

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

***GEMELO DIGITAL DE UNA ESTRUCTURA  
ANÁLOGA A LA BANCADA DE UNA PRENSA  
PARA LA PREDICCIÓN DE SU VIDA ÚTIL  
REMANENTE A FATIGA***

**Estudiante**  
**Director**  
**Departamento**  
**Curso académico**

*Amilleta Urkiri, Iñaki*  
*Arrizubieta Arrate, Jon Iñaki*  
*Ingeniería Mecánica*  
*2020 - 2021*

*Bilbao, 22 de septiembre del 2021*



## Resumen

El propósito de este Trabajo Fin de Máster es desarrollar y demostrar la validez de un gemelo digital para la predicción de la vida útil remanente de una estructura análoga a la bancada de una prensa, cuyo modo de fallo es la iniciación y propagación de grietas ocasionadas por la fatiga. Para ello, en primer lugar, se diseña y optimiza la estructura simplificada de modo que su geometría y modo de fallo sean representativas de la prensa real, y a su vez, sea ensayable con los medios disponibles. También se propone una sensorización para la monitorización de la estructura, que permitirá alimentar al gemelo digital.

En cuanto a las metodologías implementadas, la fase de iniciación de grieta se calcula siguiendo los estándares "DNVGL-ST-0361" [1] y "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [2] de la IIW (International Institute of Welding), mediante la acumulación de daño por Palmgren-Miner. Asimismo, la propagación de fisura se estima de acuerdo con las directrices de la norma BS 7910:2013+A1:2015 [3] sobre métodos para evaluar la admisibilidad de grietas en estructuras metálicas, mediante la integración de la ley de Paris, partiendo de una grieta inicial postulada hasta la fractura predicha en base al Diagrama de Evaluación de Fallos.

Por su parte, el gemelo digital, implementado en lenguaje Python, realiza predicciones considerando especialmente las uniones soldadas críticas de la estructura. Este, consta de tres módulos principales:

- 1) Sensorización virtual para la estimación de tensiones en zonas críticas partiendo de deformaciones de puntos remotos.
- 2) Módulo de iniciación para calcular el tiempo hasta la aparición de una fisura en los puntos críticos de las soldaduras previamente especificadas, es decir, la vida de iniciación.
- 3) Módulo de propagación para la predicción de la vida remanente de la estructura hasta la fractura, mediante el cálculo de la propagación de las potenciales grietas.

Finalmente, se realizan una serie de simulaciones que contemplan diversos escenarios de actualización de tamaño de grieta por parte del usuario/a, incertidumbre de las medidas experimentales, etcétera, con el propósito de demostrar la validez del gemelo digital.

**Palabras clave:** fatiga, gemelo digital, propagación de grieta, predicción de vida, sensorización virtual, Diagrama de Evaluación de Fallos.

## Laburpena

Master Amaierako Lan honen asmoa, prentsa baten bankadaren egitura analogo baten gainerako bizitza erabilgarriaren aurreikuspenarako biki digital bat garatzea eta bere baliotasuna frogatzea da, zeinaren hutsegite era nekeak eragindako arrakalen hasiera eta hedapena den. Horretarako, lehenik eta behin, egitura sinplifikatua diseinatzen eta optimizatzen da bere geometria eta huts egiteko modua benetako prentsaren adierazgarri izan daitezen, eta, aldi berean, eskura dauden baliabideekin entseguak egin ahal izan daitezen. Egitura monitorizatzeko sentsorizazio bat ere proposatzen da, biki digitala elikatuko duena.

Ezarritako metodologiei dagokienez, pitzaduraren hastapen-fasea IIW-ren (International Institute of Welding) "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [2] eta "DNVGL-ST-0361" [1] estandarren arabera kalkulatzeko da, Palmgren-Minerren min metatzearen bidez. Era berean, pitzaduren hedapena metalezko egituretan arrakalen onargarritasuna ebaluatzeko metodoei buruzko BS 7910:2013+A1:2015 [3] arauaren jarraibideen arabera kalkulatzeko da, Parisen legea integratuz, hasieran ezarritako pitzadura batetik abiatuta, Akats Ebaluazio Diagraman oinarrituta aurreikusitako hausturaraino.

Bere aldetik, biki digitalak, Python lengoia inplementatua, aurreikuspenak egiten ditu, bereziki egituraren lotura soldatu kritikoak kontuan hartuz. Honek, hiru modulu nagusi ditu:

- 1) Sentsorizazio birtuala, gune kritikoetako tentsioak estimatzeko, urrutiko puntuen deformazioetatik abiatuta.
- 2) Hasierako modulua, aurrez zehaztutako soldaduren puntu kritikoetan pitzadura agertu arteko denbora kalkulatzeko, hau da, hastapeneko bizitza.
- 3) Hedapen modulua, hausturara arte egituraren gainerako bizitza erabilgarriaren aurreikuspenarako, pitzadura potentzialen hedapena kalkulatzeko.

Azkenik, simulazio multzo bat egiten da, erabiltzaileak arrakalen tamaina eguneratzean, neurri esperimentalen ziurgabetasunean eta abarretan hainbat egoera kontuan hartuta, biki digitalaren baliozkotasuna frogatzeko helburuarekin.

**Hitz gakoak:** neke, biki digital, arrakala hedapen, bizitza aurreikuspen, sentsorizazio birtual, Akats Ebaluazio Diagrama.

## Abstract

The purpose of this Master's Thesis is to develop and demonstrate the validity of a digital twin for the prediction of the remaining useful life of a structure analogous to the bed of a press, whose failure mode is the initiation and propagation of cracks caused by fatigue. To this end, firstly, the simplified structure is designed and optimised so that its geometry and failure mode are representative of the real press and, in turn, can be tested with the means available. A sensor system is also proposed for monitoring the structure, which will allow the digital twin to be fed.

Regarding the methodologies implemented, the crack initiation phase is calculated following the standards "DNVGL-ST-0361" [1] and "Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [2] by the IIW (International Institute of Welding), by means of the Palmgren-Miner damage accumulation. Likewise, crack propagation is estimated according to the guidelines of BS 7910:2013+A1:2015 [3] about methods for assessing the admissibility of cracks in metallic structures, by integrating the Paris law, starting from a postulated initial crack up to the predicted fracture based on the Failure Assessment Diagram.

On its part, the digital twin, implemented in Python language, performs predictions considering especially the critical welded joints of the structure. It consists of three main modules:

- 1) Virtual sensing for the estimation of stresses in critical areas based on deformations of remote points.
- 2) Initiation module to calculate the time to crack appearance at critical points of previously specified welds, i.e. the initiation life.
- 3) Propagation module for the prediction of the remaining life of the structure until fracture, by calculating the propagation of potential cracks.

Finally, a series of simulations are carried out that consider different scenarios of crack size update by the user, uncertainty of the experimental measurements, etc., with the purpose of demonstrating the validity of the digital twin.

**Keywords:** fatigue, digital twin, crack propagation, life prediction, virtual sensing, Failure Assessment Diagram.

## Gemelo digital de una estructura análoga a la bancada de una prensa para la predicción de su vida útil remanente a fatiga

# ÍNDICE

---

<b>Resumen</b> .....	<b>i</b>
<b>Índice</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de ilustraciones</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de acrónimos</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Contexto</b> .....	<b>3</b>
2.1 La empresa .....	3
2.2 Campo de estudio. Bienes de equipo en servicio: prensas de gran tonelaje .....	6
2.2.1 <i>Monitorización de la Salud Estructural</i> .....	7
2.2.2 <i>Prensas de gran tonelaje</i> .....	7
2.3 Gemelos digitales y el proyecto Miraged .....	9
<b>3. Objetivos y alcance del trabajo</b> .....	<b>11</b>
3.1 Objetivos.....	11
3.2 Objeto de estudio .....	11
3.3 Alcance .....	12
3.3.1 <i>Implementación del gemelo digital</i> .....	12
3.3.2 <i>Demostración del gemelo digital</i> .....	13
<b>4. Beneficios que aporta el trabajo</b> .....	<b>14</b>
<b>5. Análisis del estado del arte</b> .....	<b>15</b>
5.1 Gemelos Digitales.....	15
5.2 Estrategias de predicción de vida a fatiga .....	15
5.2.1 <i>Iniciación</i> .....	16
5.2.3 <i>Propagación</i> .....	26
5.3 Sensorización Virtual .....	33
5.3.1 <i>Relación lineal</i> .....	34
5.3.2 <i>Relación múltiple</i> .....	35
5.3.3 <i>Relación lineal con incertidumbre</i> .....	36
5.3.4 <i>Kalman estático</i> .....	36
5.3.5 <i>Modelo dinámico</i> .....	37
<b>6. Análisis de riesgos</b> .....	<b>38</b>
6.1 Gestión.....	38
6.2 Experimentales.....	39
6.3 Grado de satisfacción de los resultados .....	39
<b>7. Metodología</b> .....	<b>41</b>

---

7.1 Descripción de fases y tareas .....	41
7.2 Diagrama de Gantt .....	45
7.3 Diseño del demostrador .....	46
7.3.1 Optimización del diseño .....	46
7.3.2 Sensorización.....	61
7.4 Desarrollo e implementación del gemelo digital .....	71
7.4.1 Estructura .....	71
7.4.2 Descripción y funcionamiento de los módulos.....	73
7.5 Demostración del gemelo digital.....	79
7.5.1 Escenario A .....	80
7.5.2 Escenario B.....	80
7.5.3 Escenario C.....	81
7.6 Resultados .....	82
7.6.1 Demo del gemelo digital.....	82
7.6.2 Análisis de los resultados .....	86
<b>8. Memoria económica .....</b>	<b>104</b>
8.1 Recursos Humanos.....	104
8.2 Amortizaciones.....	104
8.3 Recursos materiales .....	105
8.4 Subcontrataciones.....	105
8.5 Gastos indirectos .....	106
8.6 Presupuesto total .....	106
<b>9. Conclusiones .....</b>	<b>107</b>
<b>10. Bibliografía .....</b>	<b>110</b>
<b>Anexo I. Planos del demostrador.....</b>	<b>113</b>
<b>Anexo II. Procedimiento de cálculo de la curva S-N sintética.....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE TABLAS

