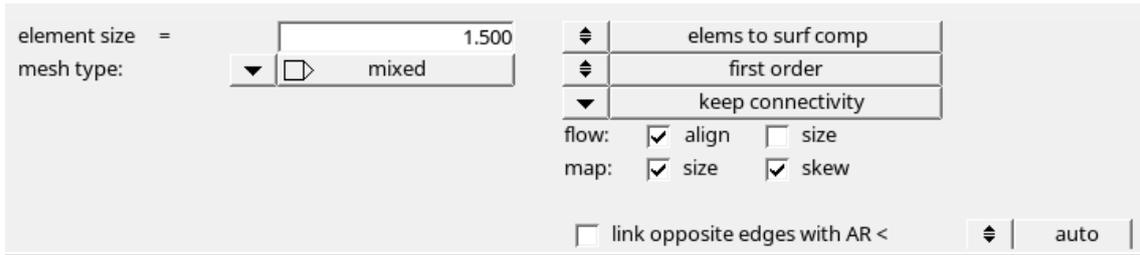


Figura 29. Detalles parámetros de mallado.
Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

Antes de proceder a generar la malla 2D se puede revisar el resultado y la herramienta permite, entre otras, la modificación de la densidad de elementos en los tramos. Mediante esta utilidad se puede aumentar por ejemplo en número de elementos en el tramo central como se muestra a continuación en la figura. De esa manera los elementos quedan con una forma más regular sin aumentar significativamente en número de elementos.

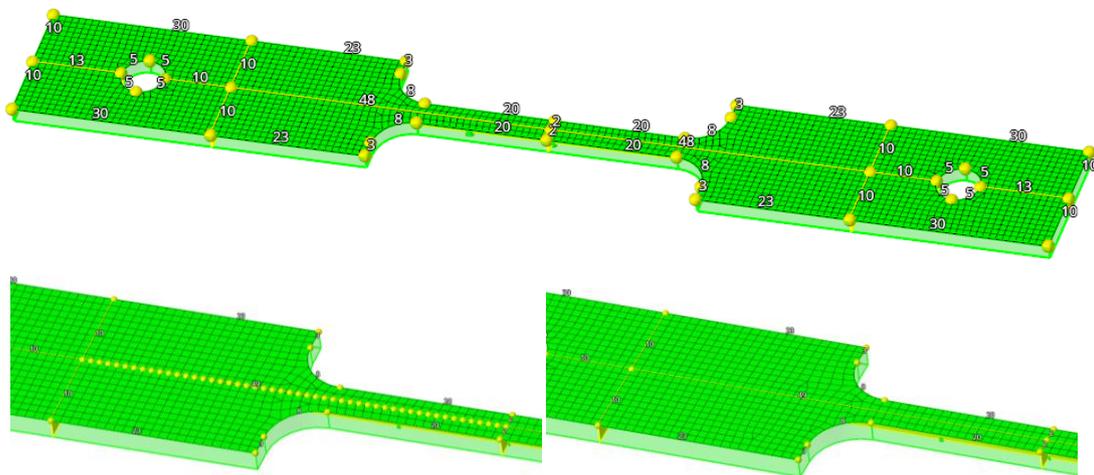
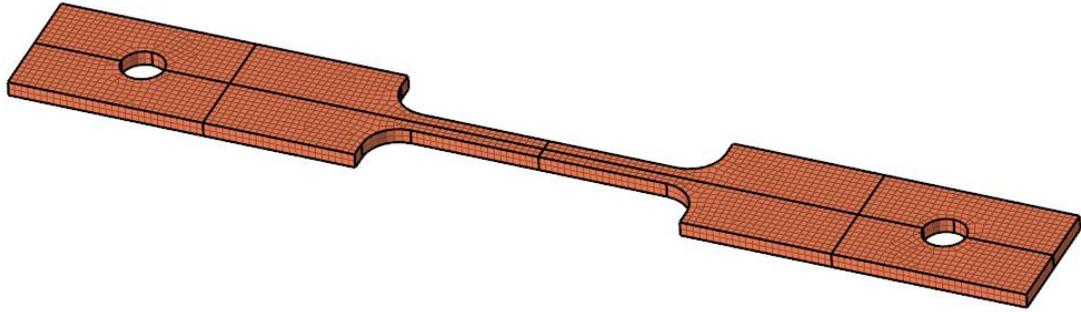


Figura 30. Detalle mallado modelo de la probeta.
Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

Posteriormente se realiza el mallado del sólido utilizando la malla 2D. El tamaño se mantiene en 1,5 mm para que en el espesor de la chapa haya dos elementos. El resultado se puede utilizar para los cálculos mediante modelos implícitos o explícitos con la precaución de modificar el tipo de elemento. Mientras en el caso implícito son de tipo CHEXA (hex8), CTRIA6 (tria6) y CQUAD8 (quad8) para los cálculos de tipo explícito son del tipo HEXA8N (pyramid5 y hex8) y PENTA6DG (penta6).

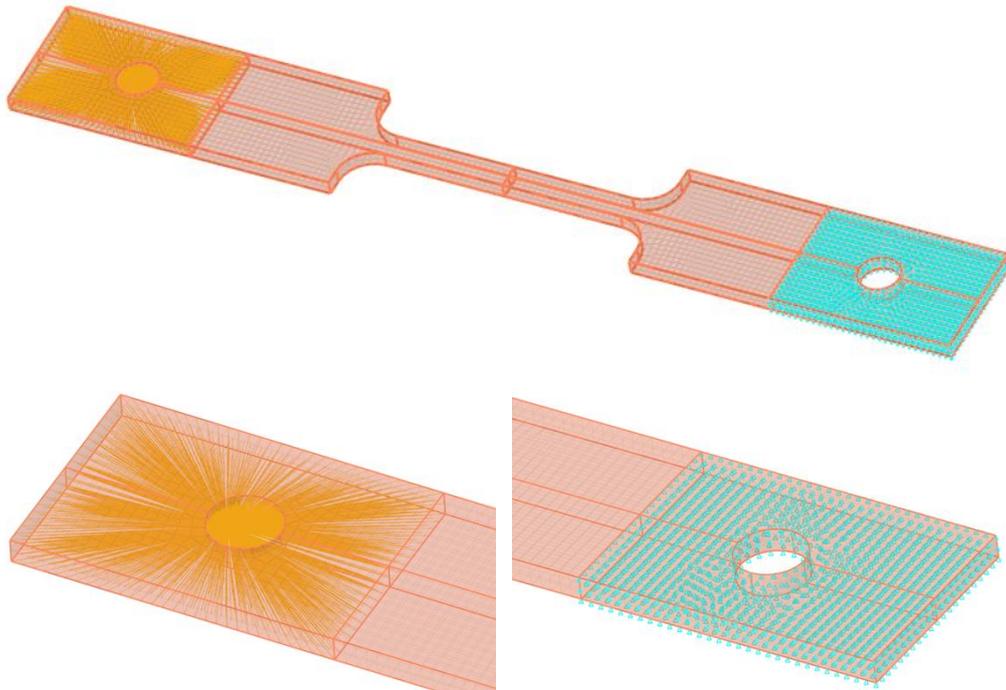


*Figura 31. Malla final del modelo de simulación.
 Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.*

5.4.2. Generación de modelos implícitos lineales, quasi-lineales y modelos explícitos.

La generación del modelo lineal y quasi-lineal es muy similar puesto que el motor de cálculo es compartido y ambos utilizan Optistruct. Sin embargo, el modelo explícito utiliza Radioss y aunque el software de preproceso y postproceso es compartido en todos ellos (Hypermesh y Hyperview) la definición de las restricciones, las cargas, los modelos de materiales y los casos de carga son ligeramente distintos.

En definitiva, para todos los casos se define una restricción fija para el extremo inferior y un elemento rígido uniendo todos los nodos de la mordaza del extremo superior. Esto último facilita la aplicación de la carga en un solo punto y también simplifica la toma de resultados del desplazamiento en relación a la fuerza aplicada.



*Figura 32. Detalle selección de nodos para restricciones y cargas.
 Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.*

La aplicación de la fuerza varía entre los distintos tipos de análisis. Mientras en el análisis lineal estático se puede aplicar directamente la carga, en el análisis quasi-lineal existe la posibilidad de mantener esa misma fuerza definiendo los intervalos intermedios hasta alcanzarla o directamente definir un perfil de carga en el nodo. En ese caso hay que definir una restricción en el nodo (imagen de la derecha) que aplicará la fuerza introducida en forma de tabla, donde la primera columna será el tiempo y en la segunda la fuerza.

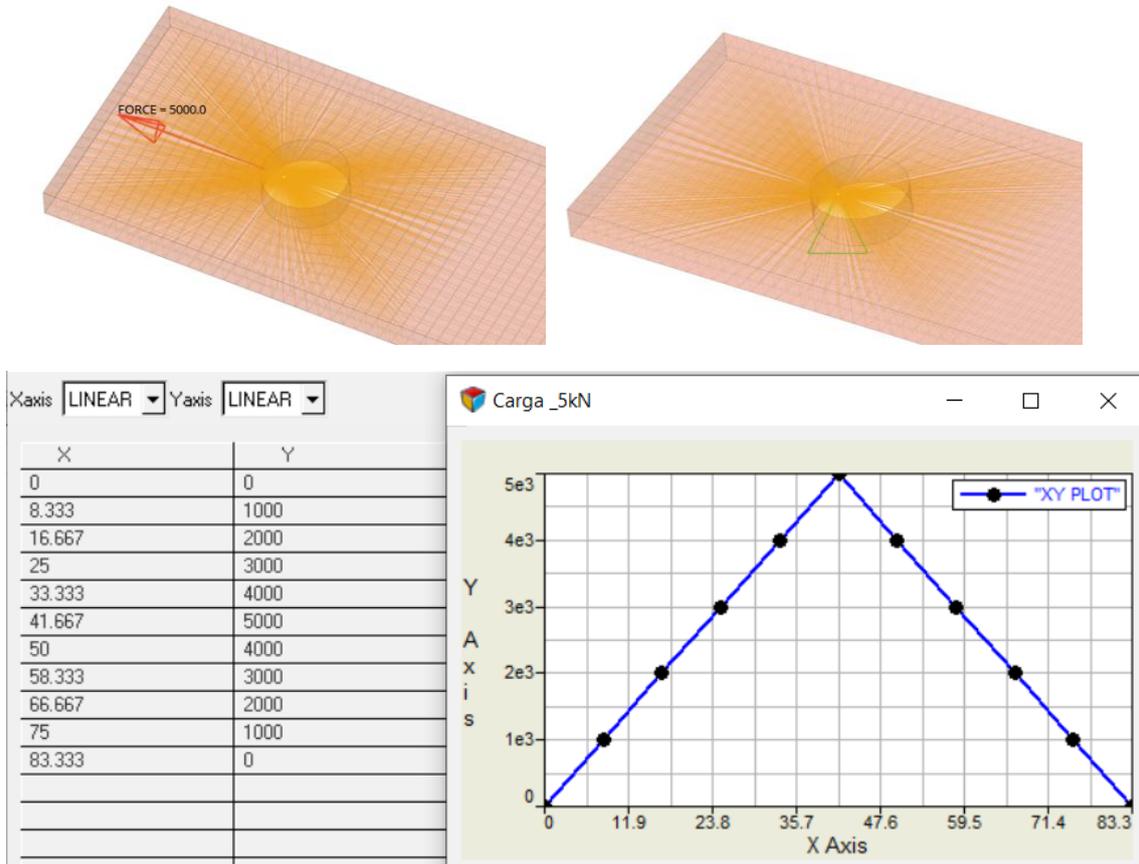


Figura 33. Aplicación de cargas. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

En el primer caso se obtendrá una foto fija del estado tensional con el supuesto de pequeños desplazamientos y de material completamente elástico. En el segundo caso se puede disponer de la evolución del estado tensional hasta la aplicación de la carga y además se considerará el comportamiento plástico del material una vez superado el límite elástico.

5.4.3. Ajuste de los distintos modelos con las propiedades teóricas del material.

Los modelos de material utilizados en la simulación son distintos dependiendo del tipo de cálculo que se implementa. Se parte del modelo más simple, tipo MAT1, utilizado para el análisis lineal que solo incluye el valor del módulo elástico, el coeficiente de Poisson y la densidad de la aleación 625. La evolución de este modelo de material a MATS1 incorpora las propiedades plásticas que posibilitan la realización de un análisis quasi-lineal. Este segundo modelo incluye el valor de límite elástico y la evolución de la curva tensión-deformación en forma de tabla. Por último se ha definido el modelo de material M36_PLAST_TAB para un análisis de tipo explícito. Con este tipo de material se puede definir, además de los parámetros utilizados en el modelo quasilineal, los valores de fallo mediante los coeficientes EPS. En un

primer cálculo se dejarán sin efecto pero estos coeficientes permiten ajustar la rotura de los elementos en relación al valor de deformación que sufre.

| Name | Value | Name | Value | Name | Value |
|----------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Solver Keyword | MAT1 | Solver Keyword | MAT1 | Solver Keyword | /MAT/PLAS_TAB/ |
| Name | 625 - LINEAL | Name | 625 - QUASILINEAL | ID | 1 |
| ID | 1 | ID | 3 | Name | mat1 |
| Color | | Color | | Color | |
| Include | [Master Model] | Include | [Master Model] | Include | [Master Model] |
| Defined | <input checked="" type="checkbox"/> | Defined | <input checked="" type="checkbox"/> | Defined | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Card Image | MAT1 | Card Image | MAT1 | User Comments | Hide In Menu/Export |
| User Comments | Hide In Menu/Export | User Comments | Hide In Menu/Export | Card Image | M36_PLAS_TAB |
| E | 207000.0 | E | 207000.0 | Regular_OR_... | Regular |
| G | | G | | RefRho_Option | <input type="checkbox"/> |
| NU | 0.3 | NU | 0.3 | Rho_Initial | 8.44e-09 |
| RHO | 8.44e-09 | RHO | 8.44e-09 | E | 207000.0 |
| A | | A | | Nu | 0.3 |
| TREF | | TREF | | EPS_p_max | |
| GE | | GE | | EPS_t | |
| ST | | ST | | EPS_m | |
| SC | | SC | | N_funct | 1 |
| SS | | SS | | fct_ID | (3) 625 TEORICO |
| MATS1 | <input type="checkbox"/> | MATS1 | <input checked="" type="checkbox"/> | Fscale | 1.0 |
| MATT1 | <input type="checkbox"/> | TID | (6) 625 TEORICO | Eps_dot | 0.01 |
| | | TYPE | PLASTIC | Fsmooth | |
| | | H | | C hard | |
| | | YF | | | |
| | | HR_REAL | <input type="checkbox"/> | | |
| | | HR | | | |
| | | LIMIT1 | 491.0 | | |
| | | TYPSTRN | 0 | | |

Figura 34. Modelos de material utilizados en las simulaciones.
Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

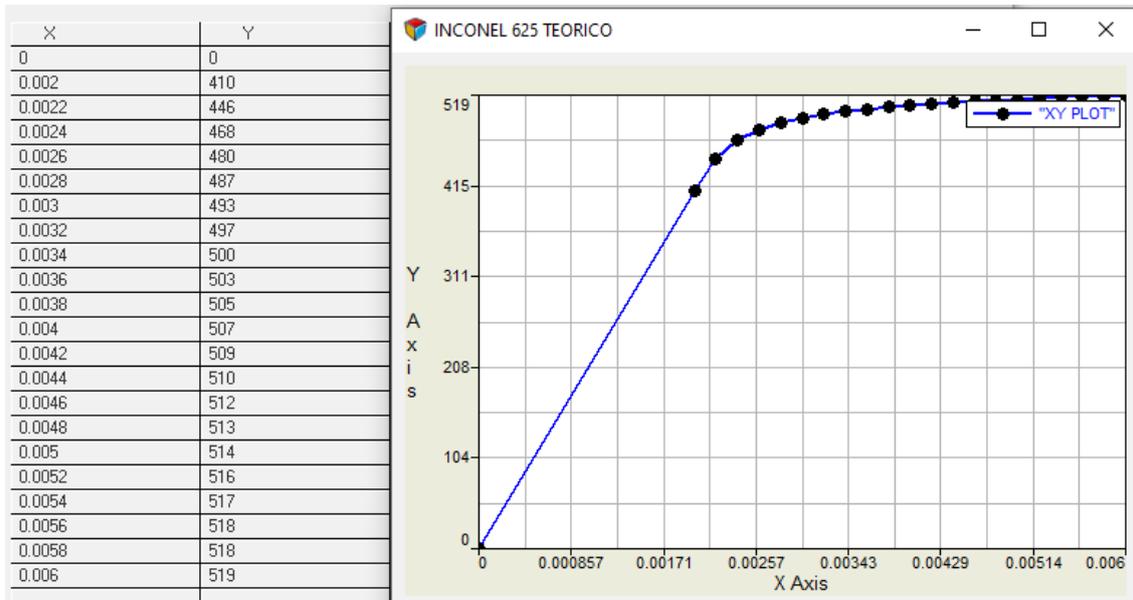


Figura 35. Detalle curva de comportamiento utilizada en el modelo de material del cálculo quasi-lineal.
Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