---

Tabla 1. Propiedades del acero estructural S275 .....	12
Tabla 2. Resistencias a la fatiga según detalle contra las tensiones estructurales en los HS .....	22
Tabla 3. Input para la elaboración de S-N sintética .....	24
Tabla 4. Parámetros para el trazado de la S-N sintética .....	24
Tabla 5. Leyes de crecimiento de grietas por fatiga recomendadas para aceros en el aire .....	33
Tabla 6. Modelo inicial. Ejemplo de cálculo de vida a iniciación para el cordón 31 .....	51
Tabla 7. Parámetros de entrada para S-N sintética .....	52
Tabla 8. Modelo inicial. Ejemplo de cálculo de vida a iniciación del apoyo .....	53
Tabla 9. Modelo inicial. Vidas de iniciación .....	54
Tabla 10. Modificaciones estructurales en optimización 1 .....	54
Tabla 11. Modelo final optimización 1. Vidas de iniciación .....	55
Tabla 12. Modelo inicial optimización 2. Vidas de iniciación .....	56
Tabla 13. Evolución de optimización 2 .....	57
Tabla 14. Modificaciones estructurales en optimización 2 .....	57
Tabla 15. Modelo final optimización 2. Vidas de iniciación .....	58
Tabla 16. Especificaciones de la galga RDS 17.8 .....	65
Tabla 17. Especificaciones de la galga RDS 20 .....	67
Tabla 18. Gastos del personal .....	104
Tabla 19. Amortizaciones .....	105
Tabla 20. Recursos materiales. ....	105
Tabla 21. Presupuesto total .....	106

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Logotipo de IKERLAN, S. Coop. ....	3
Ilustración 2. Logotipos de la Corporación MONDRAGÓN y Basque Research and Technology Alliance .....	4
Ilustración 3. Distribución de ingresos de IKERLAN. Fuente: [5] .....	4
Ilustración 4. Ejemplos de prensas reales. Fuentes: [6] .....	8
Ilustración 5. Ejemplo de una bancada de prensa real. Fuente: [6] .....	8
Ilustración 6. Prediseño conceptual de la bancada de prensa simplificada.....	12
Ilustración 7. Posibles ubicaciones de grietas en una junta cruciforme con soldaduras en esquina que soportan carga .....	17
Ilustración 8. Ejemplos de grieta en el pie (izq.) o en la raíz (dcha.) de la soldadura .....	17
Ilustración 9. Definición de la tensión estructural de "Hot-Spot" .....	18
Ilustración 10. Ejemplos de detalles estructurales y sus distribuciones tensionales .....	18
Ilustración 11. Tensión de HS ( $\sigma_{hs}$ ) en pies de soldaduras en estado de tensión plana... ..	19
Ilustración 12. Tipos de Hot-Spot .....	19
Ilustración 13. Ejemplo de historial de carga y contaje de ciclos. Fuente: [19] .....	20
Ilustración 14. Ejemplo de un contaje de ciclos mediante el método "rainflow" .....	21
Ilustración 15. Curvas S-N de resistencia a la fatiga para acero y cargas de amplitud variable, modificadas para la suma de Palmgren-Miner.....	21
Ilustración 16. Representación gráfica de la S-N sintética .....	24
Ilustración 17. Diagrama de Haigh.....	25
Ilustración 18. Esquema del cálculo de vida a propagación .....	26
Ilustración 19. Ejemplo de un diagrama de evaluación de fallos (FAD) .....	27
Ilustración 20. Definiciones de dimensiones de grietas.....	28
Ilustración 21. Linealización de tensiones y rangos de tensiones .....	29
Ilustración 22. Ilustración esquemática de la ley de crecimiento de grieta.....	32
Ilustración 23. Matriz de probabilidad e impacto. Fuente: PMI 2017 .....	38
Ilustración 24. Diagrama de Gantt .....	45
Ilustración 25. Modelo FEM simplificado del diseño inicial .....	47
Ilustración 26. Diseño inicial. Tensión equivalente de Von-Mises [MPa] .....	48
Ilustración 27. Diseño inicial. Ubicación de zona crítica deseada (izq.) y potenciales zonas críticas (dcha.) .....	48
Ilustración 28. Tensiones en los puntos necesarios para el cálculo de las tensiones de HS en la unión del travesaño central con el lateral .....	49
Ilustración 29. Ejemplo del resultado del postprocesado de MatLab .....	50
Ilustración 30. Identificación de los pies de soldadura de la estructura.....	50
Ilustración 31. Curva S-N sintética para acero estructural S-275.....	53
Ilustración 32. Modelo final de la optimización 1 .....	55
Ilustración 33. Modelo final optimización 1. Potenciales zonas críticas.....	55
Ilustración 34. Modelo final de la optimización 2.....	58
Ilustración 35. Modelo final optimización 2. Potenciales zonas críticas.....	58
Ilustración 36. Diseño final de los apoyos .....	59
Ilustración 37. Modelo final de la estructura .....	60
Ilustración 38. Imágenes del demostrador real fabricado .....	60
Ilustración 39. Sistema CompactRIO de ©National Instruments .....	61
Ilustración 40. Modelo final. Tensión normal en X en MPa (estructura deformada x58)62	62
Ilustración 41. Ubicación de las galgas extensiométricas.....	62
Ilustración 42. Especificaciones de las galgas FLA-2-23-5LT .....	63
Ilustración 43. Circuito de puente de Wheatstone .....	63
Ilustración 44. Tarjeta NI 9235.....	64
Ilustración 45. Galga de propagación de grietas RDS 17.8.....	65

Ilustración 46. Circuito adicional para la galga RDS 17.8.....	66
Ilustración 47. Output de la adquisición de datos de la galga RDS 17.8.....	66
Ilustración 48. Galga de propagación de grietas RDS 20.....	67
Ilustración 49. Conexiones de las galgas RDS 20.....	68
Ilustración 50. Tensiones de salida para 7, 4 y 2 resistencias.....	68
Ilustración 51. Ubicación del punto crítico de la estructura.....	69
Ilustración 52. Colocación de las galgas de propagación.....	70
Ilustración 53. Tarjeta NI 9215.....	70
Ilustración 54. Estructura general del gemelo digital.....	72
Ilustración 55. Pies críticos y no críticos de la estructura.....	73
Ilustración 56. Diagrama del GD para pies críticos.....	74
Ilustración 57. Tensiones necesarias para cálculo de iniciación de la soldadura 1.....	75
Ilustración 58. Fase de propagación 1.1: grieta semielíptica.....	76
Ilustración 59. Fase de propagación 1.2: grieta en esquina.....	76
Ilustración 60. Fase de propagación 1.3: grieta de lado a lado en esquina.....	77
Ilustración 61. Fase de propagación 2: grieta de lado a lado en esquina.....	77
Ilustración 62. Fase de propagación 1.4: grieta de lado a lado no en esquina.....	77
Ilustración 63. Diagrama del GD para pies no críticos.....	79
Ilustración 64. Señal de deformaciones ideal vs. con ruido (15%) de una galga a 150 kN de carga.....	80
Ilustración 65. Señal de deformaciones ideal vs. con ruido (15%, 30 % y 45 %) de una galga a 150 kN de carga.....	81
Ilustración 66. Estructura de directorios y archivos del gemelo digital.....	82
Ilustración 67. Ejemplo de diagrama de evaluación de fallos resultado.....	84
Ilustración 68. Ejemplo de predicción de propagación.....	84
Ilustración 69. Ejemplo de tabla resumen de los resultados en cada iteración.....	85
Ilustración 70. Escenario A. Predicciones de vida remanente y vida total a fatiga.....	87
Ilustración 71. Escenario A. Nomenclatura de dimensiones de grieta para el análisis de resultados.....	89
Ilustración 72. Escenario A. Velocidad de propagación de la grieta 11, Iteración 1.....	89
Ilustración 73. Escenario A. Tamaño de grieta 11, Iteración 1.....	90
Ilustración 74. Escenario A. Velocidad de propagación de a.....	91
Ilustración 75. Escenario A. Velocidad de propagación de c.....	91
Ilustración 76. Escenario A. Velocidad de propagación de c. Ciclos iniciales.....	91
Ilustración 77. Escenario A. Velocidad de propagación de c.....	91
Ilustración 78. Escenario A. Tamaño de grieta, c.....	92
Ilustración 79. Escenario A. Tamaño de grieta, a.....	92
Ilustración 80. Escenario A. Daño de iniciación acumulado.....	92
Ilustración 81. Escenario A. Daño acumulado total.....	92
Ilustración 82. Escenario A. FAD Iteración 1.....	93
Ilustración 83. Escenario A. FAD Iteración 40.....	93
Ilustración 84. Escenario A. FAD Iteración 69.....	94
Ilustración 85. Escenario A. FAD Iteración final.....	94
Ilustración 86. Escenario B. Predicción de vida total.....	95
Ilustración 87. Escenario B. Daño de iniciación acumulado.....	95
Ilustración 88. Escenario B. Grieta 2. Tamaño de grieta, c.....	97
Ilustración 89. Escenario B. Grieta 2. Tamaño grieta, a.....	97
Ilustración 90. Escenario B. Grieta 2. Velocidad de propagación, c.....	97
Ilustración 91. Escenario B. Grieta 2. Velocidad de propagación, c.....	97
Ilustración 92. Escenario B. Grieta 2. Daño total acumulado.....	97
Ilustración 93. Escenario B. Grieta 2, FAD iteración 1.....	98
Ilustración 94. Escenario B. Grieta 2, FAD ciclo 432.000, iteración 120.....	98
Ilustración 95. Escenario B. Grieta 2, FAD ciclo 558.000, iteración 155.....	98

Ilustración 96. Escenario B. Grieta 2, FAD iteración final .....	98
Ilustración 97. Escenario B. Grieta 3. Tamaño de grieta, c .....	99
Ilustración 98. Escenario B. Grieta 3. Tamaño de grieta, a .....	99
Ilustración 99. Escenario B. Grieta 3. Velocidad de propagación, c .....	99
Ilustración 100. Escenario B. Grieta 3. Velocidad de propagación, c .....	99
Ilustración 101. Escenario B. Grieta 3. Daño total acumulado .....	100
Ilustración 102. Escenario B. Grieta 3, FAD ciclo 144.000, iteración 40.....	101
Ilustración 103. Escenario B. Grieta 3, FAD ciclo 180.000, iteración 50.....	101
Ilustración 104. Escenario B. Grieta 3, FAD ciclo 360.000, iteración 100.....	101
Ilustración 105. Escenario B. Grieta 3, FAD iteración final.....	101
Ilustración 106. Escenario C. Tamaño de grieta, c .....	102
Ilustración 107. Escenario C. Tamaño de grieta, a .....	102
Ilustración 108. Escenario C. Velocidad de propagación, c .....	103
Ilustración 109. Escenario C. Velocidad de propagación, a .....	103