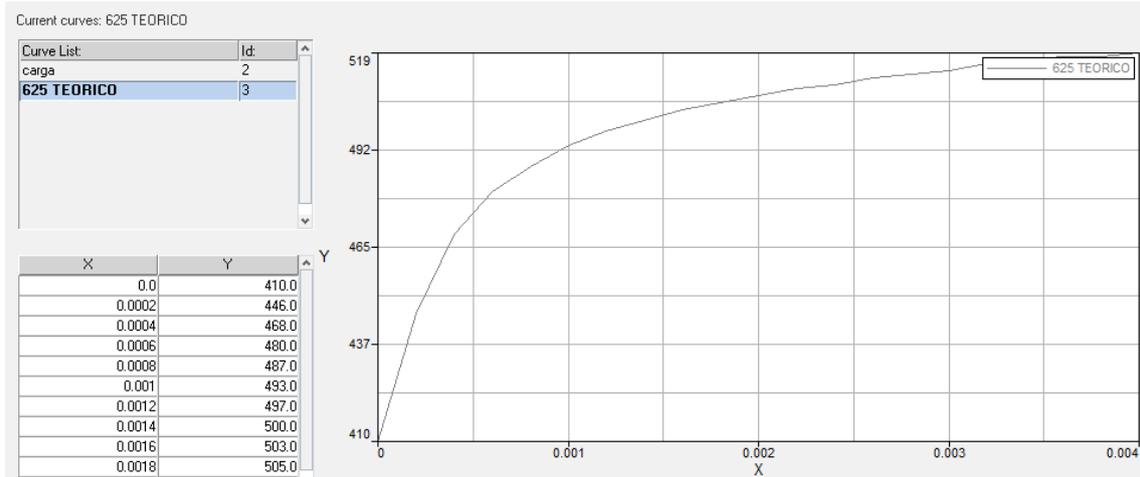


Figura 36. Detalle curva de comportamiento utilizada en el modelo de material del cálculo explícito.
Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

Alternativamente, y en vista de los resultados se ha evolucionado el modelo del cálculo definiendo en la zona central un conjunto de elementos con otras propiedades del material para poder variar independientemente del resto de la probeta. De esta manera se puede compensar la diferencia de comportamiento en esta zona.

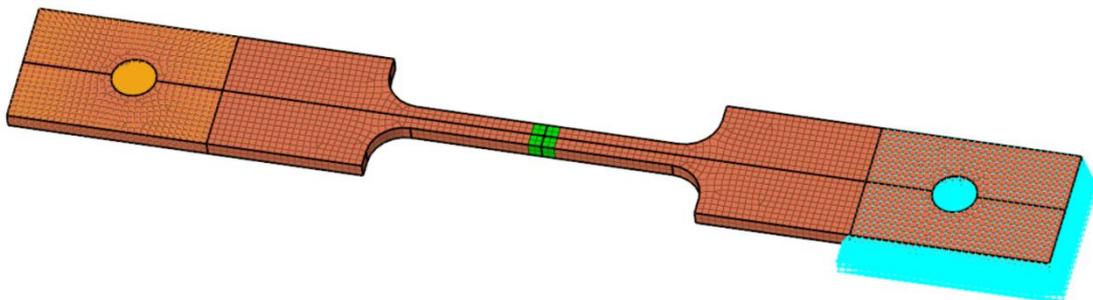


Figura 37. Detalle modelo de probeta con zona intermedia (en verde) con modelo de material distinto.
Fuente: Captura software de cálculo.

5.4.4. Análisis de resultados

La primera parte del desarrollo del modelo de elementos finitos se realizó en paralelo con el diseño del ensayo y por ese motivo se utilizó una probeta con las dimensiones del diseño inicial. Este modelo sirvió para determinar las tareas que se requerían y las variables que se necesitaban en la elaboración de la simulación. Así mismo se procedió a introducir las galgas virtuales y extraer la lectura teórica de las mismas.

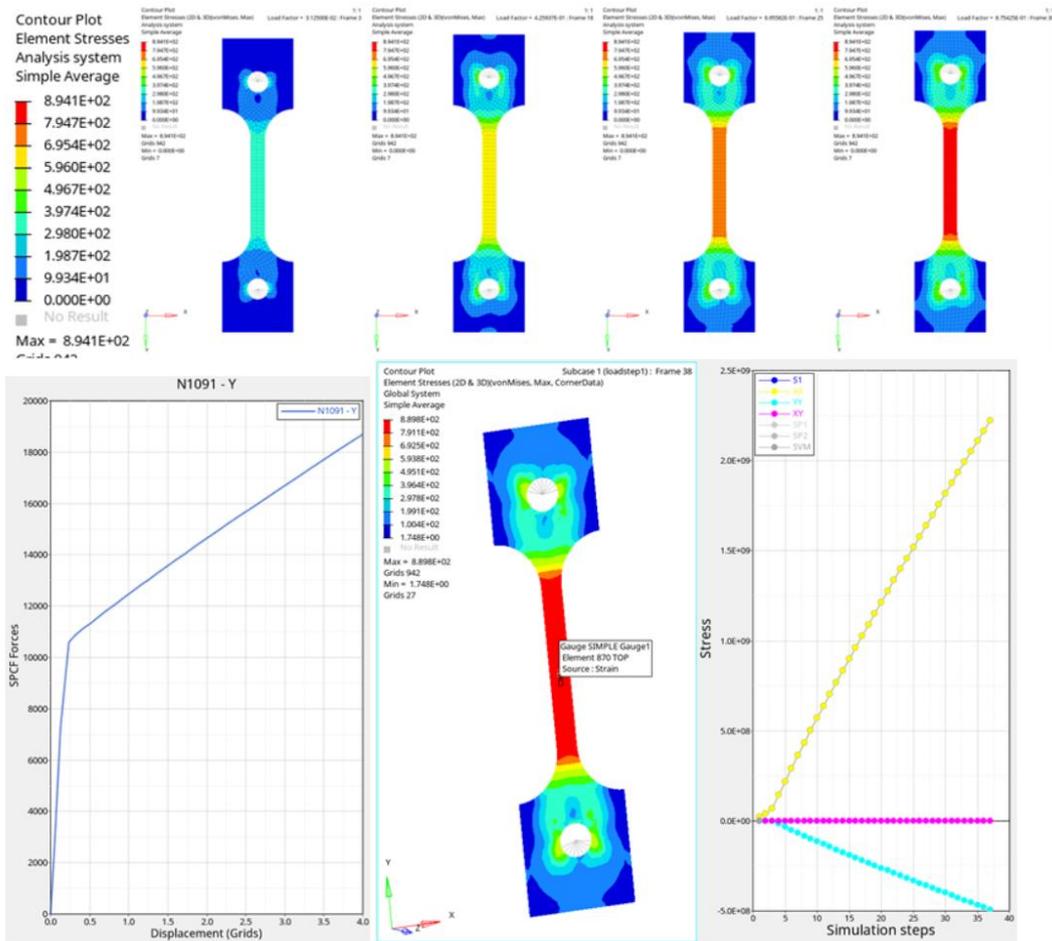


Figura 38. Distribución de la tensión en la probeta y gráficos de evolución de la fuerza y deformación en una galga virtual central. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

Posteriormente se elaboraron los modelos de cálculo lineal, quasi-lineal y explícito con las dimensiones finales de la probeta ensayada. Para cada uno de ellos y en vistas de los ensayos realizados, se han seleccionado cinco cargas representativas que son 3 kN, 4 kN, 5 kN y 14 kN. El comportamiento del material debe ser lineal hasta 5 kN si las propiedades mecánicas no se han visto alteradas por las condiciones aplicadas. El caso de 14 kN entra en el comportamiento no lineal del material y se calcula para examinar las diferencias entre las simulaciones pese a que es la carga más cercana a la rotura de la probeta.

A continuación se muestran las capturas de los resultados obtenidos de dichos análisis de elementos finitos:

➤ **Resultados calculo lineal:**

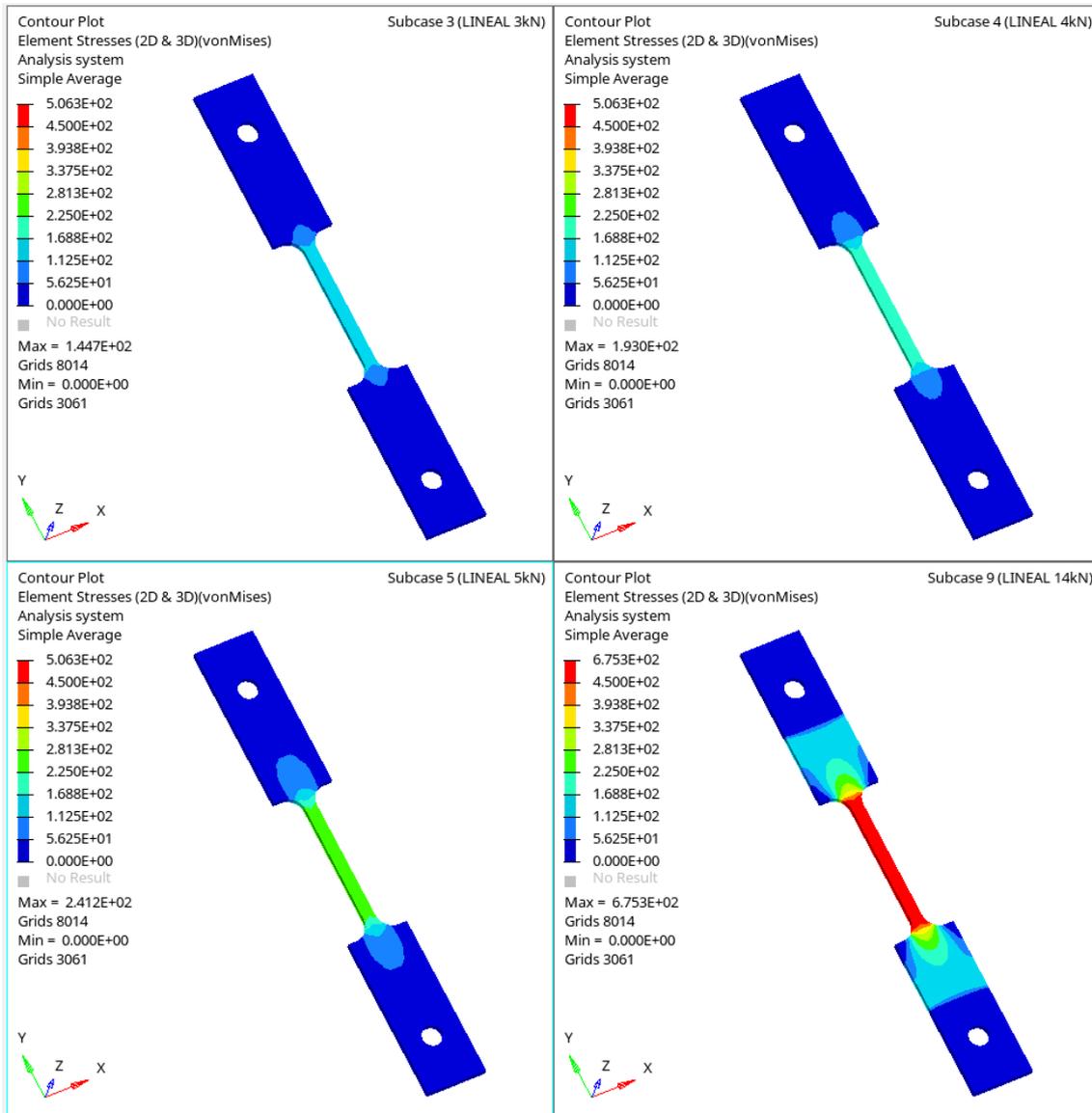


Figura 39. Resultados cálculo lineal. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

➤ **Resultados calculo quasi-lineal:**

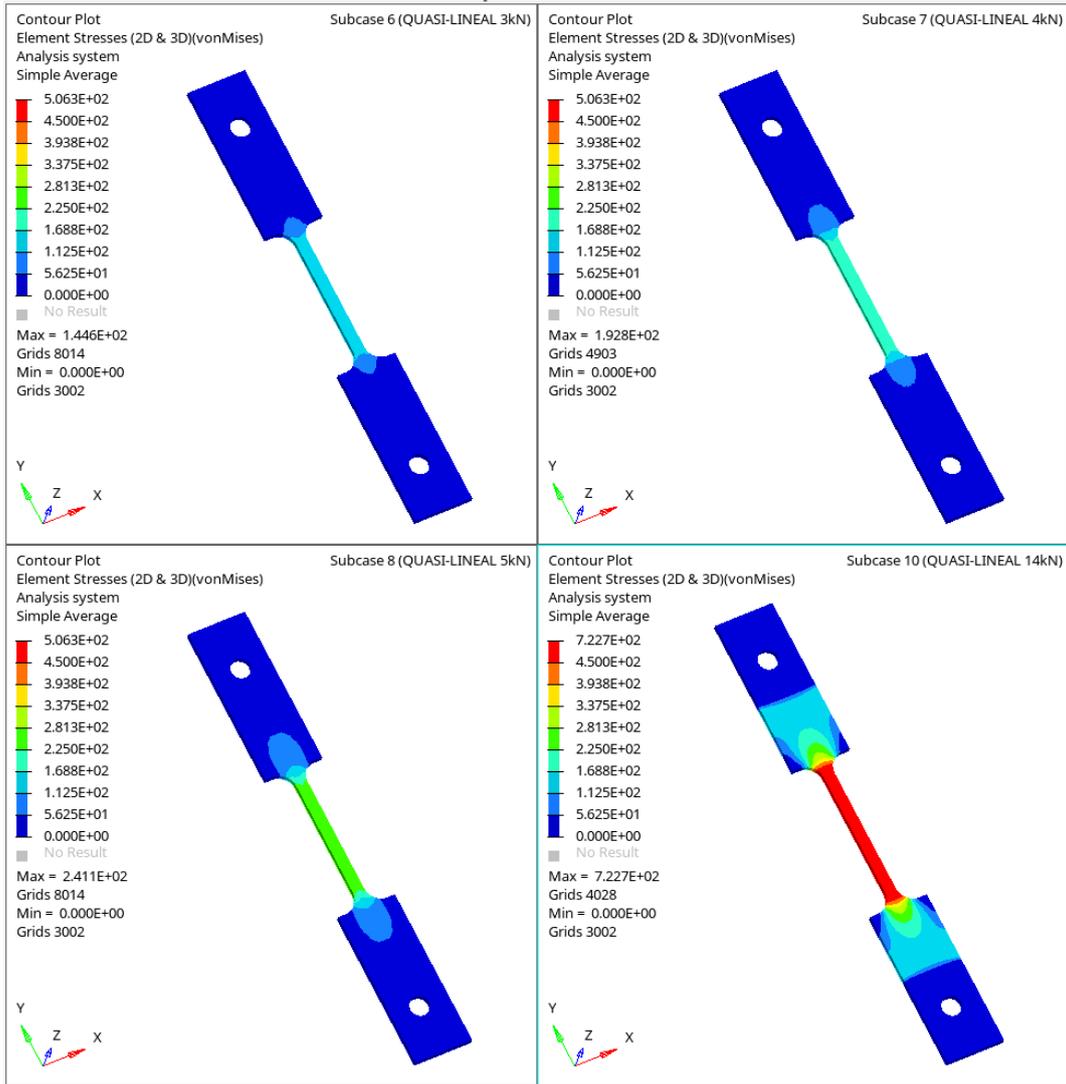


Figura 40. Resultados cálculo quasi-lineal. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

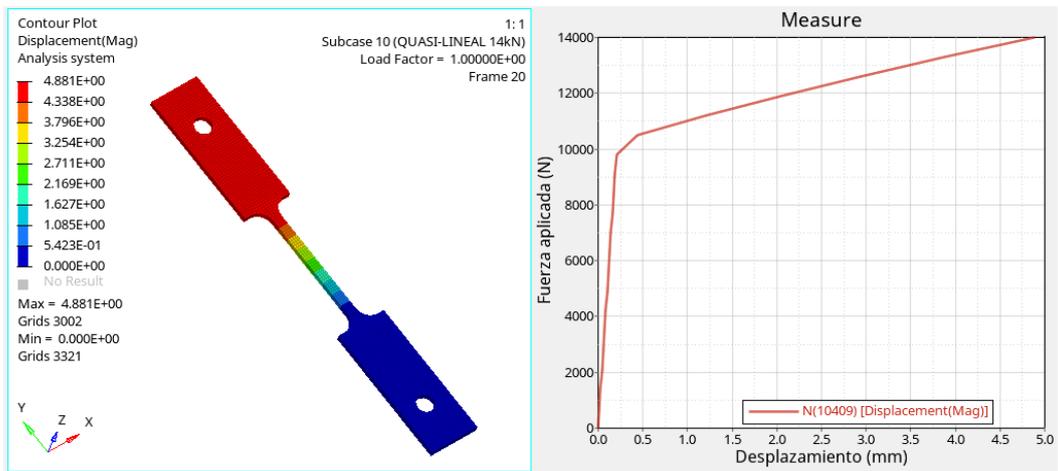


Figura 41. Detalle resultados de desplazamiento y gráfica Fuerza-Desplazamiento. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

➤ **Resultados calculo explicito:**

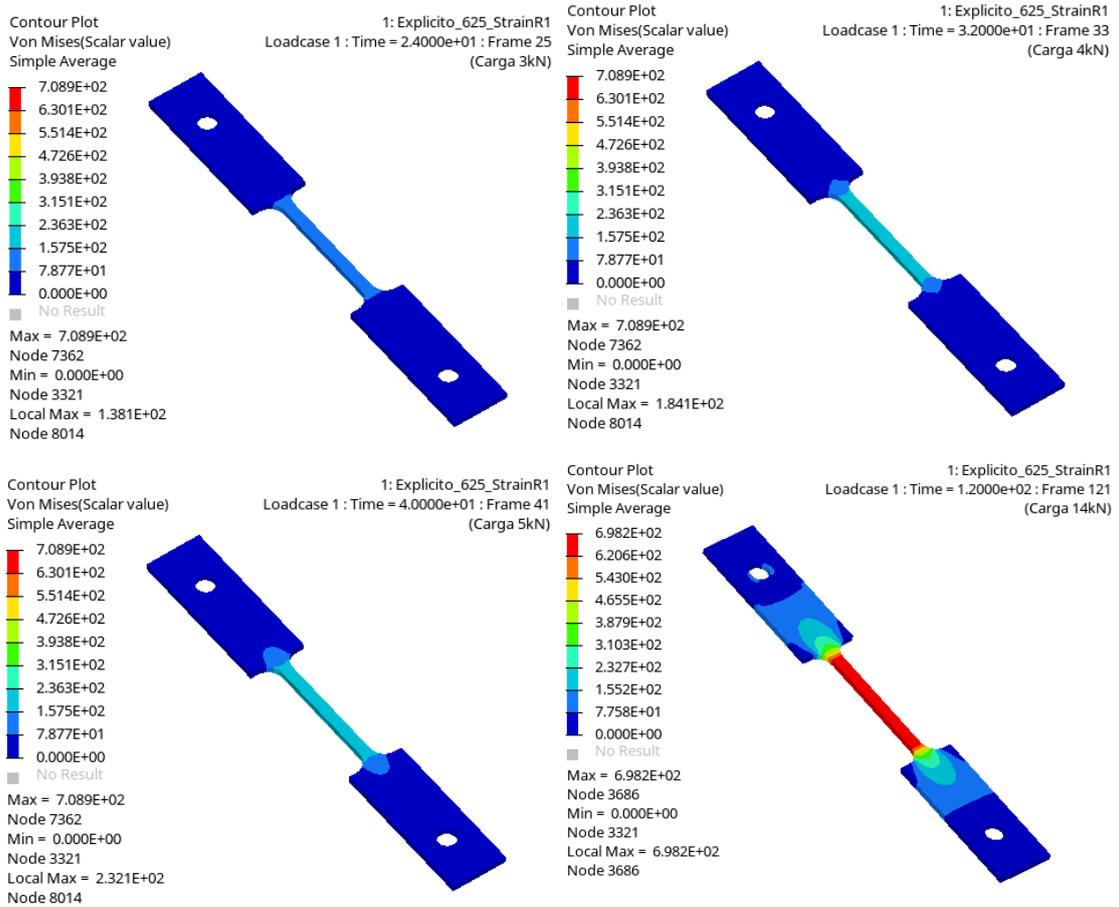


Figura 42. Resultados cálculo explicito. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

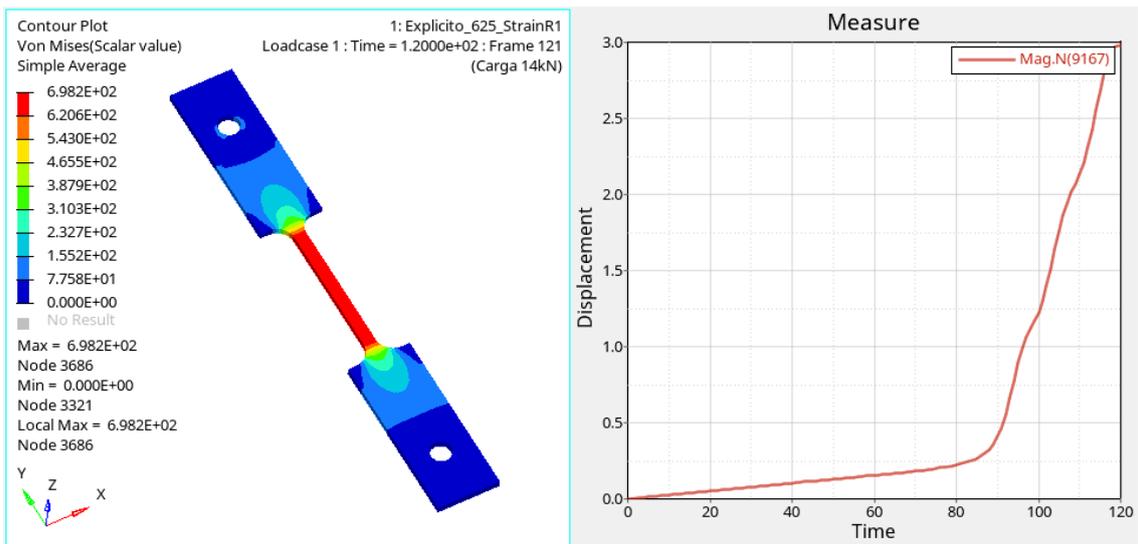


Figura 43. Detalle resultados de desplazamiento y gráfica Desplazamiento-Tiempo. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

5.5. Realización de ensayos

Este apartado resume las tareas de preparación del montaje y ajuste de instrumentación, la descripción de los ensayos realizados a las diferentes condiciones y el resumen de valores registrados con el análisis previo de los mismos.

5.5.1. Preparación del montaje y ajuste de la instrumentación.

El diseño de la probeta contempló la colocación de una galga de extensometría en el centro del cordón de soldadura (que coincide con la mitad de la longitud del estrechamiento de la probeta) con el objeto de medir las tensiones en el cordón de soldadura. Hubo que escoger cuidadosamente la galga debido a la anchura disponible de tan sólo 6 mm. A esta primera galga la denominamos galga central y su rejilla de medición (la parte sensible a la deformación) se encuentra a 37,5 mm de la base del estrechamiento de la probeta (que es la mitad de los 75 mm que aparecen en el plano de la probeta). También se contempló la colocación de una segunda galga de extensometría situada entre la galga central y la base del estrechamiento de la probeta. A esta segunda galga la denominamos galga lateral y se encuentra a 18,75 mm de la base del estrechamiento de la probeta (que es la cuarta parte de los 75 mm que aparecen en el plano de la probeta).

Para la colocación óptima de las galgas se inspeccionó la superficie del estrechamiento de la probeta y se escogió aquel lado con el mejor acabado superficial (libre de poros y de marcas de mecanizado). La probeta tiene un espesor nominal de 3 mm y una anchura nominal del estrechamiento de la probeta de 6 mm. Por lo tanto la sección transversal nominal es de 18 mm². Habida cuenta que el INCONEL 625 tiene un módulo de Young de 207.000 N/mm², se anticipa los siguientes valores teóricos de las microdeformaciones y tensiones para las sollicitaciones de 3 kN, 4 kN y 5 kN, que se contrastarán con los valores reales observados en los ensayos.

| Probeta INCONEL 625 | | |
|---------------------|---|------------------------------------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [$\mu\text{m}/\text{m}$] | Tensión [N/mm^2] |
| 3 | 805 | 167 |
| 4 | 1074 | 222 |
| 5 | 1342 | 278 |

Tabla 3. Valores nominales teóricos. Fuente: Elaboración propia.

En cada probeta se colocaron dos galgas de extensometría de la marca HBM con la referencia K-CLY4-0015-5-120-4-100-N, dotada de un cable plano paralelo de cuatro hilos conductores de tres metros de largo. La resistencia eléctrica de la galga es de 120 Ohmios. El factor k de galga es de 1,96. El coeficiente de temperatura del factor k es de $93 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{K}$. La sensibilidad transversal es de 0,4 %. La máxima tensión eléctrica de excitación de puente de Wheatstone es de 1,5 V. Se limpió la superficie metálica con alcohol. Se empleó el pegamento de secado rápido HBM modelo Z70 (cianoacrilato) para pegar la galga a la superficie metálica. La galga y sus cables se recubrieron con esmalte para protegerlos contra la humedad.

En las siguientes imágenes se muestran las diversas etapas del proceso de colocación de las galgas de extensometría en las probetas.

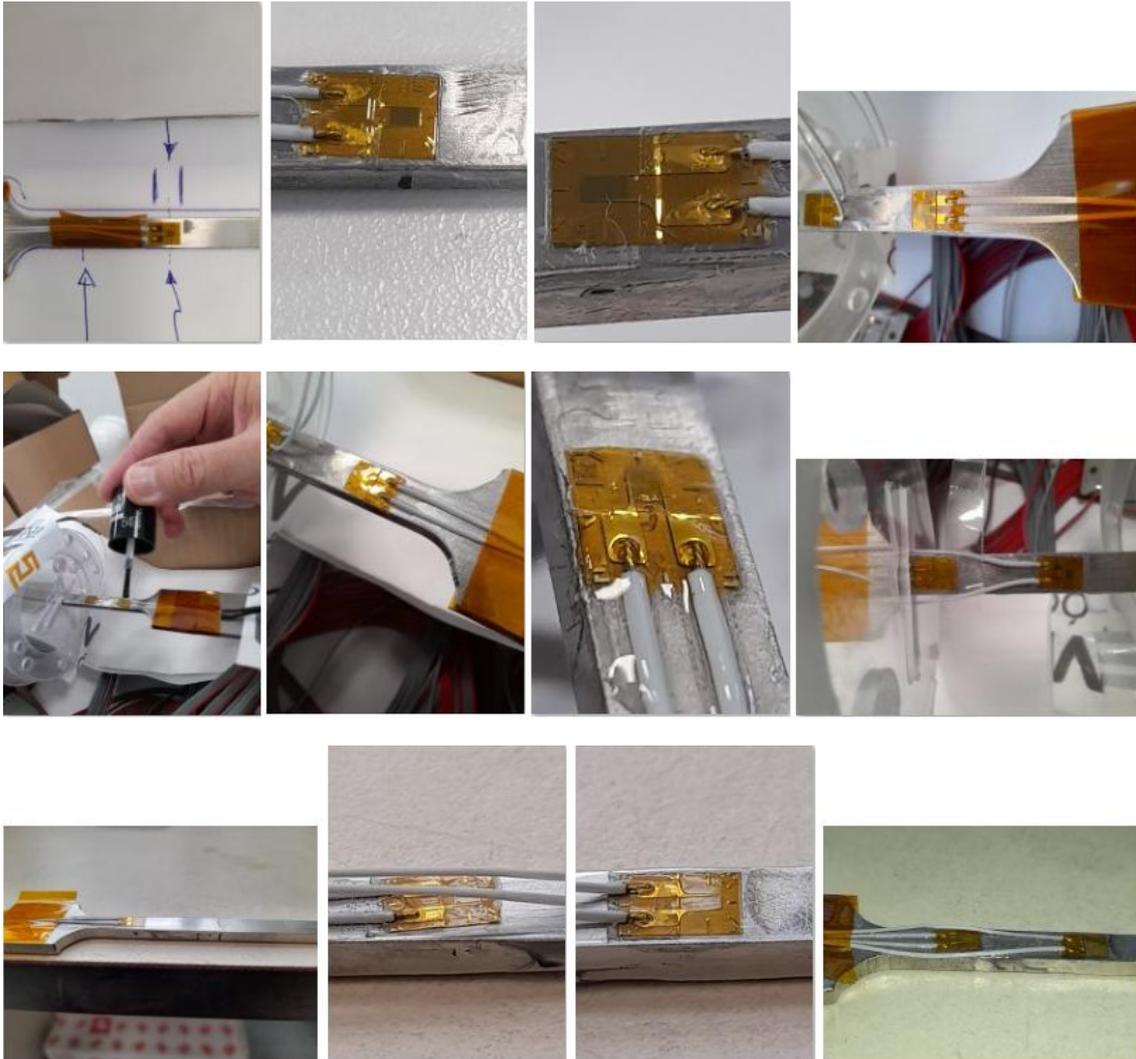


Figura 44. Pegado de las galgas en la probeta. Fuente: Elaboración propia.

La probeta se colocó en la máquina universal de ensayos para realizar un ensayo a tracción.

Se empleó un amplificador de señales de extensometría de la marca HBM y de modelo QuantumX MX-1615B. Cada galga se conectó a un canal del amplificador mediante la técnica de cuatro hilos y se configuró el canal de amplificador para compensar la resistencia eléctrica de los cables de conexión mediante el uso del circuito de Kreuzer de cuatro hilos (es una patente de HBM). Se configuró cada canal para emplear la técnica de portadora de 1200 Hz con el fin de reducir los efectos de las interferencias producidas por problemas de compatibilidad electromagnética. En la siguiente imagen se muestra al conjunto formado por el amplificador y el ordenador portátil empleados para la adquisición de datos.

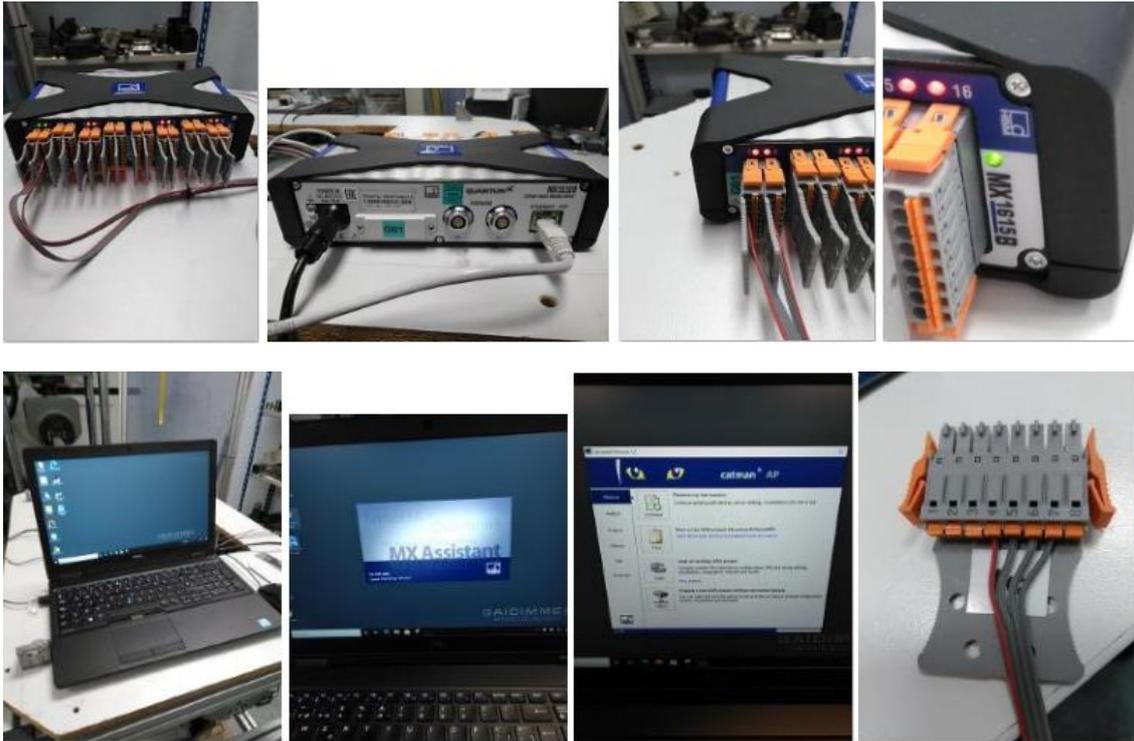


Figura 45. Amplificador y ordenador para la adquisición de datos. Fuente: Elaboración propia.