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

- BRTA: Basque Research and Technology Alliance
- SHM: Structural Health Monitoring (Monitorización de la Salud Estructural)
- GD: Gemelo Digital
- CDTI: Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial
- PMI: Project Management Institute
- IIW: International Institute of Welding
- AWS: American Welding Society
- HS: Hot-Spot
- FAD: Failure Assessment Diagram (diagrama de evaluación de fallos)
- FAL: Failure Assessment Line (línea de evaluación del fallo)
- SIF: Stress Intensity Factor (factor de intensidad de tensiones)
- FEM: Finite Element Method (método de elementos finitos)

## Gemelo digital de una estructura análoga a la bancada de una prensa para la predicción de su vida útil remanente a fatiga

# 1. INTRODUCCIÓN

---

La fatiga de los materiales es un proceso de daño que se produce en los elementos mecánicos cuando se someten a cargas variables, incluso aunque estas sean varias veces inferiores a las que producirían la rotura ante una carga constante. Puede definirse como un proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que se produce en algún punto del material sujeto a condiciones que producen tensiones y deformaciones fluctuantes y que puede terminar en la aparición de grietas y la fractura completa después de un número suficiente de ciclos. Se pueden encontrar ejemplos de fallo por fatiga en multitud de sistemas mecánicos. Desde los ferrocarriles hasta los aviones, pasando por los automóviles, barcos o muy diversos tipos de máquinas empleadas en la industria o la agricultura como, por ejemplo, las prensas. Con el fin de optimizar el uso de estos sistemas, poder contar con una predicción certera de su vida a fatiga, es indispensable para programar planes adecuados de inspección y mantenimiento, tanto antes como después de generarse dichos defectos durante el servicio. Una idea de la importancia del fenómeno nos la da el hecho de que aproximadamente tres de cada cuatro fallos mecánicos producidos en las máquinas y vehículos de distinto tipo son debidos a la fatiga [4].

Este Trabajo Fin de Máster consiste en desarrollar un Gemelo Digital de una estructura análoga a la bancada de una prensa para la predicción de su vida útil remanente a fatiga. A continuación, se aporta una explicación general de los aspectos más relevantes en el desarrollo de este trabajo, partiendo desde el planteamiento inicial del problema hasta las conclusiones finales.

En primer lugar, se describe el contexto en el que se sitúa este proyecto. Para ello, se expone una breve descripción de la empresa en la cual se ha llevado a cabo el mismo, al mismo tiempo que se enmarca en el ámbito de la Monitorización de la Salud Estructural de los bienes de equipo y los gemelos digitales. Posteriormente, se pasa a detallar el objetivo principal de este trabajo, así como los objetivos parciales o secundarios que se han establecido. Del mismo modo, se presentan el objeto de estudio y el alcance de este trabajo. Luego, se realiza una breve exposición de los beneficios que aporta la realización de este proyecto.

Después, se realiza un detallado análisis sobre el estado del arte que precede a este proyecto, sobre todo en lo relativo a las estrategias y procedimientos propuestos por diversas normas y estándares internacionales sobre fallos en estructuras metálicas a causa de la fatiga. A su vez, este apartado distingue entre las fases de iniciación y propagación de grietas, siendo diferentes las físicas que rigen dichos fenómenos. Asimismo, se estudia el conocimiento existente sobre gemelos digitales para la predicción de vida a fatiga, además de numerosos métodos de sensorización virtual para la deducción de tensiones en puntos inaccesibles para la colocación de sensores.

Más adelante, se realiza un breve análisis de riesgos del proyecto. En él se distinguen por su naturaleza entre riesgos de gestión, experimentales y riesgos en el grado de satisfacción de los resultados.

El próximo apartado constituye el punto central de este documento, donde se describe ampliamente la metodología seguida en el desarrollo del trabajo. Para comenzar, se tratan aspectos de la planificación del proyecto con la descripción de las fases y tareas que lo componen, así como su organización temporal recogida en un diagrama de Gantt. A continuación, en los puntos sucesivos se describe el trabajo realizado en las tres fases principales del proyecto: el diseño del demostrador de la prensa, el desarrollo del gemelo digital y la demostración del mismo. El primero, muestra los procesos de optimización llevados a cabo en la estructura para cumplir los objetivos prefijados, hasta llegar al diseño final de la misma. En la parte del desarrollo del gemelo digital, se describen principalmente su estructura general y el funcionamiento del proceso de cálculo de vida a fatiga. En tercer lugar, se muestra la metodología fijada para la demostración del gemelo digital mediante simulaciones de ensayos de fatiga. Finalmente, se muestra mediante un breve ejemplo del gemelo desarrollado y se analizan los resultados obtenidos con el fin de demostrar la validez del sistema.

Por otra parte, en el siguiente punto del documento, se resume la memoria económica de este proyecto, donde en un presupuesto se desglosan los gastos de este. Antes de finalizar, se elaboran las conclusiones principales del trabajo realizado en este proyecto planteando unas posibles líneas futuras a seguir, y, en el último punto, se enumeran las referencias bibliográficas.

Por último, en los dos anexos del documento se adjuntan por un lado los planos de la estructura diseñada, y por otro, un procedimiento de cálculo detallado al que se le hará mención más adelante en el documento.

## 2. CONTEXTO

---

Este Trabajo de Fin de Máster se ha llevado a cabo como un proyecto de investigación en el marco de una cooperación educativa en forma de prácticas externas en la empresa IKERLAN, S. Coop.

### 2.1 La empresa

IKERLAN es un centro tecnológico dedicado a la transferencia de conocimiento y la aportación de valor competitivo a las empresas. Fue fundada en 1974 con sede en Arrasate (Gipuzkoa), y desde entonces se ha dedicado a la innovación de productos, procesos y servicios de las empresas con las que trabaja. Busca liderar el campo de la I+D+i, gracias a la continua adaptación a las necesidades de sus clientes y la cercanía a la realidad empresarial [5].



*Ilustración 1. Logotipo de IKERLAN, S. Coop.*

La misión de la empresa es solucionar los retos tecnológicos de las empresas, mejorando así su competitividad y contribuyendo al desarrollo económico y social sostenible del entorno. En la misma línea, su visión es la de ser un centro tecnológico y una cooperativa sin ánimo de lucro, reconocido como líder europeo en sus áreas de especialización, que cuenta con un equipo humano excepcional y cohesionado, y que aporta valor a las empresas y la sociedad.

Fiel a su misión, trabaja para desarrollar soluciones que permitan a sus clientes ser cada vez más competitivos. Es una cooperativa miembro de la Corporación Mondragón, y está vinculada al Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Ilustración 2, nacida para atender a los retos industriales de Euskadi y competir con las grandes corporaciones líderes internacionales en investigación y desarrollo de tecnología. Esta alianza constituye la punta de lanza de la investigación vasca en Europa y el resto del mundo [5].

Basque Research and Technology Alliance fue creada a través de un convenio de colaboración entre 16 centros tecnológicos y centros de investigación cooperativa pertenecientes a la Red Vasca de Ciencia, Tecnología e Innovación, el Gobierno Vasco, las Diputaciones Forales de Araba, Bizkaia y Gipuzkoa y el Grupo SPRI.



Ilustración 2. Logotipos de la Corporación MONDRAGÓN y Basque Research and Technology Alliance

Gracias a un modelo de colaboración que combina actividades de transferencia tecnológica, investigación propia y formación de personal altamente especializado, IKERLAN es a día de hoy el partner tecnológico de confianza de varias empresas del país. Asimismo, es un agente acreditado de la Red Vasca de Ciencia, Tecnología e Innovación y cuenta con una red de colaboración integrada por prestigiosos centros y universidades europeos, con los que realiza actividades de investigación y de formación de investigadores, entre ellos la Universidad del País Vasco.

En cifras, IKERLAN está formada por un equipo de 360 personas, de las cuales un 28% son doctores/as. A su vez, son 255 los integrantes que constituyen su plantilla, mientras que el resto, 105 personas, son personal en formación. En cuanto a su posición económica, a lo largo del ejercicio de 2020 IKERLAN obtuvo una facturación total de 23,8 millones de euros. Sus dos fuentes de ingresos principales son por un lado los proyectos de I+D con empresas (10,8 M€), y por otra, la investigación propia (12,3 M€) [5]. Para poder llevar a cabo dichas investigaciones, se financia principalmente de fondos provenientes de diversas administraciones públicas de la Unión Europea, el Gobierno Vasco o la Administración General del Estado (Ilustración 3).

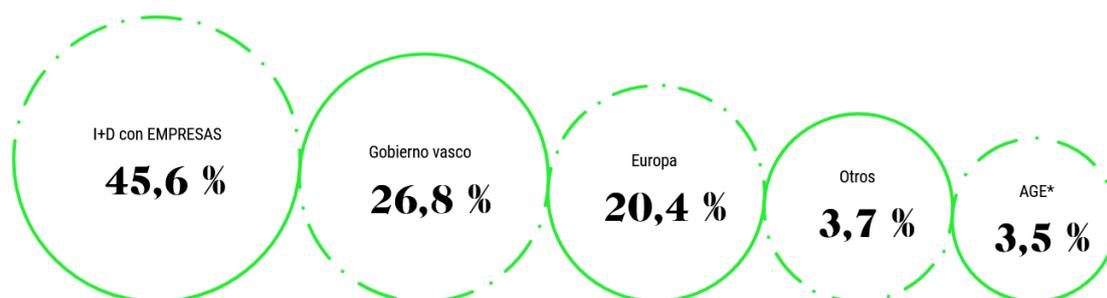


Ilustración 3. Distribución de ingresos de IKERLAN. Fuente: [5]

Para llevar a cabo su objetivo, IKERLAN está estructurada en tres unidades de especialización tecnológica:

- **Tecnologías de electrónica, información y comunicación**

Con un equipo compuesto por más de 150 profesionales, la línea de Tecnologías de Electrónica, Información y Comunicación (TEIC) se dedica al desarrollo de productos electrónicos confiables, conectividad, ciberseguridad industrial y digitalización industrial.

Gracias a su potente equipo y su dominio de la cadena completa de tecnologías TEIC (desde el sensor hasta la nube), ofrece a sus clientes soluciones hardware (HW) y software (SW) integrales para sus productos y servicios.

Esta línea la componen cuatro áreas de especialización:

- Ciberseguridad industrial.
- Sistemas Embebidos Confiables.
- Tecnologías de Información y Comunicación.
- Sistemas HW y de comunicación.