5.5.2. Ejecución y toma de datos de la tanda de ensayos con la probeta 1.

Se realizó una tanda de cuatro ensayos no destructivos de la probeta 1 con solicitaciones a tracción de 3 kN (con perfil de diente de sierra), 4 kN (con perfil de diente de sierra), 5 kN (con perfil de diente de sierra), 5 kN (con mantenimiento durante una hora para propiciar la fluencia) y, posteriormente, se realizó un ensayo destructivo a rotura de la probeta 1 para determinar su límite. Se midió el cordón de soldadura de la probeta con un pie de rey, cuya incertidumbre es de 0,02 mm, para obtener una anchura de 6,22 mm y un espesor de 2,95 mm. La sección transversal de la probeta 1 es de 18,349 mm². Esta sección transversal se empleó para recalcular la tabla de los valores de la tensión teórica, que se empleará para la comparación con las tensiones experimentales, como aparece a continuación.

| Probeta 1 (valores teóricos) | | |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [μm/m] | Tensión [N/mm ²] |
| 3 | 789,84 | 163,50 |
| 4 | 1053,12 | 218,00 |
| 5 | 1316,40 | 272,49 |

Tabla 4. Valores teóricos de la probeta 1. Fuente: Elaboración propia.

Las tensiones experimentales se obtuvieron multiplicando los datos experimentales de las microdeformaciones de la galga por el valor de 207.000 N/mm² del módulo de Young del material INCONEL 625. A priori se desconoce el valor del módulo de Young del material del cordón de soldadura, por lo que se supone que es igual a 207.000 N/mm².

➤ **Ensayos con la probeta 1 con una sollicitación de 3 kN:**

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga lateral de la probeta 1 durante el ensayo no destructivo de sollicitación a tracción de 3 kN.

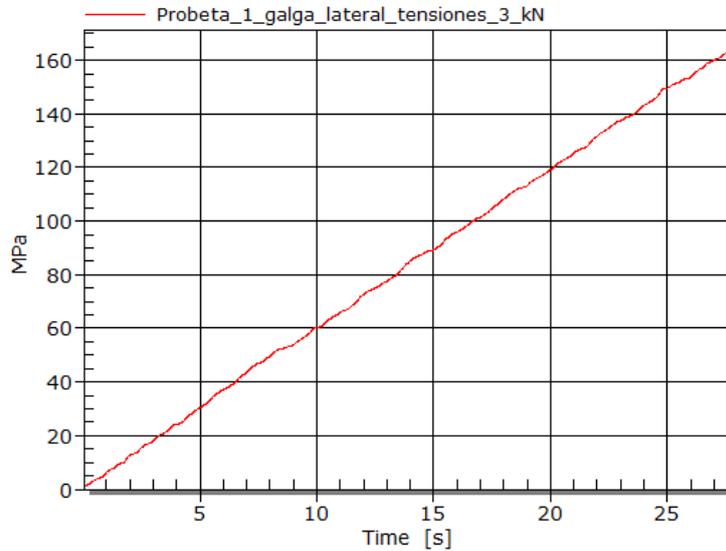


Figura 46. Probeta 1, galga lateral, tensiones de la tracción de 3 kN. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga central de la probeta 1 durante el ensayo no destructivo de sollicitación a tracción de 3 kN.

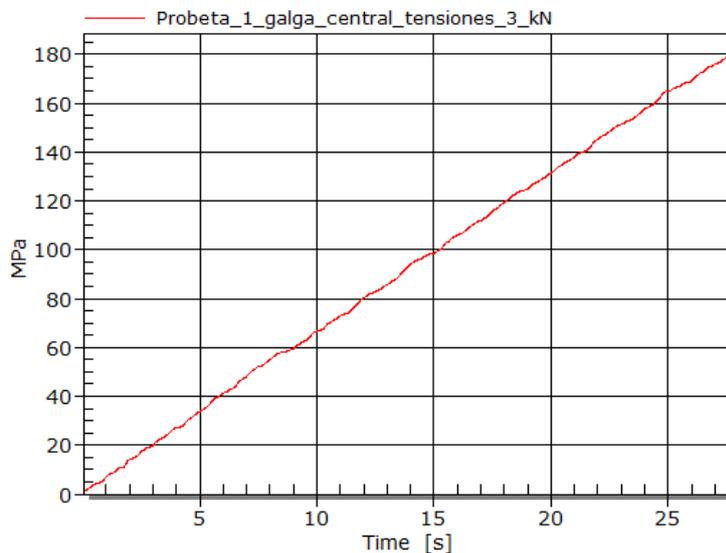


Figura 47. Probeta 1, galga central, tensiones de la tracción de 3 kN. Fuente: Elaboración propia.

En la galga central se aprecia una tensión superior a la de la galga lateral. Habida cuenta que la sección y la sollicitación son las mismas, se esperaría una misma tensión. Es probable que el cordón de soldadura NICROTEC TIG NI 625 no posea las mismas características que la chapa de INCONEL 625. Según la Tabla 2, el valor teórico de la tensión producida por la tracción de 3 kN es de 163,50 N/mm². La galga lateral indica un valor máximo de 163,32 N/mm² (error de -0,11 %) y la galga central de 179,70 N/mm² (error de 9,9 %). Ambos valores se calcularon bajo el

supuesto del módulo de Young de INCONEL 625 que es de 207.000 N/mm². El valor del módulo de Young del cordón de soldadura podría ser de 188.332 N/mm² para igualar la tensión calculada al valor teórico de 163,50 N/mm². Por lo tanto, el valor del módulo de Young de la soldadura NICROTEC TIG NI 625 podría ser de 188.332 N/mm².

➤ **Ensayos con la probeta 1 con una sollicitación de 4 kN:**

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga lateral de la probeta 1 durante el ensayo no destructivo de sollicitación a tracción de 4 kN.

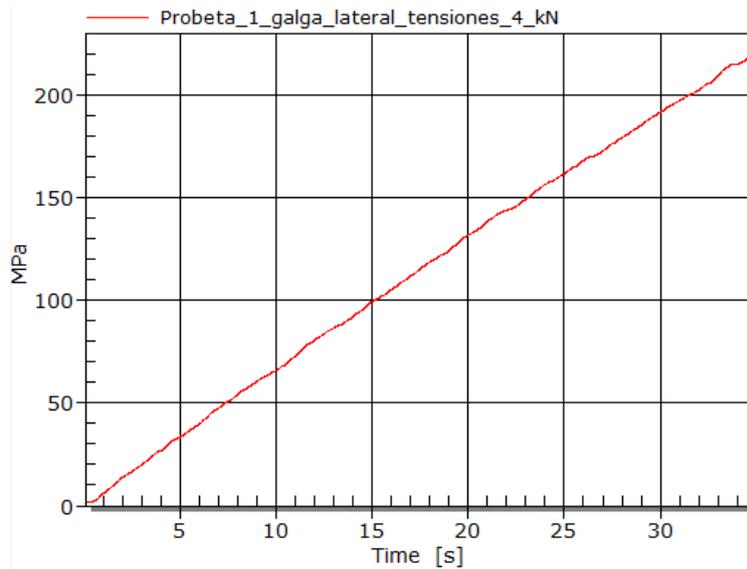


Figura 48. Probeta 1, galga lateral, tensiones de la tracción de 4 kN. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga central de la probeta 1 durante el ensayo no destructivo de sollicitación a tracción de 4 kN.

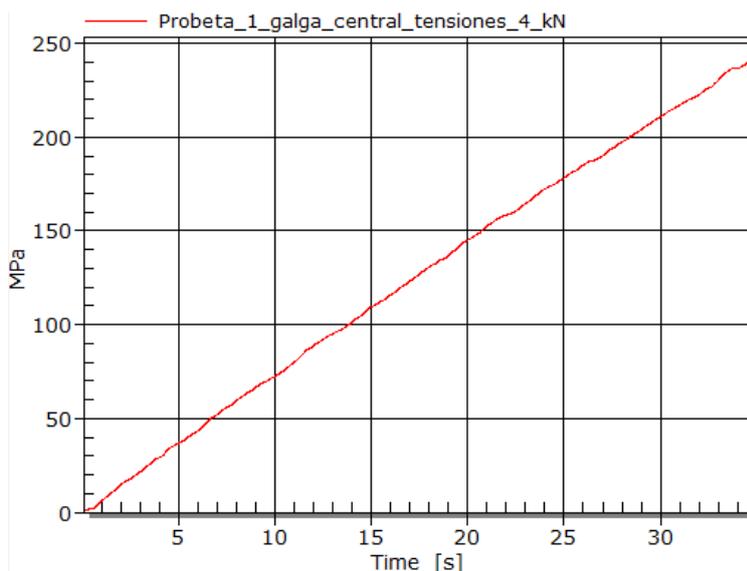


Figura 49. Probeta 1, galga central, tensiones de la tracción de 4 kN. Fuente: Elaboración propia.

En la galga central se aprecia una tensión superior a la de la galga lateral. Según la Tabla 2, el valor teórico de la tensión producida por la tracción de 4 kN es de 218,00 N/mm². La galga

lateral indica un valor máximo de 219,77 N/mm² (error de -0,81 %) y la galga central de 241,63 N/mm² (error de 11 %). Ambos valores se calcularon bajo el supuesto del módulo de Young de INCONEL 625 que es de 207.000 N/mm². El valor del módulo de Young del cordón de soldadura podría ser de 186.752 N/mm² para igualar la tensión calculada al valor teórico de 218,00 N/mm². Por lo tanto, el valor del módulo de Young de la soldadura NICROTEC TIG NI 625 podría ser de 186.752 N/mm².

➤ **Ensayos con la probeta 1 con una sollicitación de 5 kN.**

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga lateral de la probeta 1 durante el ensayo no destructivo de sollicitación a tracción de 5 kN.

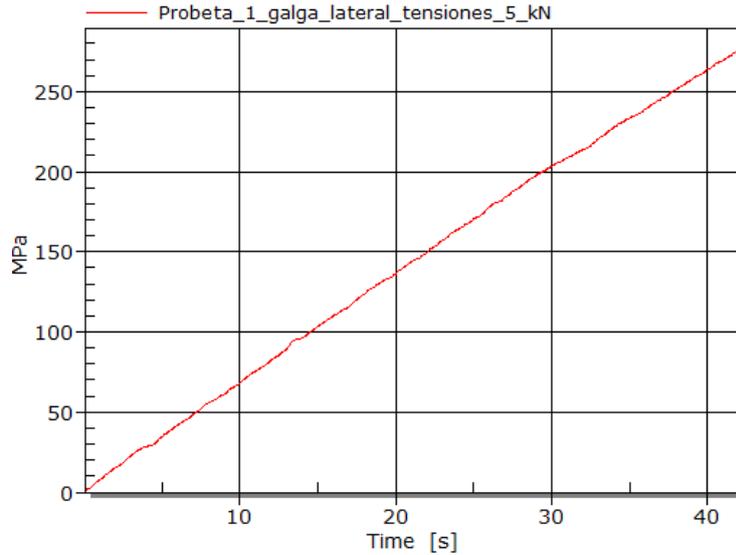


Figura 50. Probeta 1, galga lateral, tensiones de la tracción de 5 kN. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga central de la probeta 1 durante el ensayo no destructivo de sollicitación a tracción de 5 kN.

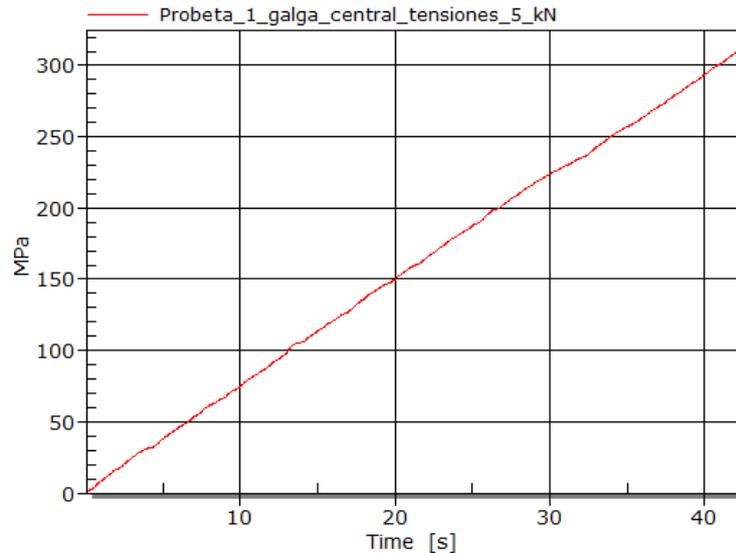


Figura 51. Probeta 1, galga central, tensiones de la tracción de 5 kN. Fuente: Elaboración propia.

En la galga central se aprecia una tensión superior a la de la galga lateral. Según la Tabla 2, el valor teórico de la tensión producida por la tracción de 5 kN es de 272,49 N/mm². La galga lateral indica un valor máximo de 275,95 N/mm² (error de 1,3 %) y la galga central de 309,65 N/mm² (error del 14 %). Ambos valores se calcularon bajo el supuesto del módulo de Young de INCONEL 625 que es de 207.000 N/mm². El valor del módulo de Young del cordón de soldadura podría ser de 182.161 N/mm² para igualar la tensión calculada al valor teórico de 272,49 N/mm². Por lo tanto, el valor del módulo de Young de la soldadura NICROTEC TIG NI 625 podría ser de 182.161 N/mm².

- **Ensayos con la probeta 1 con una sollicitación de 5 kN y mantenimiento durante una hora.**

El cuarto ensayo no destructivo de la probeta 1 consistió en la realización de un ensayo de tracción de 5 kN, con el mantenimiento a esa sollicitación durante una hora con el objeto de propiciar la fluencia del material. Se apreció que la lectura de la deformación de la galga lateral se posó en el valor de 72,63 μm/m tras el final del ensayo, y aquella de la galga central se posó en el valor de 274,3 μm/m, demostrando que la probeta 1 había sufrido una deformación permanente, siendo esta deformación de mayor grado en el cordón de soldadura.

- **Ensayo destructivo de sollicitación a rotura de la probeta 1.**

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga lateral de la probeta 1 durante el ensayo destructivo de sollicitación a rotura.

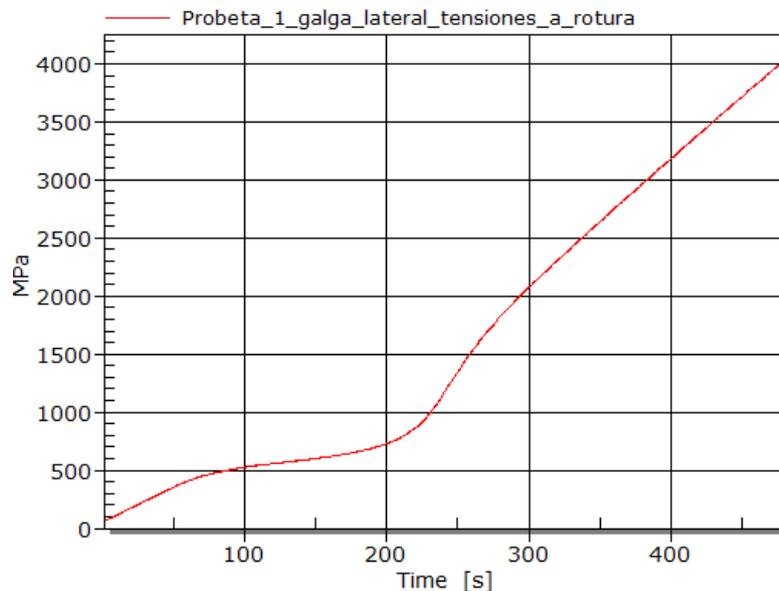


Figura 52. Probeta 1, galga lateral, tensiones de la tracción a rotura. Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente imagen se muestra la curva de tensión obtenida de la galga central de la probeta 1 durante el ensayo destructivo de sollicitación a rotura.

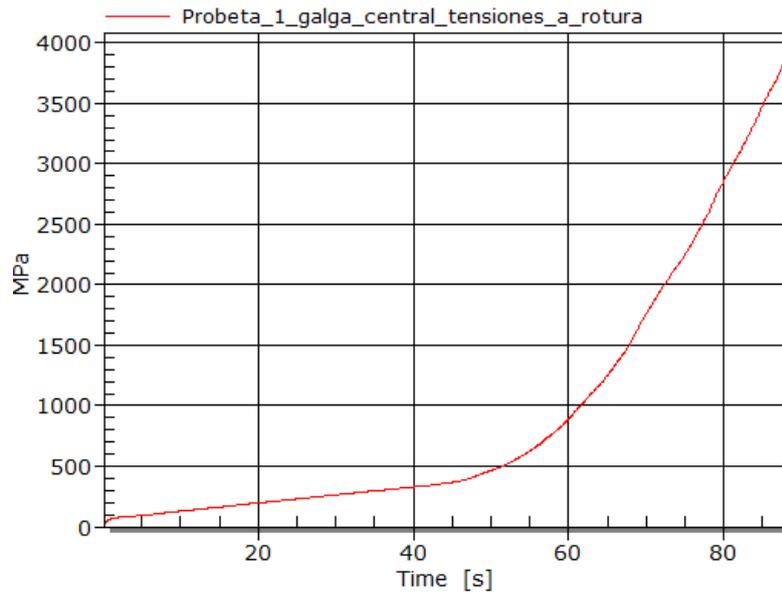


Figura 53. Probeta 1, galga central, tensiones de la tracción a rotura. Fuente: Elaboración propia.

El ensayo a rotura produce una tensión lo suficientemente grande como para romper la probeta. En este caso la rotura se produjo en el cordón de soldadura. Cabe señalar que las dos galgas se rompieron antes de la rotura de la probeta, por lo que la toma de datos se vio interrumpida. La galga central fue la primera en fallar. Según los registros, se alcanzaron las 18803 microdeformaciones (alargamiento del 1,88 %) y se produjo la rotura de la galga central (con la pérdida súbita de la señal eléctrica) en la marca de 88,26 segundos después del inicio de la tracción. Cabe señalar que HBM recomienda un límite de 4000 microdeformaciones para la zona del límite elástico con alargamientos por debajo del 1 %. Ambos límites se han sobrepasado por lo que no es raro que la galga central se haya roto, ya que la excesiva deformación del cordón de soldadura causó la rotura de la galga central.

La galga lateral falló en segundo lugar. Según los registros, se alcanzaron las 19586 microdeformaciones (alargamiento del 1,95 %) y se produjo la rotura de la galga lateral (con la pérdida súbita de la señal eléctrica) en la marca de 482,16 segundos después del inicio de la tracción. La siguiente imagen muestra la superposición de las curvas de tensión de las galgas central y lateral. Cada curva acaba su trazo con la ruptura de la correspondiente galga.

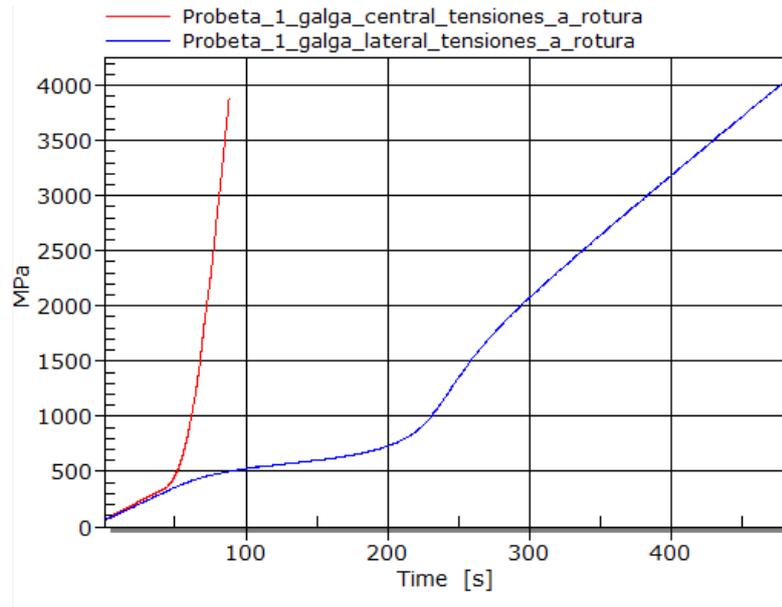


Figura 54. Probeta 1, galgas central y lateral, tensiones de la tracción a rotura. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que las curvas empiezan juntas y se produce una divergencia cuando la curva de la galga central (trazada con el color rojo) aumenta su pendiente, mientras que la curva de la galga lateral (trazada con el color azul) disminuye su pendiente. La siguiente imagen muestra a las mismas curvas pero con escalas logarítmicas en ambos ejes y con la limitación del recorrido del eje vertical desde 40 MPa hasta 600 MPa, para observar la divergencia con mayor detalle.

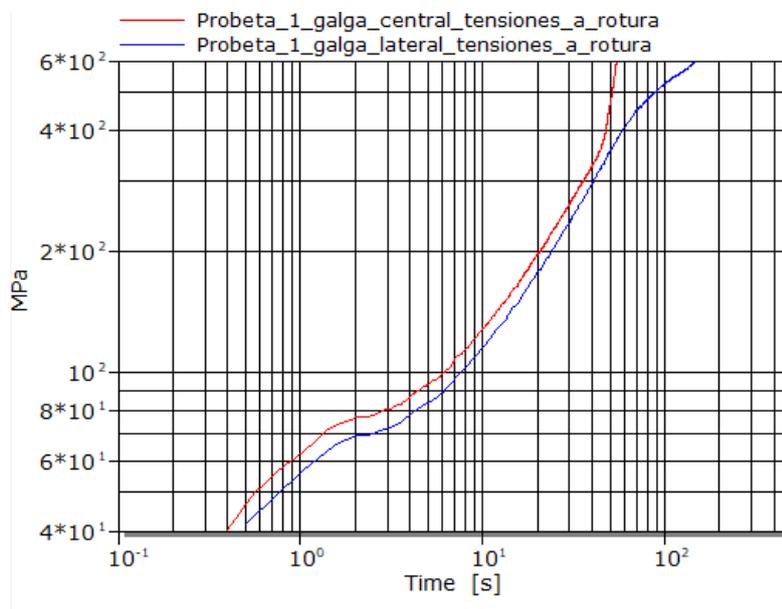


Figura 55. Probeta 1, galgas central y lateral, tensiones de la tracción a rotura (escalas logarítmicas). Fuente: Elaboración propia.

La imagen anterior permite determinar que la divergencia entre las dos curvas se produce entre las marcas de tiempo de 40 segundos y 50 segundos desde el inicio de la tracción.

Las siguientes imágenes muestran el aspecto de la probeta antes, durante y después de la rotura. De especial interés es la estricción de la probeta, donde la sección disminuye en la zona de la rotura, tal y como predice la teoría.

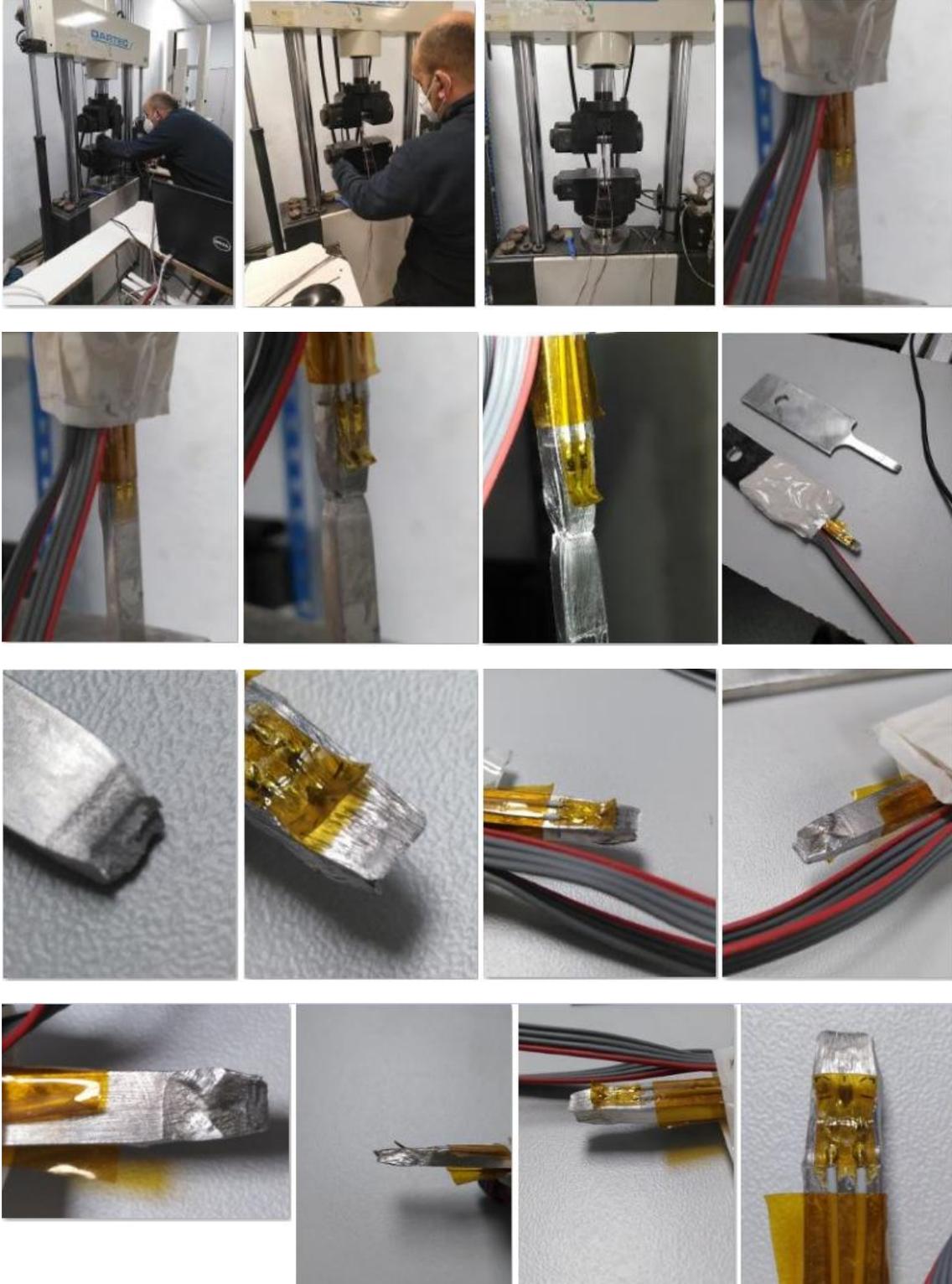


Figura 56. Rotura de la probeta e imágenes de la estricción. Fuente: Elaboración propia.

La estricción es la disminución de la sección de la probeta y su presencia es evidente en las anteriores imágenes.

La siguiente tabla muestra las tensiones obtenidas de la galga lateral durante los ensayos.

| Probeta 1 (galga lateral) | | | |
|---------------------------|---|------------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [$\mu\text{m}/\text{m}$] | Tensión [N/mm^2] | Error [%] |
| 3 | 789 | 163,3 | -0,11 |
| 4 | 1061,7 | 219,8 | 0,81 |
| 5 | 1333,1 | 276,0 | 1,3 |

Tabla 5. Valores experimentales de la probeta 1. Fuente: Elaboración propia.

Los valores experimentales de la galga lateral tienen un error promediado del 0,7 %, por lo que se considera que son muy buenos resultados experimentales.

La siguiente tabla muestra las tensiones obtenidas de la galga central durante los ensayos.

| Probeta 1 (galga central) | | | |
|---------------------------|---|------------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [$\mu\text{m}/\text{m}$] | Tensión [N/mm^2] | Error [%] |
| 3 | 868,13 | 179,7 | 9,9 |
| 4 | 1167,3 | 241,6 | 11 |
| 5 | 1495,9 | 309,7 | 14 |

Tabla 6. Valores experimentales de la probeta 1. Fuente: Elaboración propia.

Los valores experimentales de la galga central tienen un error promediado del 11 %. Habida cuenta que la galga central está encima de cordón de soldadura y que el error es muy grande, cabe preguntarse si es adecuado emplear el módulo de Young del material INCONEL 625. Es cierto que la soldadura empleada tiene la misma composición química que el material INCONEL 625, pero la soldadura no ha tenido el mismo proceso metalúrgico que la chapa del material INCONEL 625, por lo que es probable que no le corresponda el mismo módulo de Young.

Empleando una simple regla de proporcionalidad, se estimó el valor del módulo de Young de la soldadura necesario para que la deformación observada produzca la tensión teórica, para las tres solicitaciones. La media de estos tres cálculos es:

$$(188.332 \text{ N}/\text{mm}^2 + 186.572 \text{ N}/\text{mm}^2 + 182.161 \text{ N}/\text{mm}^2) / 3 = 185.748 \text{ N}/\text{mm}^2$$

Por lo tanto, la estimación del módulo de Young de la soldadura para la probeta 1 es de $185.748 \text{ N}/\text{mm}^2$.

Con esta estimación podemos calcular las tensiones de la galga central, como aparece en la siguiente tabla.

| Probeta 1 (galga central, tensión calculada con un módulo de Young de 185.748 N/mm ²) | | | |
|---|-------------------------|------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [μm/m] | Tensión [N/mm ²] | Error [%] |
| 3 | 868,13 | 161,25 | -1,4 |
| 4 | 1167,3 | 216,82 | -0,54 |
| 5 | 1495,9 | 277,86 | 2,0 |

Tabla 7. Valores experimentales de la probeta 1. Fuente: Elaboración propia.

Con el valor estimado de 185.748 N/mm² para el módulo de Young de la soldadura, los valores experimentales de las tensiones recalculadas de la galga central tienen un error promediado del 0,020 %.

La siguiente imagen muestra las mismas curvas que la anterior imagen pero con el valor estimado de 185.748 N/mm² para el módulo de Young de la soldadura, con escalas logarítmicas en ambos ejes y con la limitación del recorrido del eje vertical desde 40 MPa hasta 600 MPa, para observar la divergencia con mayor detalle.

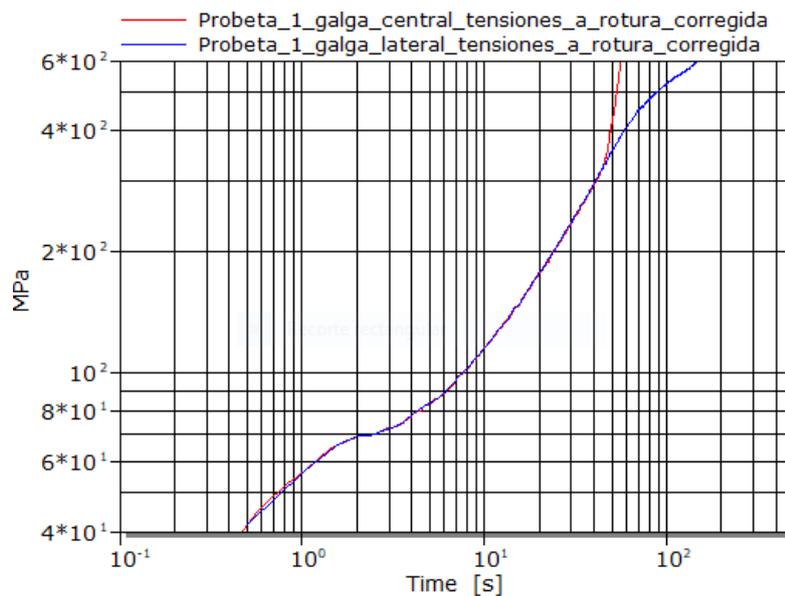


Figura 57. Probeta 1, galgas central corregida y lateral, tensiones de la tracción a rotura (escalas logarítmicas). Fuente: Elaboración propia.

En la anterior imagen se aprecia que las curvas están prácticamente superpuestas hasta el momento en el que se produce la divergencia. La siguiente imagen muestra la divergencia de las dos curvas en la marca de tiempo de 44 segundos y en la tensión de 320 MPa.

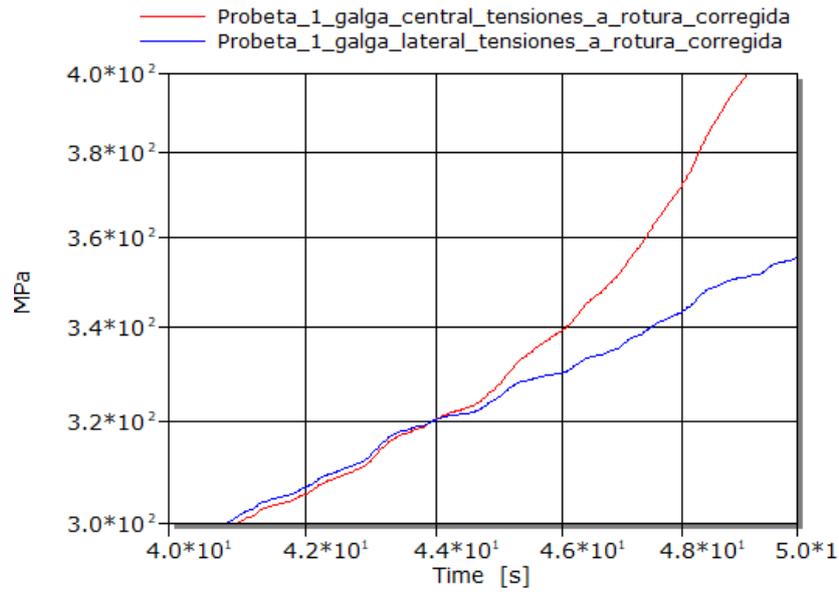


Figura 58. Probeta 1, galgas central corregida y lateral, tensiones de la tracción a rotura, detalle de la divergencia. Fuente: Elaboración propia.