#### ▪ **Energía y electrónica de potencia**

El desarrollo de soluciones eficientes para la integración, el control y el almacenamiento de la energía constituye la razón de ser de la línea de Energía y Electrónica de Potencia. Está especializada en tecnologías de almacenamiento, gestión energética y electrónica de potencia para aplicaciones de e-movilidad (vehículos, transporte ferroviario, aeronáutica, ascensores...) y estacionarias (energías renovables, redes eléctricas...), orientadas siempre a obtener soluciones energéticamente más eficientes, más fiables, más compactas y de menor coste.

A su vez, son dos las áreas en las que se divide esta línea:

- Electrónica de Potencia.
- Almacenamiento y Gestión de Energía.

#### ▪ **Fabricación avanzada**

En esta línea se desarrollan tecnologías clave para la Industria 4.0. Mediante la incorporación e integración de tecnologías de mecánica aplicada y de control inteligente y monitorización, mejoran la fiabilidad durante todo el ciclo de vida del producto, optimizando continuamente el diseño de los productos, los procesos y los servicios asociados a los mismos.

Esta unidad, se estructura en las siguientes áreas:

- Mecánica aplicada.
- Control y Monitorización.

Este proyecto de TFM en concreto, se ha realizado en el equipo de Fiabilidad Estructural perteneciente al área de Mecánica Aplicada, cuyos objetivos son la consecución de una alta fiabilidad y un correcto funcionamiento de los sistemas mecánicos, para lo cual, resulta esencial que su diseño y estructura sean robustos y fiables. Su investigación y las metodologías desarrolladas persiguen dichos objetivos

buscando, a su vez, que estos diseños sean energéticamente eficientes y estén elaborados con los materiales que mejor se adaptan al entorno y a su funcionalidad para las distintas aplicaciones en las que trabajan. Se enumeran a continuación más detalladamente, las tecnologías en las que dicho equipo de Fiabilidad Estructural trabaja:

- Diseño, optimización y validación mediante cálculo de componentes.
- Caracterización experimental de propiedades mecánicas (fallo, fatiga, fractura).
- Desarrollo de métodos de diseño y dimensionamiento de uniones adhesivas.
- Validación de modelos y de estructuras mediante resultados experimentales en prototipos o en campo, aplicando sistemas avanzados de monitorización (emisiones acústicas, DIC, fibra óptica).
- Desarrollo de metodologías para predecir vida a fatiga y probabilidad de fallo.
- Simulación de procesos de fabricación para optimizar procesos y mejorar predicciones de comportamiento a fatiga.
- Desarrollo y validación experimental de sistemas de combustión de gas natural, hidrógeno y biocombustibles.

Una vez expuestos los aspectos más importantes sobre la empresa donde se ha llevado a cabo este proyecto, se pasa a poner en contexto el tema sobre el cual trata, explicando resumidamente su campo de estudio. Tal y como se ha mencionado en la introducción, la estructura de la cual se desea elaborar un gemelo digital es la bancada de una prensa de gran tonelaje, con el objetivo de monitorizar su salud.

## 2.2 Campo de estudio. Bienes de equipo en servicio: prensas de gran tonelaje

Los bienes de equipo son todos aquellos aparatos de naturaleza técnica que se utilizan reiteradamente en el proceso productivo de cualquier actividad industrial. Tienen una influencia directa en la cantidad y la calidad de los productos y/o servicios que una empresa ofrece a sus clientes, en la capacidad productiva de sus instalaciones, en la seguridad de los trabajadores, etcétera. Por otro lado, la elección de los bienes de equipo compromete a la empresa en el largo plazo, debido a la elevada inversión que suponen. Un óptimo uso de estos bienes se traduce en numerosos beneficios para la empresa tales como la reducción de costes de producción y logística, el aumento de la calidad de los productos, las reducciones en los tiempos de fabricación y la consiguiente mejora de la eficiencia, una mayor flexibilidad en el proceso productivo o la posibilidad de ofrecer una mayor variedad de productos. Por todo ello, resulta de suma importancia contar con óptimos planes de mantenimiento para poder garantizar la integridad y fiabilidad de estos sistemas.

El mantenimiento engloba todas las acciones que la empresa debe acometer para que los aparatos de naturaleza técnica que intervienen en su sistema productivo tengan un funcionamiento correcto. Su objetivo es prevenir y/o corregir el desgaste sufrido por el uso de todas las máquinas e instalaciones. Dentro de esta rama de la ingeniería, en relación a este proyecto destaca el concepto de mantenimiento preventivo, que consiste en la realización de controles periódicos de los sistemas y equipamientos, antes de que estos sufran averías, anticipando la aparición de las mismas.

### **2.2.1 Monitorización de la Salud Estructural**

En consonancia con esta filosofía de la prevención, se encuentra la llamada Monitorización de la Salud Estructural ("Structural Health Monitoring", SHM). Consiste en la observación y el análisis de un sistema a lo largo del tiempo mediante mediciones de respuesta muestreadas periódicamente, para monitorizar los cambios en las propiedades materiales y geométricas de las estructuras de ingeniería, tales como puentes y edificios.

En el caso de la SHM a medio-largo plazo, el resultado de este proceso es la actualización periódica de la información relativa a la capacidad de la estructura para realizar su función prevista, a la luz del inevitable envejecimiento y la degradación resultante de los entornos operativos, con el objetivo de proporcionar, casi en tiempo real, información fiable sobre su integridad.

El proceso de SHM implica la selección de los métodos de excitación, los tipos de sensores, el número y la ubicación de los mismos, y el hardware de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos, comúnmente llamados sistemas de monitorización de la salud y el uso. Las mediciones pueden realizarse para detectar directamente cualquier degradación o daño que pueda sufrir un sistema, o indirectamente, midiendo el tamaño y la frecuencia de las cargas experimentadas para permitir predecir el estado del sistema.

En el caso de este Trabajo Fin de Máster, se desea como se ha mencionado desarrollar un gemelo digital capaz de monitorizar la salud de la bancada de una prensa, prediciendo su vida útil remanente bajo cargas de fatiga.

### **2.2.2 Prensas de gran tonelaje**

Una prensa es aquella máquina destinada a la producción industrial de innumerables componentes, por medio de la generación de una gran cantidad de energía en forma de fuerza y aplicada de manera controlada. Las prensas de gran tonelaje se utilizan para la deformación de piezas a alta presión, frecuentemente en operaciones tales como la embutición, troquelado, punzado, prensado, estampado, ensamblado, corte, forjado, etc. en la fabricación de componentes generalmente metálicos (bronce, acero, cobre, aluminio, ...) para diferentes sectores industriales (Ilustración 4).



Ilustración 4. Ejemplos de prensas reales. Fuentes: [6]

En dichas operaciones, teniendo en cuenta su naturaleza y su objetivo de producción en masa, las cargas aplicadas suelen ser cíclicas y repetitivas al mismo tiempo que de grandes magnitudes. En consecuencia, dichos procesos generan sollicitaciones de fatiga en varias partes estructurales de las prensas, propiciando la iniciación y la propagación de grietas, y, en última instancia, condicionando la integridad y la vida útil del activo en cuestión. Uno de estos elementos estructurales que más castigado se ve por dichas cargas, es precisamente la bancada de la prensa (Ilustración 5), también llamada cama, encargada de absorber y transmitir la carga aplicada a la base sobre la cual se asienta la prensa, normalmente el suelo.

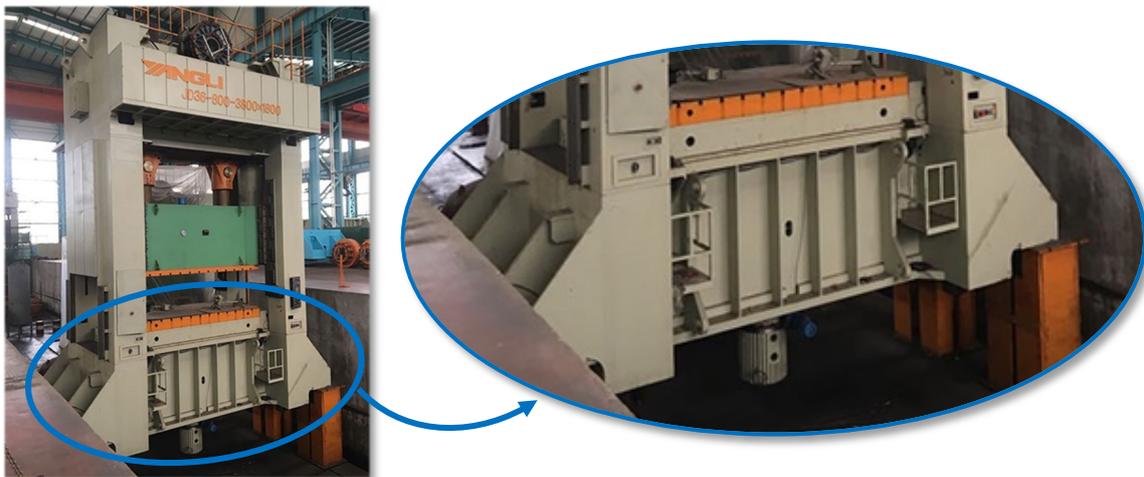


Ilustración 5. Ejemplo de una bancada de prensa real. Fuente: [6]

En relación con la Monitorización de la Salud Estructural y con el fin de optimizar el uso de dichas prensas, poder contar con una predicción certera de la vida a fatiga de la estructura, es indispensable para poder programar planes adecuados de inspección y mantenimiento, tanto antes como después de generarse dichos defectos durante el servicio. Para llevar a cabo esta tarea, pueden jugar un papel protagonista los gemelos digitales.

## 2.3 Gemelos digitales y el proyecto Miraged

Un Gemelo Digital (GD) es una réplica virtual de un sistema (como una turbina de un avión, un aerogenerador, la estructura de una máquina, o como en el caso de este proyecto, la bancada de una prensa) al que se le incorporan datos en tiempo real captados a través de diversos sensores. La combinación entre un modelo que representa la física del sistema y los datos que particularizan la realidad específica del sistema monitorizado construyen su “gemelo”. Esta tecnología permite analizar información valiosa sobre parámetros difíciles de medir en un sistema real por su complejidad y su alto coste. Gracias a los gemelos digitales, es posible detectar problemas antes de que ocurran, por lo que se trata de una metodología de gran ayuda a la hora de planificar tareas de mantenimiento evitando paradas inesperadas, construir nuevos escenarios de funcionamiento más eficientes, desarrollar nuevos planes de fabricación o realizar previsiones a futuro [7].

Los gemelos digitales pueden ofrecer datos adicionales gracias a la sensorización virtual, generar datos sintéticos del comportamiento del sistema replicado, determinar el estado del sistema y su vida útil y facilitar la toma de decisiones en la gestión de las máquinas y en los sistemas en base a algoritmos de inteligencia artificial.

En este contexto se desenvuelve el programa Miraged, liderado por el centro tecnológico IKERLAN, para el desarrollo de modelos virtuales y gemelos digitales que permitan mejorar procesos y productos asociados a la industria 4.0. Miraged se enmarca en el programa Ayudas destinadas a Centros Tecnológicos de Excelencia Cervera del 2019, dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación, promovido por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) [8], con el objetivo de fortalecer el papel de los centros tecnológicos de investigación aplicada.

El CDTI es el órgano de la Administración General del Estado que apoya la innovación basada en conocimiento, asesorando y ofreciendo ayudas públicas a la innovación mediante subvenciones o ayudas parcialmente reembolsables. El CDTI también internacionaliza los proyectos empresariales de I+D e innovación de empresas y entidades españolas y gestiona la participación española en los organismos internacionales de I+D+I.

Miraged es un proyecto de creación de una red de excelencia, en el que también participan los centros Ceit, CTC, Ideko e Idonial. El objetivo del proyecto es mejorar la capacitación de los grupos de investigación implicados en el desarrollo de modelos virtuales y gemelos digitales aplicados a sistemas de modelización, simulación y predicción del comportamiento de máquinas y procesos de fabricación. La iniciativa, que concluirá en el 2022, cuenta con un presupuesto total de 3.336.915 € y se orienta a este objetivo mediante el fortalecimiento de las capacidades de los centros tecnológicos a través del trabajo colaborativo y de potenciar su cooperación con las empresas para dar respuesta a los retos de un entorno industria 4.0 [7].

Dentro de la red de trabajo, hay definidas tres actividades técnicas. La primera actividad está orientada al desarrollo de “fábricas virtuales”, desarrollándose modelos para simular el comportamiento de procesos de fabricación, entre los que se incluyen el

conformado en caliente, la soldadura, el mecanizado, el rectificado, el temple por inducción y la inspección no destructiva. Los avances técnicos de la segunda línea de investigación, están orientados a predecir el inicio de un fallo en servicio, a modelos para predecir la propagación de grietas y la vida útil remanente del sistema, y al desarrollo de modelos de comportamiento dinámico. La tercera actividad, se centrará en integrar en los gemelos digitales los modelos desarrollados en las actividades previas.

Adicionalmente, los centros tecnológicos trabajan en la formación de investigadores, en la difusión y diseminación de los resultados, y en iniciativas específicas para impulsar la transferencia tecnológica hacia el sector industrial.

Por parte de IKERLAN, se está trabajando en el desarrollo de nuevos métodos de simulación del proceso de temple por inducción y nuevos modelos de iniciación y propagación de grietas por fatiga. El eje central de este TFM es integrar estos últimos en gemelos digitales de bienes de equipo para monitorizarlos en servicio y estimar su vida útil remanente.

## 3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

---

### 3.1 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es desarrollar y demostrar la validez de un gemelo digital para la predicción de la vida útil remanente de una estructura análoga a la bancada de una prensa, cuyo modo de fallo es la iniciación y la propagación de grietas en fatiga.

Del mismo modo, se han establecido varios objetivos parciales a lo largo del proyecto, de forma que el cumplimiento de estos culmine en la consecución del objetivo principal. A continuación, se detalla un objetivo por cada fase del proyecto:

- ✓ Diseñar una estructura simplificada representativa de la bancada de la prensa real que sea ensayable mediante los medios disponibles. Para ello se han de tener en consideración tanto las características de la prensa real (geometría, cargas aplicadas, modo de fallo, ..), como la viabilidad de los ensayos marcada por su duración y las limitaciones del banco de ensayos. En este sentido, se marca como objetivo que la vida a iniciación de la estructura diseñada sea de en torno a un día.
- ✓ Desarrollar un gemelo digital capaz de estimar la vida a fatiga remanente de la estructura diseñada, considerando las fases de iniciación y propagación de grietas en las zonas críticas de la misma.
- ✓ Demostrar el correcto funcionamiento del gemelo digital y la verosimilitud de los resultados obtenidos por este, contrastándolos con tendencias en vida y otras variables intermedias, como el daño acumulado o la longitud de grieta, que se esperan.

### 3.2 Objeto de estudio

Como caso de estudio se considera una estructura simplificada representativa de una bancada de prensa real, concebida a una escala aproximada de 1:10, donde el modo de fallo principal es la aparición y propagación de grietas en fatiga. Se parte de un prediseño conceptual (Ilustración 6) que habrá que revisar y ajustar a las especificaciones particulares del caso real. La estructura se trata de placas de acero unidas mediante soldaduras. Está formada por dos laterales unidos entre sí mediante tres travesaños inferiores, sobre los que se apoya la mesa de la bancada. Sobre la mesa y de manera centrada se aplica la carga deseada en cada caso, para cuyo soporte por debajo tiene dos nervios dispuestos en forma de cruz.

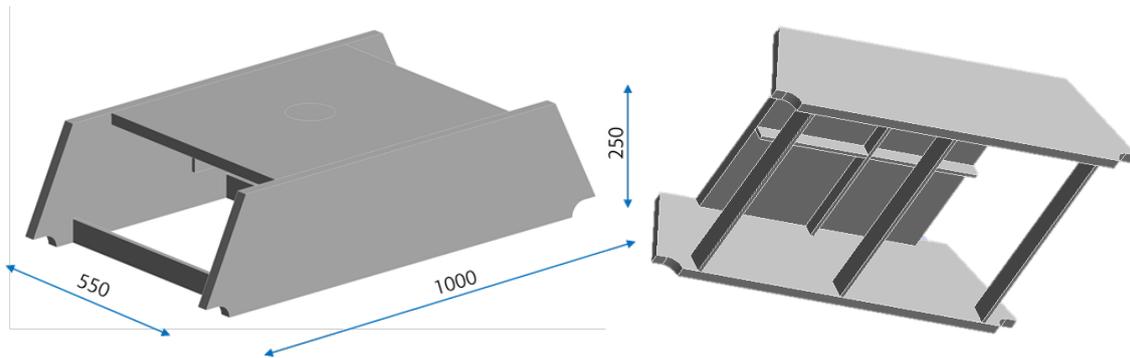


Ilustración 6. Prediseño conceptual de la bancada de prensa simplificada

El material estudiado es el acero estructural S-275, ampliamente empleado en las prensas reales de empresas cliente de IKERLAN. Partiendo de la información obtenida de investigaciones previas a este proyecto, así como de la literatura [9], se cuenta con datos detallados sobre las propiedades de este acero, Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del acero estructural S275

Parámetro		Valor
$R_m$	Resistencia a la tracción	510 MPa
$R_{p0,2}$	Tensión de fluencia	315 MPa
$K_{mat}$	Tenacidad de fractura del material	223,5 MPa·√m

### 3.3 Alcance

El alcance global del proyecto viene delimitado principalmente por el alcance particular tanto del desarrollo e implementación del propio gemelo digital, como de su demostración. Esto marcará la versatilidad que pueda tener el GD y las capacidades que se deben probar en la fase de demostración.

#### 3.3.1 Implementación del gemelo digital

En primer lugar, se ha de considerar la geometría de la estructura. El gemelo digital calculará la vida remanente a fatiga de la estructura en base a un número y localizaciones de potenciales zonas críticas conocidas y preestablecidas. Concretadas las ubicaciones de dichas zonas, el GD deberá ser capaz de determinar los puntos críticos de cada zona, así como de hacer un cálculo independiente para cada uno de ellos. Así, deberá de poder contemplar diferentes estados para cada punto, es decir, si se encuentra todavía en fase de iniciación, o si, por el contrario, existe una grieta que se está propagando. Y, si la hubiere, considerar diferentes geometrías, estados tensionales, tamaños de grieta etcétera, y en consecuencia vidas a fatiga para cada punto crítico.

En cuanto a la carga aplicada, el GD considerará solamente cargas estáticas o cuasiestáticas, en cualquier caso, sin presencia de efectos dinámicos. En concreto, las

cargas a aplicar fluctuarán en términos de máximos y mínimos sucesivos de fuerza, conformando un perfil de carga formado por varios bloques de magnitud variable.

En lo que respecta a la medición de las variables de entrada, el sistema deberá estar preparado para actualizar la geometría y ubicación de cada grieta bajo estudio tantas veces como sean necesarias. Para ello, se diferencian dos posibles variantes del gemelo digital en cuanto al cálculo de la fase de propagación. En la primera y más sencilla, un/una operario/a podrá introducir al sistema medidas reales de cada grieta. En la otra y más completa, el GD además podrá tener monitorizada la propagación de cada grieta mediante la información obtenida mediante unas galgas de propagación debidamente colocadas en la estructura (véase 7.3.2.2 Posición y tamaño de grieta). De cualquier forma, el sistema actualizará periódicamente sus cálculos y predicciones de vida en función del input recibido.

Por último, cabe destacar que, para el funcionamiento del GD, es necesario contar con ciertos valores de referencia de deformaciones en puntos de interés de la estructura, calculados a partir de un análisis estático de un modelo de elementos finitos.

### **3.3.2 Demostración del gemelo digital**

Inicialmente, se planteó que el alcance de esta última fase del proyecto llegara hasta una demostración experimental del GD, mediante varios ensayos de fatiga del demostrador de la bancada diseñado. No obstante, según se ha ido avanzando en la ejecución del proyecto, por motivos de gestión de la planificación, se ha tomado la decisión de reemplazar estos ensayos por una demostración virtual del gemelo. Esta se ha realizado por medio de múltiples simulaciones de ensayos bajo diversos escenarios, donde se crean datos de entrada artificiales equiparables a los que pudieran generarse en un ensayo real.

Por otra parte, tal y como se ha mencionado, es necesario acotar las capacidades que se deben probar por parte del GD. En la demostración llevada a cabo, se consideran un máximo de cuatro puntos críticos predeterminados por la fase de diseño de la estructura. En cuanto a la carga aplicada, esta será administrada en diversos bloques de amplitud y duración variables.

## 4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

---

Este apartado trata sobre los numerosos beneficios que conlleva la realización de este proyecto. Dichos beneficios, aunque de diversa índole, derivan en su mayoría de las ventajas del mantenimiento preventivo dentro del ámbito de la monitorización de la salud estructural ya mencionado.