Las curvas obtenidas durante el ensayo destructivo a rotura parecen indicar que el material del cordón de soldadura es menos rígido que el material de la chapa de INCONEL 625, y el hecho de que la estricción haya ocurrido en el cordón de soldadura así lo confirma.

5.5.3. Ejecución y toma de datos de la tanda de ensayos con la probeta 2.

La probeta 2 se introdujo en el recipiente de policarbonato, se rellenó con una disolución de cloruro de magnesio a temperatura ambiente y se sometió a una tanda de cuatro ensayos no destructivos con solicitaciones a tracción de 3 kN (con perfil de diente de sierra), 4 kN (con perfil de diente de sierra), 5 kN (con perfil de diente de sierra), 5 kN (con mantenimiento durante una hora para propiciar la fluencia). Para evitar el derramamiento de la disolución de cloruro de magnesio sobre la máquina universal de ensayos, no se realizó un ensayo destructivo a rotura de la probeta 2.

La siguiente secuencia de imágenes muestra a la probeta 2 en el recipiente de policarbonato.



Figura 59. Probeta 2 dentro del recipiente de policarbonato con líquido. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Ensayos con la probeta 2 con solicitaciones de 3 kN, 4 kN y 5 kN.**

Las imágenes de los ensayos de tracción de la probeta 2 son similares a aquellas de la probeta 1, motivo por el cual no se repiten para mayor brevedad. Las siguientes tablas muestran los datos obtenidos en los ensayos de la probeta 2.

| Probeta 2 (galga lateral) | | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [μm/m] | Tensión [N/mm ²] | Error [%] |
| 3 | 711,9 | 147,4 | -9,9 |
| 4 | 987,2 | 204,4 | -6,3 |
| 5 | 1240 | 256,7 | -5,8 |

Tabla 8. Valores experimentales de la probeta 2. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que las microdeformaciones de la galga lateral están por debajo del valor esperado, con una media del error de -7,3 %. Esto puede deberse a que la acción de la disolución de cloruro de magnesio haya afectado al cordón de soldadura y esto haya supuesto una disminución de su rigidez con el consiguiente aumento de su deformación, lo cual le restaría protagonismo al resto de la probeta 2.

| Probeta 2 (galga central) | | | |
|---------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [μm/m] | Tensión [N/mm ²] | Error [%] |
| 3 | 836,2 | 173,1 | 5,9 |
| 4 | 1130 | 233,9 | 7,3 |
| 5 | 1703 | 352,5 | 29 |

Tabla 9. Valores experimentales de la probeta 2. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que las microdeformaciones de la galga central están por encima del valor esperado, con una media del error de 14 %. De especial mención es el error de 29 % en el ensayo de 5 kN donde se alcanzó una deformación de 1703 μm/m y no se volvió a cero tras el final del ensayo sino que la deformación permaneció en 322,7 μm/m. Se observó en este ensayo de 5 kN que la curva de la galga central realizó un trazado extraño antes de llegar a la cota de 5 kN. Dado que la tensión producida por la solicitación de 5 kN en la sección de 18 mm² de la probeta 2 es de 277,7 N/mm², no se justifica el cálculo de 352,5 N/mm² de la tabla 7. Esto puede deberse a una alteración del material del cordón de soldadura que se traduce en una disminución súbita de su módulo de Young, por debajo de 207.000 N/mm².

Empleando una simple regla de proporcionalidad, se estimó el valor del módulo de Young de la soldadura necesario para que la deformación observada produzca la tensión teórica, para las tres solicitaciones. La media de estos tres cálculos es:

$$(199.314 \text{ N/mm}^2 + 196.657 \text{ N/mm}^2 + 163.111 \text{ N/mm}^2) / 3 = 186.361 \text{ N/mm}^2$$

Por lo tanto, la estimación del módulo de Young de la soldadura para la probeta 2 es de 186.361 N/mm².

Con esta estimación podemos calcular las tensiones de la galga central, como aparece en la siguiente tabla.

| Probeta 2 (galga central, tensión calculada con un módulo de Young de 186.361 N/mm ²) | | | |
|---|-------------------------|------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [μm/m] | Tensión [N/mm ²] | Error [%] |
| 3 | 836,2 | 155,8 | -6,5 |
| 4 | 1130 | 210,6 | -5,2 |
| 5 | 1703 | 317,4 | 14 |

Tabla 10. Valores experimentales de la probeta 2. Fuente: Elaboración propia.

Con el valor estimado de 186.361 N/mm² para el módulo de Young de la soldadura, los valores experimentales de las tensiones recalculadas de la galga central tienen un error promediado del 2,3 %. No obstante, para la sollicitación de 5 kN aparece una tensión calculada de 317,4 N/mm² que está por encima de la tensión teórica de 277,7 N/mm², sin explicación aparente ya que no se había producido una reducción de la sección de la probeta 2 en el cordón de soldadura.

La siguiente imagen muestra una gráfica compuesta del ensayo de la probeta 2 con la sollicitación de 5 kN que muestra las deformaciones de las galgas central y lateral.

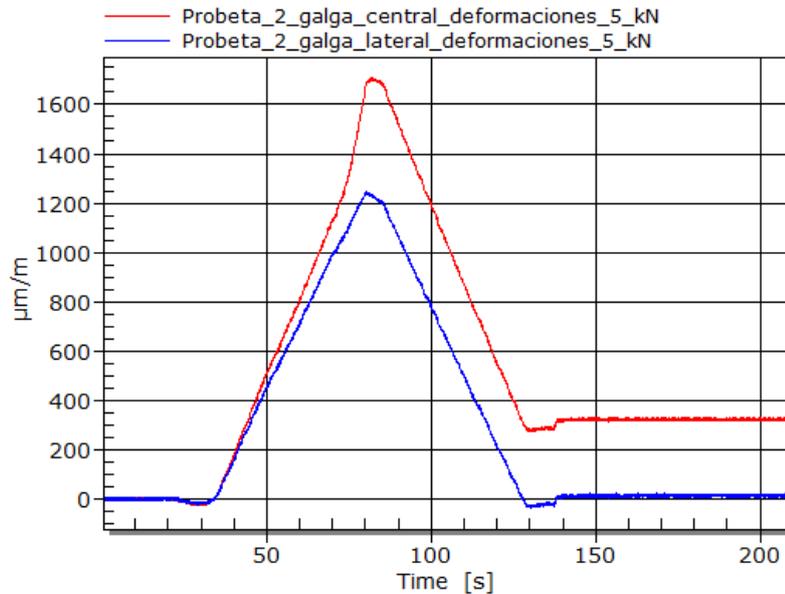


Figura 60. Probeta 2, deformaciones del ensayo de 5 kN. Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia, en la anterior imagen, que la curva de deformación de la galga central exhibe un pronunciado aumento de la pendiente aproximadamente a partir de la marca de tiempo de 70 segundos, donde llega a la cota de 1.132 μm/m. Es posible que este aumento de la pendiente se deba a la incursión en la zona de deformación plástica del material del cordón de soldadura, lo cual imposibilitaría el retorno al estado previo.

➤ **Ensayo con la probeta 2 con sollicitación de 5 kN y mantenimiento de una hora.**

El cuarto ensayo no destructivo de la probeta 2 consistió en la realización de un ensayo de tracción de 5 kN, con el mantenimiento a esa sollicitación durante una hora con el objeto de propiciar la fluencia del material. Se aprecia que la lectura de la deformación de la galga lateral volvió a cero tras el final del ensayo, pero aquella de la galga central no volvió a cero

sino que permaneció en una deformación de 236,4 $\mu\text{m}/\text{m}$, posiblemente debido a la fluencia. Esto parece indicar que el cordón de soldadura no sólo posee un módulo de Young inferior que el del INCONEL 625 sino que, además, posee un límite elástico inferior. Esto explicaría, en parte, la divergencia de las curvas de tensión de la probeta 1 durante el ensayo de tracción a rotura al alcanzarse la tensión de 320 N/mm^2 .

5.5.4. Ejecución y toma de datos de la tanda de ensayos con la probeta 3.

La probeta 3 se cortó para que cupiese en un matraz de laboratorio y se introdujo en un baño hirviente con la disolución de cloruro de magnesio, y permaneció ahí durante 96 horas. Posteriormente se retiró del baño, se limpió y se instrumentó con dos galgas de manera similar a las anteriores probetas. Finalmente se sometió a una tanda de cuatro ensayos no destructivos con solicitaciones a tracción de 3 kN (con perfil de diente de sierra), 4 kN (con perfil de diente de sierra), 5 kN (con perfil de diente de sierra) y 5 kN (con mantenimiento durante una hora para propiciar la fluencia), y a un ensayo destructivo de tracción a rotura.

La siguiente secuencia de imágenes muestra a la probeta 3 en su baño hirviente de disolución de cloruro de magnesio.



Figura 61. Probeta 3 cortada y sometida al baño hirviente de disolución de cloruro de magnesio.
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Ensayos con la probeta 3 con solicitaciones de 3 kN, 4 kN y 5 kN.**

Las imágenes de los ensayos de tracción de la probeta 3 son similares a aquellas de la probeta 1, motivo por el cual no se repiten para mayor brevedad. Las siguientes tablas muestran los datos obtenidos en los ensayos de la probeta 3.

| Probeta 3 (galga lateral) | | | |
|---------------------------|---|------------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [$\mu\text{m}/\text{m}$] | Tensión [N/mm^2] | Error [%] |
| 3 | 648,63 | 134,3 | -19,4 |
| 4 | 868,57 | 179,8 | -19,1 |
| 5 | 1083,7 | 224,3 | -19,2 |

Tabla 11. Valores experimentales de la probeta 3. Fuente: Elaboración propia.

| Probeta 3 (galga central) | | | |
|---------------------------|---|------------------------------------|-----------|
| Solicitación [kN] | Microdeformación [$\mu\text{m}/\text{m}$] | Tensión [N/mm^2] | Error [%] |
| 3 | 891,23 | 184,5 | 10,7 |
| 4 | 1192,8 | 246,9 | 11,1 |
| 5 | 1492,9 | 309,0 | 11,3 |

Tabla 12. Valores experimentales de la probeta 3. Fuente: Elaboración propia.

Se observa una disminución, con respecto al valor ideal, en las tensiones de la galga lateral, y un aumento en las tensiones de la galga central. El error de la galga lateral tiene una media de -19,3 % con respecto al valor ideal, por lo que el módulo de Young podría ser de 246.861 N/mm^2 (en lugar de 207.000 N/mm^2) para reducir la media del error a -3,7 %. El error de la galga central tiene una media de 11,0 % con respecto al valor ideal, por lo que el módulo de Young podría ser de 184.189 N/mm^2 (en lugar de 207.000 N/mm^2) para reducir la media del error a -1,2 %. Estas diferencias pueden deberse a los efectos de la disolución de cloruro de magnesio.

➤ **Ensayo con la probeta 3 con sollicitación de 5 kN y mantenimiento de una hora.**

El cuarto ensayo no destructivo de la probeta 3 consistió en la realización de un ensayo de tracción de 5 kN, con el mantenimiento a esa sollicitación durante una hora con el objeto de propiciar la fluencia del material. Se apreció que la lectura de la galga lateral no volvió a cero tras el final del ensayo sino que permaneció en -90,2 $\mu\text{m}/\text{m}$, y aquella de la galga central no volvió a cero sino que permaneció en 17,2 $\mu\text{m}/\text{m}$. Cabe señalar que antes de este ensayo se hizo un balance a “cero” de los canales de las dos galgas. La operación de balance a “cero” de un canal de lectura de una galga consiste en almacenar automáticamente la lectura real de la deformación de la galga en ese instante de tiempo en un registro especial llamado “cero”. Toda lectura presentada por el sistema de captura de datos es en realidad el resultado de haber sustraído el valor del registro “cero” de la lectura real de la galga. Por este motivo, las lecturas siempre son relativas al valor del registro “cero”. En el caso de la galga central, el valor del registro “cero” es igual a -123,0658 $\mu\text{m}/\text{m}$. En el caso de la galga lateral el valor del registro “cero” es igual a 976,272 $\mu\text{m}/\text{m}$. En general, un signo negativo de la lectura de deformación indica una compresión, y uno positivo una tracción. Si durante el proceso de pegado de la galga la probeta hubiese estado sometida a una tracción y esta tracción hubiese sido retirada tras haber curado completamente el pegamento, la probeta volvería a su estado inicial y la galga registraría una compresión (relativa a la tracción previa). Existe la funcionalidad de reposición del registro “cero” a su valor original de factoría de 0,0 $\mu\text{m}/\text{m}$ para que todas las lecturas sean absolutas.

➤ **Ensayo destructivo de sollicitación a rotura de la probeta 3.**

En la siguiente imagen se muestran las curvas de deformación de las galgas central y lateral de la probeta 3 durante el ensayo destructivo de sollicitación a rotura.

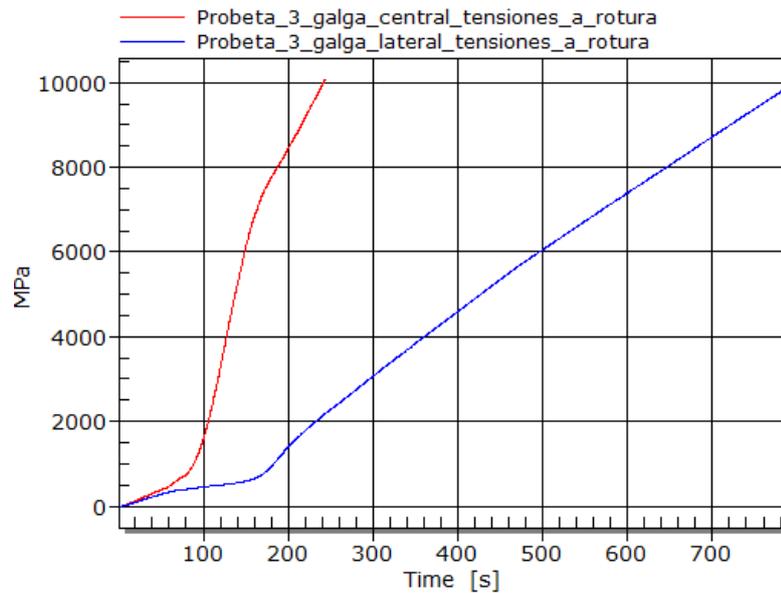


Figura 62. Probeta 3, deformaciones a rotura. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la probeta 1 la rotura de la galga central se produjo a una tensión de 4.000 MPa, pero en el caso de la probeta 3 la rotura de la galga central se produjo a una tensión de 10.000 MPa, que es dos y media veces mayor. La galga de la probeta 1 tardó menos tiempo en romperse que aquella de la probeta 3. Lo mismo ocurre con la galga lateral.

La tensión se ha calculado multiplicando el módulo de Young por la deformación registrada por la galga. Se ha tomado el valor de 207.000 N/mm² (207 GPa) como el módulo de Young del material INCONEL 625. Por otra parte, la tensión (en unidades de N/mm²) en la sección transversal de la probeta es el cociente de la sollicitación (en unidades de Newton) dividida por la sección (en unidades de milímetros cuadrados). Por diseño la anchura de la probeta es de 6 mm y su espesor es de 3 mm, por lo que la sección transversal es de 18 mm². Para la sollicitación de 3 kN la tensión teórica es de 166,66 N/mm², para la de 4 kN es de 222,22 N/mm², y para la de 5 kN es de 277,77 N/mm². Cuando la deformación multiplicada por el módulo de Young arroja un valor superior al de la tensión teórica, cabe la posibilidad que la sección de la probeta haya disminuido debido a la estricción (o estrechamiento de la probeta) o que se haya entrado en la zona de deformación plástica donde no se aplica el módulo de Young por ser éste un módulo de elasticidad de aplicación exclusiva en la zona de deformación elástica (y no la zona de deformación plástica).

Lo mismo se puede decir de la tracción a rotura de la probeta 3 donde se alcanza una deformación de 48713 microdeformaciones en la galga central sobre el cordón de soldadura y 47661 microdeformaciones en la galga lateral sobre el sustrato metálico (INCONEL 625). De multiplicarse las 47.661 microdeformaciones por el módulo de Young de 207.000 N/mm², se obtendría una tensión de 9.866 N/mm², que multiplicada por la sección transversal de 18 mm² nos arroja una sollicitación de 177.584 N. Pero, al haber entrado en la zona de deformación plástica, no se permite hacer este cálculo que está reservado para la zona de deformación elástica. De todas maneras, la prensa empleó 15 kN para romper la probeta 1.

5.6. Correlación de resultados

Este apartado se aborda la combinación de resultados para la correlación a partir de los datos del ensayo y de la generación de galgas virtuales. Posteriormente se analizarán para proponer modificaciones del modelo que permitan mejorar los modelos de cálculo de tal forma que contemplen el estado del material debido a su debilitación por las condiciones de trabajo severas.

5.6.1. Combinación de resultados para la correlación.

A partir de la realización del ensayo se puede disponer de los valores de deformación en los puntos de medida de las galgas y al mismo tiempo se dispone de la carga proporcionada por la máquina de ensayo.

La propia maquina de ensayo proporciona también valores de posición de las mordazas pero dichos valores incorporan tanto el deslizamiento que pueda existir en el agarre como el ruido introducido por el propio motor que alimenta la máquina de tracción. Estos dos motivos provocan que el tratamiento de los datos sea muy laborioso y por el contrario no se puede determinar la deformación puntual de la probeta en los puntos de interés.

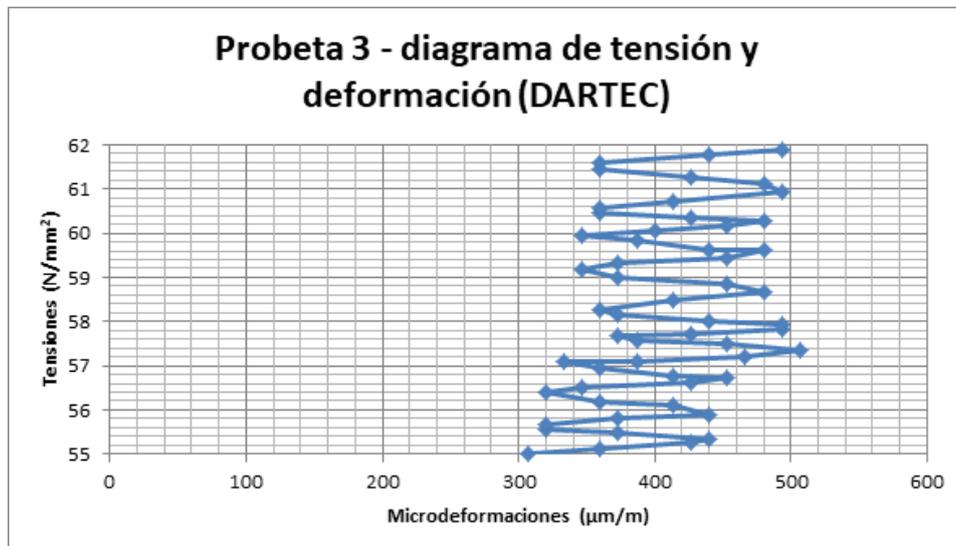


Figura 63. Detalle vibraciones introducidas por la máquina de tracción. Fuente: Elaboración propia.

Para evitar este efecto se decide sincronizar los valores de lectura de galga junto con la carga registrada por la máquina de ensayo. Una vez sincronizados se pueden elaborar las gráficas tensión-deformación de cada galga sin dicho efecto aunque como contrapartida se tendrán valores repetidos debido a la inestabilidad en el aumento de la carga que se explicó anteriormente. A continuación se muestran las gráficas elaboradas para la carga de 3kN que ofrecen los valores correspondientes al comportamiento lineal de los materiales en cada ensayo.

➤ **Probeta 1**

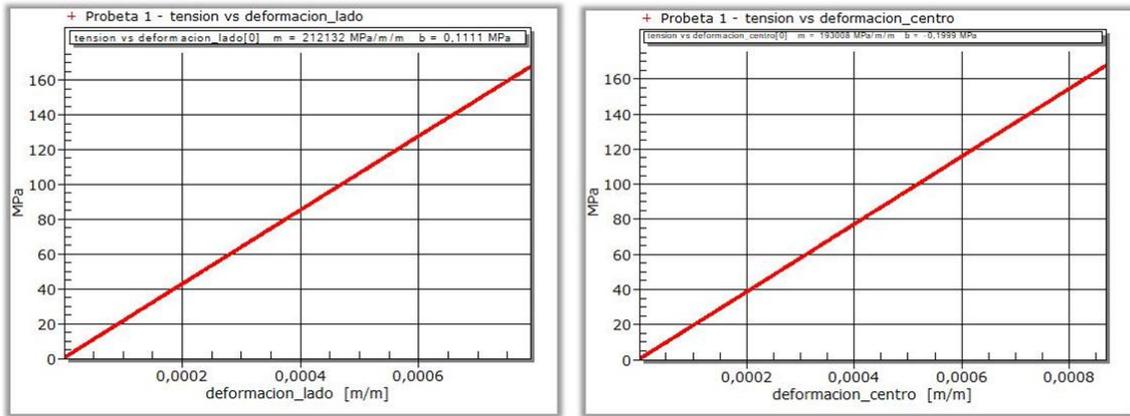


Figura 64. Curvas tensión-deformación probeta 1. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Probeta 2**

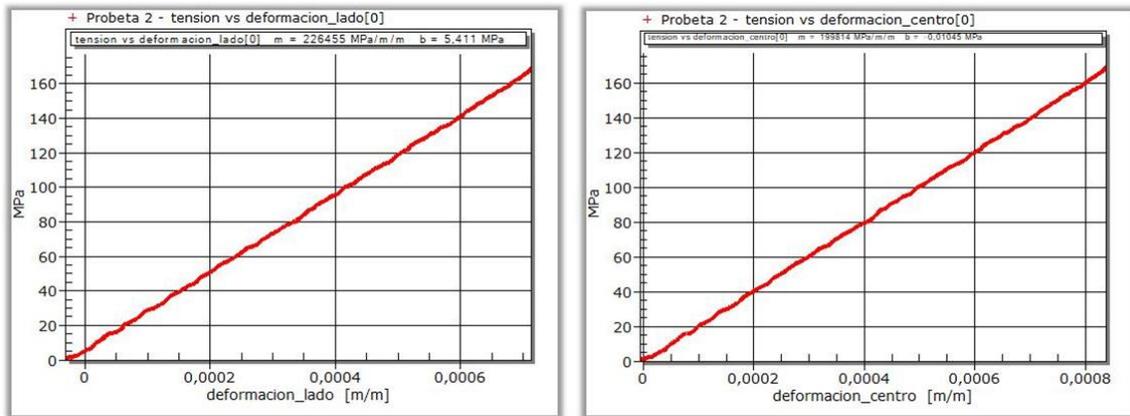


Figura 65. Curvas tensión-deformación probeta 2. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Probeta 3**

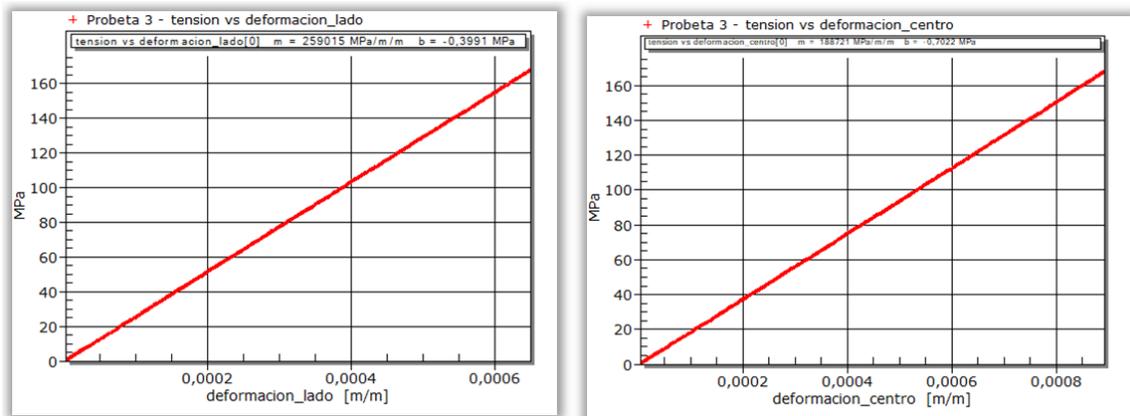


Figura 66. Curvas tensión-deformación probeta 1. Fuente: Elaboración propia.

Desde el enfoque de simulación planteado, se extraen los valores equivalentes de los ensayos para los tres tipos de cálculo distintos realizados. Para ello se generan en primer lugar las galgas virtuales en los puntos de medida.

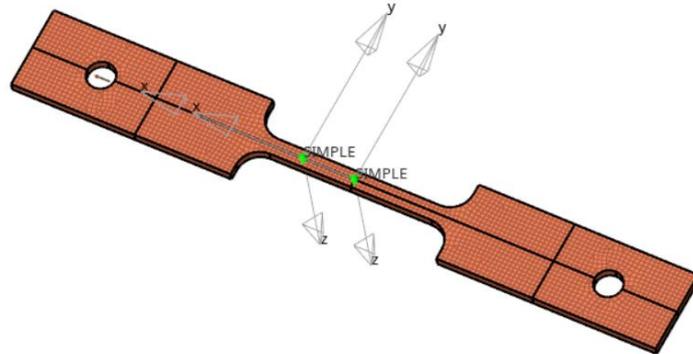


Figura 67. Generación de galgas virtuales. Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

Posteriormente se extraen de las galgas virtuales generadas los valores de tensión y deformación de las simulaciones realizadas. Debido a que se trata de una probeta y ambas galgas están posicionadas en la sección calibrada y con la misma orientación, los resultados teóricos extraídos en ambas son iguales.

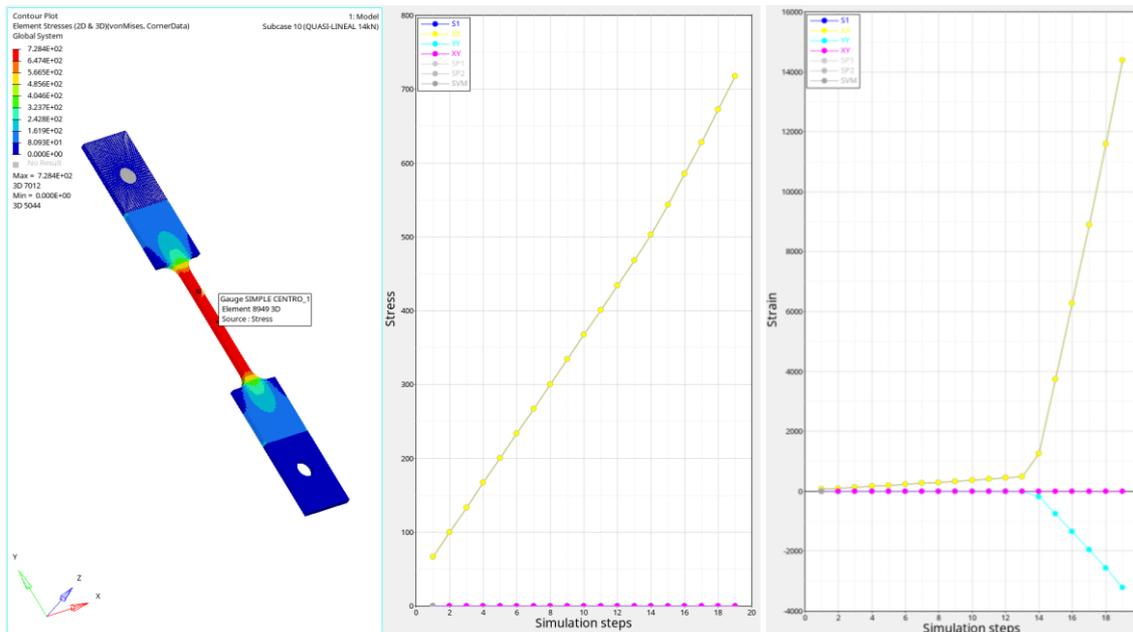


Figura 68. Resultados galga central Fuente: Elaboración propia a partir del software de cálculo.

Combinando los valores y eliminando el componente de evolución de la carga (steps) se puede representar la gráfica tensión-deformación del comportamiento de la probeta. Realizando esto mismo para los distintos modelos de simulación y escogiendo los casos de carga más representativos (5kN y 14kN) queda el siguiente gráfico:



Figura 69. Resultados tensión-deformación a partir de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Las gráficas obtenidas son muy similares y no existen grandes diferencias. Como es de esperar, el cálculo lineal y el quasi-lineal para carga de 5kN siguen un mismo recorrido de subida de tensión a medida que aumenta la carga pero que dejarían de ser iguales una vez sobrepasado el límite elástico como se puede observar en el caso quasi-lineal de 14kN.



Figura 70. Detalle resultados tensión-deformación a partir de la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Examinando en detalle la gráfica se puede observar que el cálculo del modelo explícito 14kN es muy similar al quasi-lineal aunque los valores son algo inferiores y no describen un comportamiento más irregular que en parte se debe a que existe un mayor registro de valores.

El estudio en conjunto de ambos resultados (experimentación y simulación) se realiza inicialmente combinando ambos resultados mostrados anteriormente. Se escoge el detalle para una deformación menor a $1,4E-03$ m/m que aseguren el estudio de la zona lineal y se representan en la misma gráfica anterior los valores obtenidos de la experimentación.

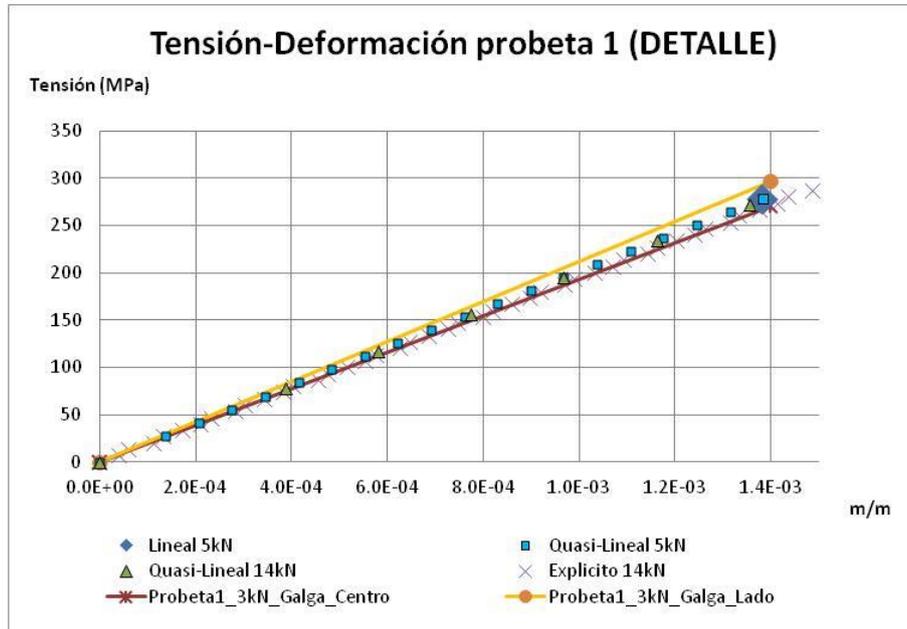


Figura 71. Combinación valores tensión-deformación de ensayo probeta 1 y simulación.
 Fuente: Elaboración propia.

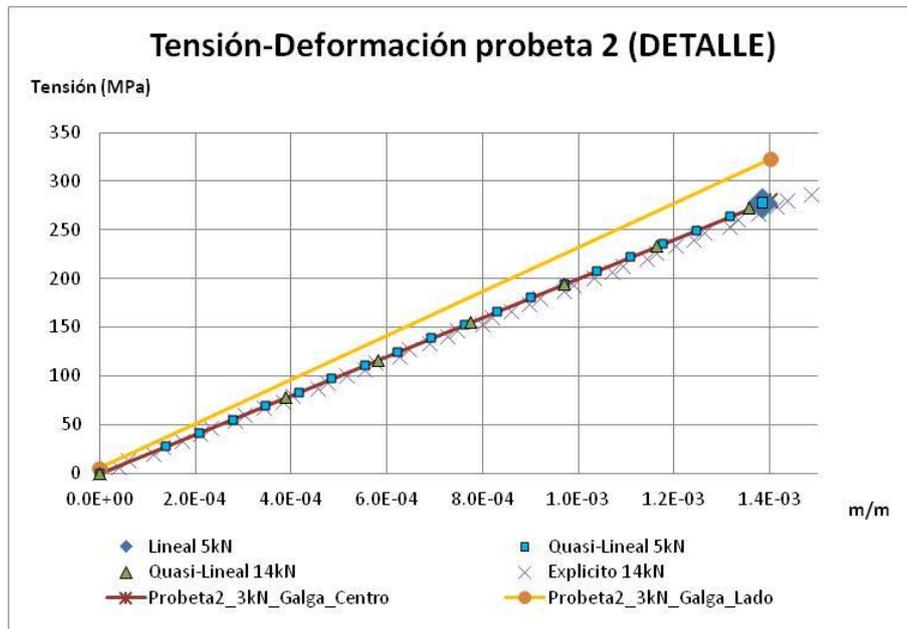


Figura 72. Combinación valores tensión-deformación de ensayo probeta 2 y simulación.
 Fuente: Elaboración propia.