Como es sabido, el mantenimiento preventivo está basado en la conservación de equipos o instalaciones mediante la realización de revisiones, pequeñas reparaciones o recambios, ajustes, limpieza etc. que garanticen su buen funcionamiento y fiabilidad. El mantenimiento preventivo se realiza en equipos en activo de manera proactiva en pos de disminuir problemas venideros, en oposición al mantenimiento correctivo, que repara o pone en condiciones de funcionamiento aquellos que dejaron de estarlo o se encuentren dañados [10]. El principal objetivo del mantenimiento es evitar o mitigar las consecuencias de los fallos del equipo, logrando prevenir las incidencias antes de que estas ocurran.

Mediante el gemelo digital desarrollado en este proyecto, puede contarse con una estimación de la vida de la bancada de la prensa, sabiendo dónde y cuándo tendrá lugar la aparición de una grieta que puede poner en peligro la integridad de la estructura, así como prediciendo su propagación en tiempo real. De esta manera, se dota de información imprescindible para una óptima toma de decisiones en cuanto a la programación de planes de mantenimiento adecuados para la prensa. Planificando periodos de paralización de trabajo en momentos específicos, donde se inspeccione el equipo y se realicen las acciones de mantenimiento oportunas, se consigue reducir los costes del mantenimiento correctivo. Este mantenimiento de emergencia casi siempre implica reparaciones sustancialmente más costosas, y en el peor de los casos, la sustitución del activo.

Por lo tanto, se logra aumentar la fiabilidad del activo en cuestión. Así, este funcionará correctamente durante más tiempo, alargando su vida útil, al mismo tiempo que permite hacer previsiones más realistas sobre el funcionamiento de la empresa y su capacidad productiva. Cualquier empresa, necesita garantizar la operatividad de sus instalaciones.

Por otro lado, el gemelo digital trae consigo una reducción de los períodos de inactividad indeseados, lo que aumenta el "uptime" y la disponibilidad del equipo, mejorando la eficacia global del mismo. En consecuencia, se obtiene un mayor rendimiento de la inversión realizada en el activo, a la vez que se facilita el cumplimiento de los plazos establecidos por los clientes.

Por último, uno de los aspectos más importantes, el aumento de la seguridad. Empleando el gemelo digital se puede mantener la prensa en condiciones óptimas, ofreciendo más seguridad a todas las personas usuarias que están en contacto con el equipo, sobre todo los/las trabajadores/as.

## 5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

---

### 5.1 Gemelos Digitales

Dentro de la filosofía de “Structural Health Monitoring”, en la actualidad se están desarrollando gemelos digitales para monitorizar la salud estructural de activos en operación [11]. En particular, una amplia rama en la literatura ha considerado la predicción de vida útil remanente de estructuras sometidas a sollicitaciones de fatiga[12], donde los GDs juegan un papel protagonista a la hora de realizar dichas estimaciones, sobre todo, en escenarios que implican incertidumbres en cuanto a sollicitaciones, propiedades de material y modelos [13]. Para la detección y localización del daño, los GDs se basan en la monitorización in situ de diversos parámetros [14] y en la aplicación de ciertos filtros a estas señales, siendo el filtro de Kalman uno de los más empleados [15].

Por lo general, se considera la iniciación de defectos de grieta como modo de fallo, recurriendo a modelos de acumulación de daño como Palmgren-Miner y curvas S-N, combinados con técnicas de análisis de tensiones como el algoritmo de “rainflow” [16]. En este sentido, la literatura existente en la cual se realiza la predicción de vida incluyendo la fase de propagación de grietas, es bastante reducida [17]. En cuanto a la aplicación práctica, la inmensa mayoría de trabajos de la literatura han considerado aerogeneradores y puentes [12]–[14], [18], llegando a validar los gemelos digitales mediante el contraste con mediciones experimentales reales. Esto demuestra el potencial del empleo de los gemelos digitales.

En consecuencia, la casuística que se aborda en este proyecto resulta de especial interés por doble motivo. Por una parte, el gemelo digital que se desea desarrollar es el modelo virtual de una estructura análoga a la bancada de una prensa, estructura para la cual a efectos prácticos actualmente no se encuentran gemelos digitales implementados. Además, que el GD considere la fase de propagación de grieta para los cálculos de vida remanente a fatiga del sistema, es relativamente novedoso.

### 5.2 Estrategias de predicción de vida a fatiga

En este apartado se exponen los procedimientos y conceptos teóricos recopilados de diversas normas y estándares de la literatura, que a lo largo del proyecto se han empleado en los diferentes apartados que abarca el cálculo de la vida remanente a fatiga de una estructura metálica. En concreto, los estándares en los que se ha reparado principalmente han sido los siguientes:

- DNVGL-ST-0361: *Machinery for wind turbines* [1].
- EN 1993-1-9: *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue* [19].
- BS 7910:2013+A1:2015: *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures* [3].

Así, al igual que se ha venido mencionando a lo largo del documento, el cálculo de vida a fatiga consta de dos fases principales: la iniciación del fallo y la propagación de la grieta. Consecuentemente, es necesario calcular la vida remanente del sistema para cada una de estas dos fases, siendo los correspondientes procesos claramente dispares.

### 5.2.1 Iniciación

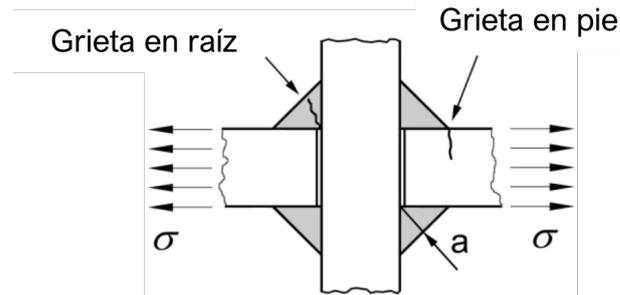
A la hora de calcular la vida a iniciación de fisuras a fatiga, es necesario considerar todos y cada uno de los potenciales puntos críticos de una estructura. En el caso particular de este proyecto, al tratarse de una estructura metálica con uniones soldadas, se debe diferenciar entre dos tipos de zonas críticas, para las cuales la literatura general de cálculo de vida en fatiga recoge métodos de cálculo específicos. Por un lado, habrá que considerar las uniones soldadas entre los diferentes elementos de la estructura, y por otro, el resto de posibles zonas que no estén bajo la influencia de dichos cordones de soldadura.

#### 5.2.1.1 Soldaduras

En este caso, todos los estándares mencionados previamente hacen referencia expresa a la utilización de normas específicas de instituciones especializadas como la "International Institute of Welding" (IIW) o la "American Welding Society" (AWS). Por lo tanto, la literatura empleada para el cálculo de vida en soldaduras ha sido:

- *IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components* [2].
- *IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue* [20].

Las grietas por fatiga se inician en los lugares con alta concentración de tensiones. Se trata de las transiciones relativamente agudas entre el metal base y el metal de soldadura en los extremos del cordón, así como en las raíces de la soldadura, que a menudo se caracterizan por hendiduras agudas con caras de la raíz no fundidas que actúan como iniciadores de grietas.



*Ilustración 7. Posibles ubicaciones de grietas en una junta cruciforme con soldaduras en esquina que soportan carga*

La situación se ilustra a menudo con el ejemplo de una junta cruciforme con soldaduras en ángulo que soportan la carga, véase la Ilustración 7. La cuestión de qué tipo de grieta predomina (en pie o en raíz de soldadura), depende principalmente de la relación entre el espesor de la garganta y el de la placa (incluyendo la posible penetración), pero también del tipo de carga, la forma de la soldadura, la desalineación, las tensiones residuales, etc. Para el caso que ocupa a este proyecto, se centra en grietas en pies de soldadura, ya que al tratarse de soldaduras de penetración completa es la opción más crítica.



*Ilustración 8. Ejemplos de grieta en el pie (izq.) o en la raíz (dcha.) de la soldadura*

Para empezar, se precisa definir un método para el cálculo del estado tensional en los pies de los cordones de soldadura, necesario para la predicción de vida, ya que la presencia de una unión soldada representa una significativa alteración de este. Para ello, se propone el uso de las tensiones estructurales de "Hot-Spot" (punto caliente).

La tensión estructural o geométrica en el "Hot-Spot" (HS), tal y como se muestra en la Ilustración 9, incluye todos los efectos de aumento de tensión de un detalle estructural, excluyendo la debida al propio perfil local de la soldadura. Por lo tanto, la tensión máxima no lineal causada por la punta de la soldadura, se excluye de la tensión estructural. Esta, depende de los parámetros dimensionales globales y de los parámetros de carga del componente en las proximidades de la unión, y, se determina en la superficie del punto "Hot-Spot" del componente que se va a evaluar. Las tensiones estructurales se definen generalmente para las estructuras de placas, cáscaras y tubos.

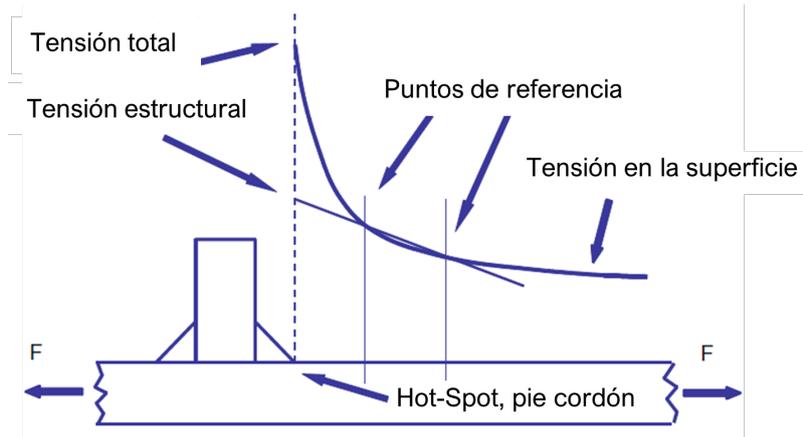


Ilustración 9. Definición de la tensión estructural de "Hot-Spot"

En la Ilustración 10 se muestran algunos ejemplos de discontinuidades geométricas y detalles estructurales, junto con las distribuciones de tensiones correspondientes.

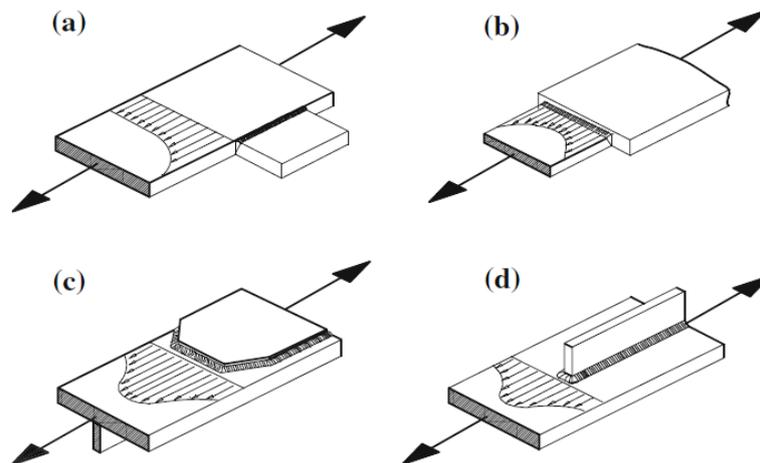


Ilustración 10. Ejemplos de detalles estructurales y sus distribuciones tensionales

Para el cálculo de las tensiones en los HS, en el caso de un estado de tensión biaxial en la superficie de la placa (tensión plana), como es el caso, se recomienda utilizar la tensión principal que actúa aproximadamente en línea con la perpendicular a la soldadura, dentro de un margen de  $\pm 60^\circ$  (Ilustración 11). Asimismo, pudiera ser necesario analizar la otra tensión principal cerca a la paralela al cordón de soldadura, utilizando en su caso los procedimientos descritos en la norma para dicho fin.

Además de las definiciones de la tensión estructural de HS que se han dado anteriormente, se definen dos tipos de HS según su ubicación en la placa y su orientación con respecto al pie de la soldadura, como se define en la Ilustración 12.

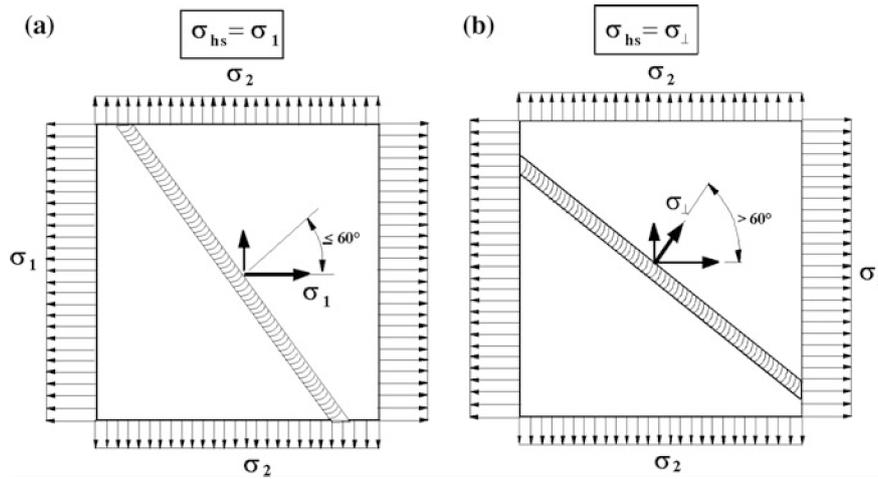


Ilustración 11. Tensión de HS ( $\sigma_{hs}$ ) en pies de soldaduras en estado de tensión plana

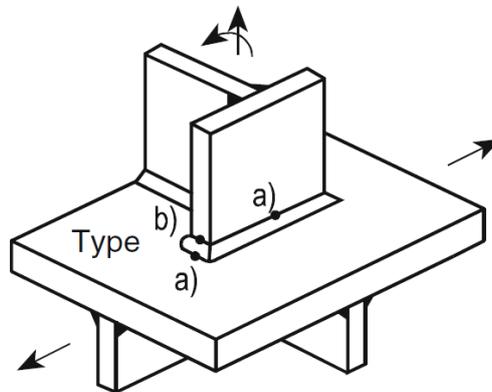


Ilustración 12. Tipos de Hot-Spot

En cuanto a la determinación de la tensión estructural del HS, el procedimiento consiste, en primer lugar, en establecer ciertos puntos de referencia a distancias concretas del pie de la soldadura o punto de HS (Ilustración 9), y, a continuación, en determinar la tensión del HS por extrapolación al pie de la soldadura de las tensiones de dichos puntos. Según el tipo de HS que estemos calculando, dichos puntos de referencia se establecerán de forma distinta. Para los HS de tipo A, estos serán dependientes del espesor del elemento en que se encuentren, al contrario, las tensiones de HS de tipo B no se ven influenciadas en este aspecto, por lo que los puntos de referencia se establecen a distancias concretas del pie del cordón. Además, dependiendo del método puede haber dos o tres puntos de referencia:

- Hot-Spot tipo A:

- Extrapolación lineal:

$$\sigma_{HS} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0t}$$

- Extrapolación cuadrática:

$$\sigma_{HS} = 2,52 \cdot \sigma_{0,4t} - 2,24 \cdot \sigma_{0,9t} + 0,72 \cdot \sigma_{1,4t}$$

- Hot-Spot tipo B:

- Extrapolación lineal:

$$\sigma_{HS} = 1,5 \cdot \sigma_{5mm} - 0,5 \cdot \sigma_{15mm}$$

- Extrapolación cuadrática:

$$\sigma_{HS} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm}$$

Una vez aclarado el procedimiento de obtención de tensiones en soldaduras, se debe abordar la transformación de estas tensiones que se miden a lo largo del tiempo, en datos propicios para el cálculo del daño que producen. Para ello, se emplean el historial de carga y un método de recuento de ciclos.

Las cargas y las acciones de fatiga resultantes en las estructuras reales, es decir, las tensiones, suelen fluctuar de forma irregular y dan lugar a cargas de amplitud variable. La amplitud de la tensión puede variar tanto en magnitud, como en periodo de un ciclo a otro. El historial de tensiones es un registro y/o una representación de las fluctuaciones de las acciones de fatiga en el tiempo de servicio previsto del componente. Se describe en términos de máximos y mínimos sucesivos de la tensión causados por la aplicación de la carga variable (Ilustración 13). Debe tener como objetivo cubrir todos los eventos de carga y la correspondiente respuesta dinámica inducida de forma conservadora.

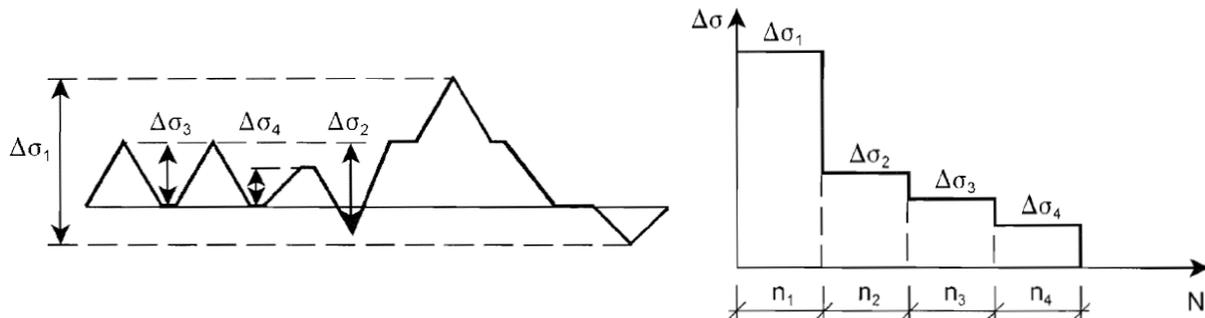


Ilustración 13. Ejemplo de historial de carga y contaje de ciclos. Fuente: [19]

En cuanto al contaje de ciclos, es el proceso de convertir una secuencia de tensiones de amplitud variable, en una serie de ciclos de rangos de tensiones de amplitud constante que son equivalentes en términos de daño a la secuencia original, Ilustración 13. Existen varios métodos para el recuento de ciclos, pero para el caso de los componentes soldados, se recomiendan los métodos de "rainflow" (Ilustración 14) o el similar "reservoir".

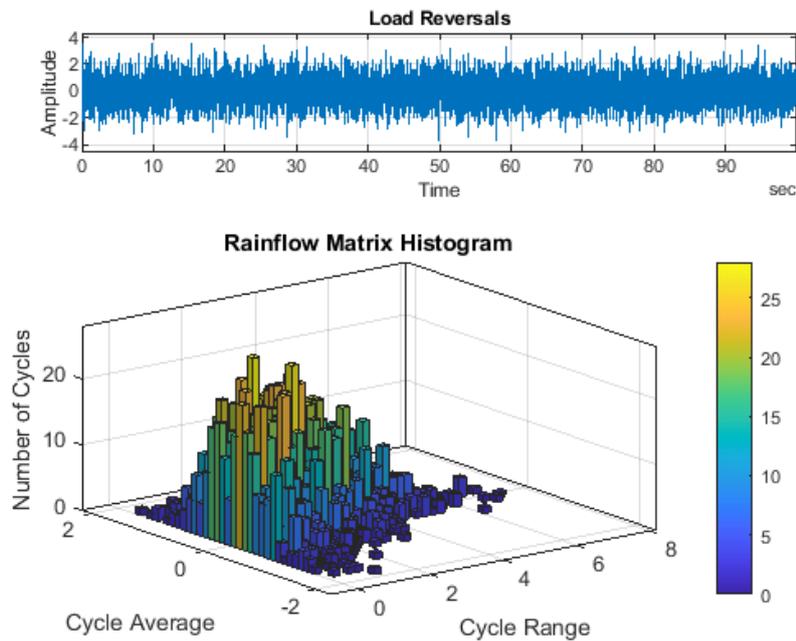


Ilustración 14. Ejemplo de un conteo de ciclos mediante el método "rainflow"