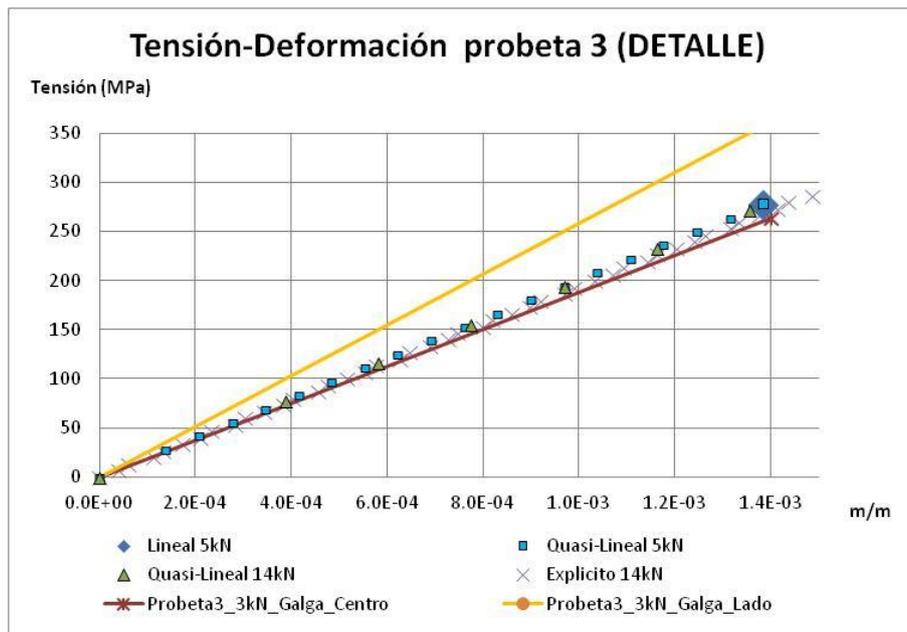


Figura 73. Combinación valores tensión-deformación de ensayo probeta 3 y simulación.
Fuente: Elaboración propia.

Revisando los resultados se puede concluir que la probeta 1 tiene unos valores de ensayo bastante ajustados al comportamiento simulado. La galga lado registra unos valores con una pendiente ligeramente superior y puede deberse a que la zona central está asumiendo más carga, y por tanto se deforma más, que en el punto de medida lado por el efecto de la propia soldadura aunque en el punto central las propiedades se ajustan muy bien al comportamiento teórico del material base.

Las experimentaciones de la probeta 2 y la 3 muestran una diferencia más acusada en la galga lado aunque la galga centro sigue mostrando una lectura bastante próxima a la simulación. Este resultado evidencia que la aplicación de las condiciones severas ha afectado al material y se debería estudiar la modificación del modelo de simulación para diferenciar el comportamiento del material entre las zonas de la galga centro y la galga lado.

5.6.2. Identificación de opciones de ajuste en el modelo de simulación.

En el apartado anterior se ha podido examinar el comportamiento de las probetas y se ha observado que en la experimentación de la probeta 2 y probeta 3 existen diferencias considerables con la simulación. Las lecturas de la “galga lado” en esas dos probetas han mostrado una mayor pendiente en la gráfica tensión-deformación con respecto a la simulación mientras que la “galga centro” sigue ajustándose bastante bien en la probeta 2 y también en la probeta 3 aunque se disminuye ligeramente la pendiente.

Se ha optado por modificar el modelo de cálculo tal como se ha explicado previamente en el apartado “5.4.3 Ajuste de los distintos modelos con las propiedades teóricas del material.” de tal forma que se pueda asignar otro material a los elementos de la parte central. Esta modificación está justificada por la existencia de la soldadura en la zona central junto con las condiciones severas a las que se ha visto sometida la probeta.

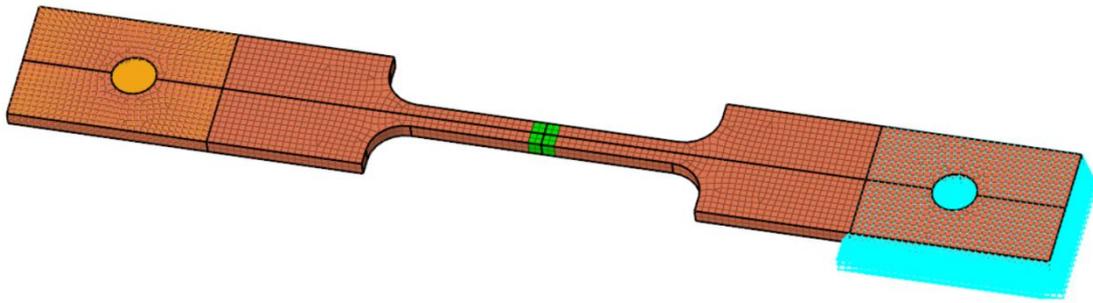


Figura 74. Detalle modelo de probeta con zona intermedia (en verde) con modelo de material distinto.
Fuente: Captura software de cálculo.

Inicialmente se decide modificar los valores de módulo elástico de la zona central y se ve un cambio en ambas rectas pero influye principalmente en la galga central que paradójicamente es la que menor desviación presenta. Posteriormente se modifican los valores del módulo elástico para ambos materiales y de forma iterativa se llega hasta los valores de $E_{\text{probeta}}=230.000\text{MPa}$ y $E_{\text{central}}=200.000\text{MPa}$ que muestran los siguientes resultados.

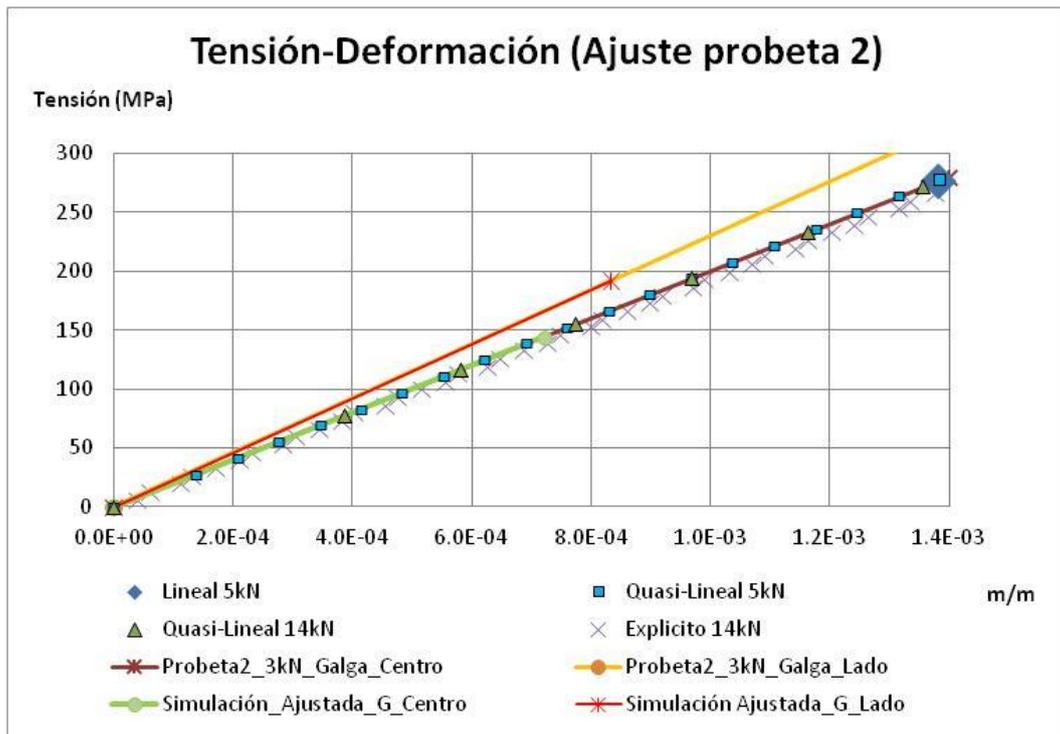


Figura 75. Combinación valores tensión-deformación de ensayo probeta 2 y ajuste de simulación.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores en verde pertenecen a la galga centro de la simulación ajustada y se adaptan perfectamente a los valores recogidos del ensayo. El valor del módulo elástico para la zona centro es ligeramente inferior (200.000 MPa frente 207.000MPa) y de ahí que se desplace ligeramente a los valores de simulación iniciales. De la galga lado se muestran los valores de la simulación ajustada en rojo y de la misma manera se ajustan sobreponiéndose a la curva de los

valores recogidos en el ensayo (curva amarilla). En este segundo caso el módulo elástico se diferencia más del teórico pasando a 230.000 MPa.

La probeta 3 se comporta de manera similar presentando una pendiente más acusada en la galga lado pero en el caso de la galga centro los valores están por debajo de la simulación inicial. De igual forma que en el caso anterior se modifican de forma iterativa los valores del módulo elástico hasta los valores de $E_{\text{probeta}}=250.000\text{MPa}$ y $E_{\text{central}}=190.000\text{MPa}$ quedando los resultados siguientes:

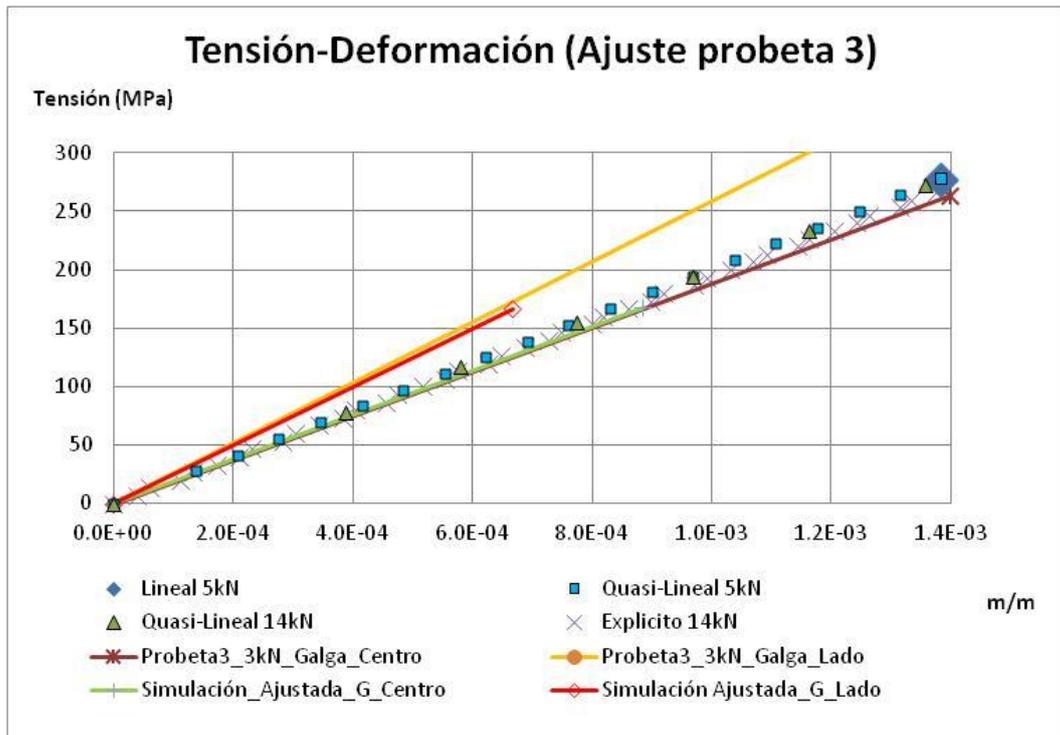


Figura 76. Combinación valores tensión-deformación de ensayo probeta 2 y ajuste de simulación.

Se puede observar que las curvas ajustadas (verde y roja) se aproximan a las curvas de ensayo (marrón y amarillo) y por tanto, se puede afirmar que los resultados de la simulación ajustada reflejan el comportamiento de las medidas tomadas en la probeta.

A la vista de los resultados, la modificación del modelo y el ajuste del módulo elástico del material han proporcionado unos valores similares entre la simulación y el ensayo. Además han demostrado permitir el ajuste en las condiciones de la probeta 2 y 3. Sin embargo, hay que resaltar que los ensayos se han utilizado probetas normalizadas y la diferenciación de materiales se ha realizado entre la zona soldada y zona de material base. Puesto que el interés de los estudios realizados está en trasladar esta metodología a elementos funcionales, queda abierta la realización y validación de este tipo de estudios con otras geometrías y condiciones de trabajo.

5.7. Conclusiones

El proyecto ha utilizado uniones soldadas y unas condiciones de atmosfera corrosiva en presencia de temperatura y tensión mecánica que han servido para desarrollar el procedimiento de ensayo y obtención de datos para simulación. Estas condiciones se pueden y deben variar dependiendo de las características constructivas y del entorno que se quiera simular.

La utilización de distintos tipos de cálculo (lineal, quasi-lineal y explicito) ha servido para explorar las ventajas y desventajas de cada uno a la hora de abordar la simulación, y al mismo tiempo ha permitido comparar la diferencias en los resultados.

Los resultados de la correlación han demostrado que la metodología de predicción de comportamiento en condiciones severas mediante simulación puede ser una herramienta útil en las tareas de cálculo y validación de productos sometidos a estas condiciones.

6. Elementos innovadores

La realización del proyecto permite a AIDIMME desarrollar una metodología basada en modelos numéricos adaptados, para evaluar el comportamiento resistente de ciertas aleaciones en zonas soldadas frente al efecto de la fragilización del hidrógeno en condiciones desfavorables, reproduciendo su comportamiento en un entorno de simulación que sirva para el desarrollo y validación de productos más optimizados y seguros para entornos de trabajo exigentes.

Mediante el desarrollo de los procedimientos de ensayo y la utilización de la infraestructura de captura de datos se potencian las capacidades técnicas de resolver los problemas planteados en las industrias que involucran este tipo de productos, posibilitando la captación de resultados que posibiliten el análisis y correlación de los mismos con los valores de simulación

Así pues, el conocimiento y las metodologías que se estudian se ponen a disposición de las empresas de sectores especializados en productos de altas prestaciones para resolver problemáticas en conducciones de uso de fluidos, intercambiadores de temperatura (radiadores), reactores químicos, silenciadores, catalizadores, etc., y así conseguir una mejora de sus productos, reduciendo posibles roturas, y derivando en la reducción de los costes y plazos para su puesta en servicio, maximizando la probabilidad de éxito del diseño inicial.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Technical Committee of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, *STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION*, 8th Edition ed., Tarrytown, New York: TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION, INC., 1999.
- [2] «HIDROTERM,» [En línea]. Available: <https://www.hidroterm.com.ve/intercambiadordecalor2.htm>. [Último acceso: 26 Nov 2020].
- [3] «MATWEB - Material Property Data,» [En línea]. Available: <http://www.matweb.com/search/MaterialGroupSearch.aspx>. [Último acceso: 2020].
- [4] «PARRINST,» [En línea]. Available: <https://www.parrinst.com/es/products/stirred-reactors/options-accessories/materials-of-construction/>. [Último acceso: 2020].
- [5] Key to Metals AG, «Total Material,» 2020.
- [6] Haynes Internacional, «Website Haynes Internacional,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.haynesintl.com/>.
- [7] Special Metals Company, «Website Special Metals Company,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.specialmetals.com/>.
- [8] P. Ganesan, C. Renteria y J. Crum, «Versatile Corrosion Resistance of INCONEL™ alloy 625 in Various Aqueous and Chemical Processing Environments,» de *Superalloys 718,625 and Various Derivatives*, The Minerals, Metals & Materials Society, 1991.
- [9] D. M. a. R. L. H. Kim, «Stress Corrosion Cracking of Alloy 625 in pH 2 Aqueous Solution at High Temperature and Pressure,» *CORROSION — MARCH 2011*, vol. 67, nº 3, p. 8, 2011.
- [10] V. B. M. Vinoth Kumar, «Hot tensile properties and constant load stress corrosion cracking test data of autogenous weld joints of super 304HCu stainless steel in boiling MgCl₂ solution,» 2018. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.002>.
- [11] A. Committe, «Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens,» *ASTM Internacional*, nº G39-99, p. 8, 2016.
- [12] «<https://www.hidroterm.com.ve/intercambiadordecalor2.htm>,» [En línea]. [Último acceso: 26 Nov 2020].