Llegados a este punto, el siguiente paso es calcular el daño que causan esa cantidad de ciclos a esos rangos de tensiones determinados a la unión soldada. Para ello, se emplean las denominadas curvas S-N (Ilustración 15) representativas de la resistencia a la fatiga de las soldaduras, donde:

$$S = \Delta\sigma = \sigma_{MAX} - \sigma_{min}$$

y

N = Número de ciclos

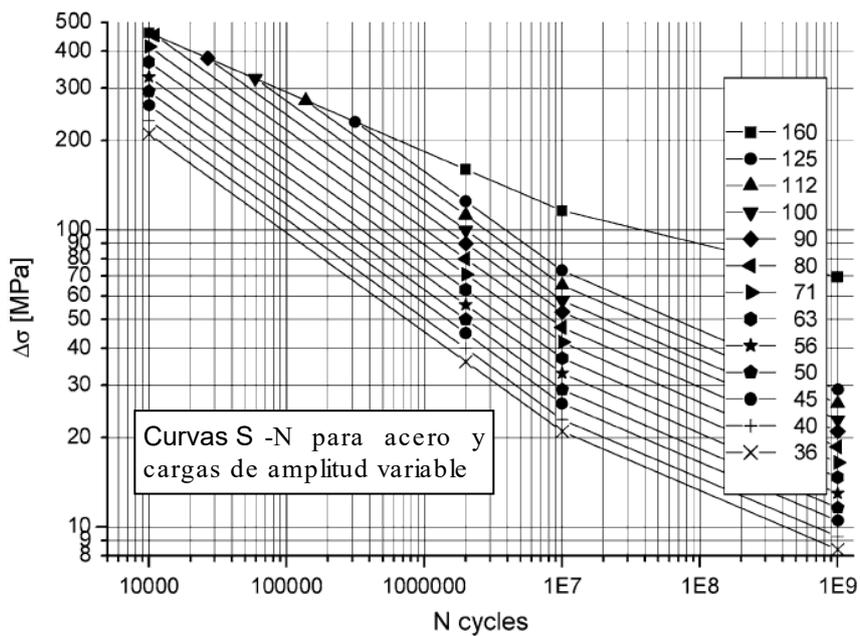
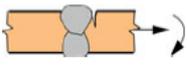
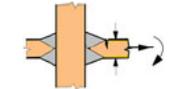
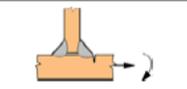
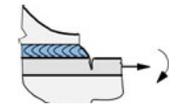
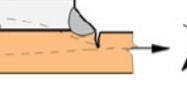
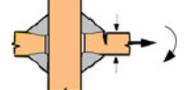
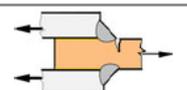
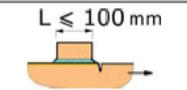
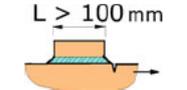


Ilustración 15. Curvas S-N de resistencia a la fatiga para acero y cargas de amplitud variable, modificadas para la suma de Palmgren-Miner

Cada curva S-N se identifica con la resistencia a la fatiga de cada unión en MPa a 2 millones de ciclos, según su detalle o geometría concreto. Este valor es la clase de fatiga (FAT), y se deberá obtener específicamente para el cordón bajo estudio en cada caso. Las clases para puntos HS se recogen en la Tabla 2. Conviene apuntar, que dichas clases FAT están sujetas a correcciones por diversas causas como la ratio de las tensiones aplicadas, el espesor de las placas, la aplicación de técnicas de mejora, temperaturas elevadas o la presencia de corrosión.

Tabla 2. Resistencias a la fatiga según detalle contra las tensiones estructurales en los HS

No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
1		Butt joint	As welded, NDT	100	40
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing	100	40
3		Non load-carrying fillet welds	Transverse non-load carrying attachment, not thicker than main plate, as welded	100	40
4		Bracket ends, ends of longitudinal stiffeners	Fillet welds welded around or not, as welded	100	40
5		Cover plate ends and similar joints	As welded	100	40
6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36
7		Lap joint with load carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36
8		Type "b" joint with short attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	100	40
9		Type "b" joint with long attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	90	36

Por último, para el cálculo de daño a fatiga se propone emplear la regla de Palmgren-Miner, donde se obtiene el valor de un daño acumulando, como suma de todos los daños individuales que causan la aplicación de cierta cantidad de ciclos a rango de tensiones constante, en función de la resistencia a fatiga correspondiente en cada caso.

$$D_{TOTAL} = \sum d_i = \sum \frac{n_i}{N_i} < D_{MAX}$$

donde:

$D_{TOTAL}$	Daño total acumulado
$d_i$	Daño individual de cada bloque de ciclos
$n_i$	Número de ciclos a rango constante
$N_i$	Resistencia a la fatiga para una clase y rango determinados
$D_{MAX}$	Daño máximo admisible

Finalmente, la vida de iniciación en fatiga se calcula en función del daño máximo permitido por norma, que a ojos de la IIW para estructuras soldadas se establece en 0,5.

### 5.2.1.2 No soldaduras

Para el cálculo de la vida a iniciación en potenciales puntos críticos que no se encuentren bajo la influencia de una unión soldada, se han seguido principalmente las indicaciones recogidas en la sección cuarta del estándar DNVGL-ST-0361 relativa a las estructuras de maquinaria [1]. Ciertamente, los procedimientos descritos en el mismo son en gran medida parejos a los del caso de soldaduras expuesto en el apartado anterior, no obstante, existen ciertas diferencias.

Para empezar, el cálculo de las tensiones es sustancialmente más sencillo. En este caso, al tratarse de cualquier punto de la estructura y no necesariamente de la superficie exterior, se han de considerar tensiones tridimensionales, al contrario del estado de tensión plana correspondiente a los puntos superficiales. Por lo tanto, en un primer paso los componentes de tensión relevantes para la fatiga que definen un estado de tensión tridimensional se transforman en un estado de tensión uniaxial equivalente mediante una hipótesis de tensión adecuada. Para ello, se recomiendan dos hipótesis de tensiones equivalentes para el caso de materiales dúctiles:

- Criterio de la máxima energía de distorsión (von Mises)
- Criterio de la tensión tangencial máxima (Tresca)

Una vez establecida la tensión equivalente para un punto de cálculo, se procesará su historial de carga mediante el método de "rainflow" para el recuento de ciclos, y, asimismo, se evaluará el daño a fatiga que esa carga provoca por medio de curvas S-N y el método de acumulación de daño de Palmgren-Miner, exactamente igual que para el caso de las soldaduras.

Sin embargo, en este cálculo es necesaria una curva S-N específica para el punto concreto donde se hace el cálculo, la cual dependerá del material de la estructura (acero estructural S-275), la geometría concreta de su ubicación, la carga aplicada etcétera. Para calcular dicha curva S-N sintética, el estándar plantea un procedimiento donde partiendo de datos representativos de todo ello (Tabla 3), se calculan los parámetros necesarios para la representación gráfica y acotación de dicha curva (Tabla 4) tal y como se muestra en la Ilustración 16. Los detalles de este procedimiento se recogen en el

Anexo II de este documento. A continuación, en las Tabla 3 y Tabla 4 se detallan los datos necesarios para el procedimiento.

Tabla 3. Input para la elaboración de S-N sintética

$R_m$	Resistencia a la tracción [MPa]
$R_{p0,2}$	Tensión de fluencia [MPa]
$R$	Ratio de tensiones
$\alpha_k$	Factor de concentración de tensiones
$R_z$	Rugosidad superficial [ $\mu\text{m}$ ]
$\gamma_M$	Factor de seguridad parcial del material
$t$	Espesor del elemento [mm]

Tabla 4. Parámetros para el trazado de la S-N sintética

$\Delta\sigma_1$	Límite superior actualizado de la línea de vida a la fatiga [MPa]
$N_1$	Número de ciclos de carga en el límite superior de fatiga
$\Delta\sigma^*_A$	Rango de tensión actualizado en el punto de cambio de tendencia [MPa]
$N_D$	Número de ciclos de carga en el punto de cambio de tendencia
$m_1$	Pendiente de la curva S-N para $N_1 < N < N_D$
$m_2$	Pendiente de la curva S-N para $N > N_D$

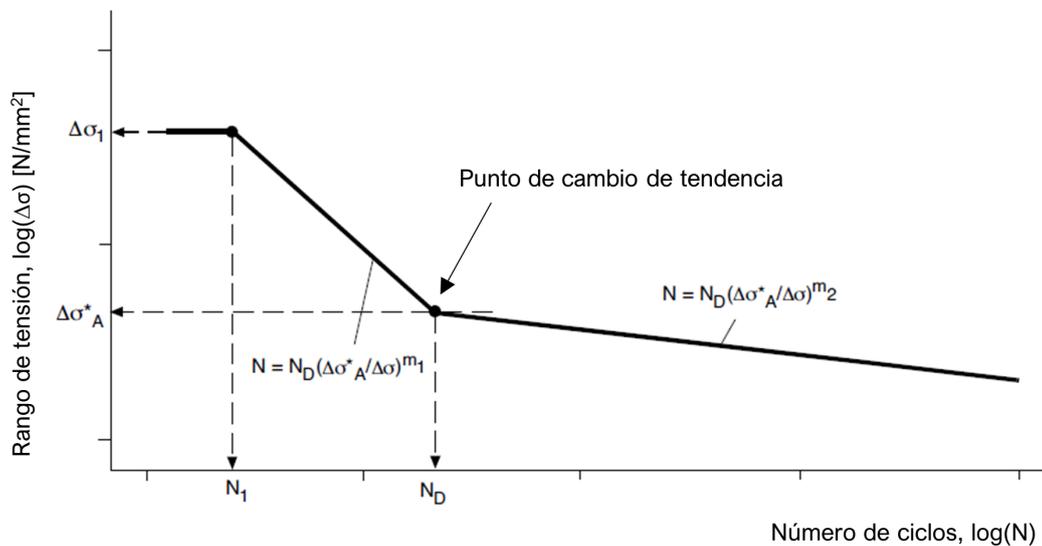


Ilustración 16. Representación gráfica de la S-N sintética

Tal y como se puede observar, uno de los parámetros de entrada para el cálculo de la curva S-N sintética es la ratio de tensiones,  $R$ . Pudiera ocurrir, que la razón de las tensiones en el punto de interés vaya fluctuando con el paso del tiempo, para lo cual no resulta práctico ni eficiente la elaboración repetida de nuevas curvas de resistencia a la fatiga en cada caso. Para dar solución a dicho contratiempo, se plantea una corrección de la tensión media en base a la aplicación del diagrama de Haigh (Ilustración 17). En este diagrama, se dibuja el punto correspondiente al estado tensional actual según su media y amplitud, y a continuación, se corrigen dichos valores calculando su

equivalente en términos de daño causado para una ratio de tensiones de  $R = -1$ , o lo que es lo mismo, se traslada dicho punto a su equivalente en daño para una tensión media nula. Para la traslación de dicho punto, se trazan líneas paralelas a las del diagrama respetando las pendientes correspondientes a la ratio de la tensión en cada caso.

De esta forma, es suficiente calcular una sola curva S-N correspondiente a la razón de tensiones de  $R = -1$  (o tensión media nula), aplicando esta corrección a los valores de las tensiones a introducir en la misma que así lo precisen.

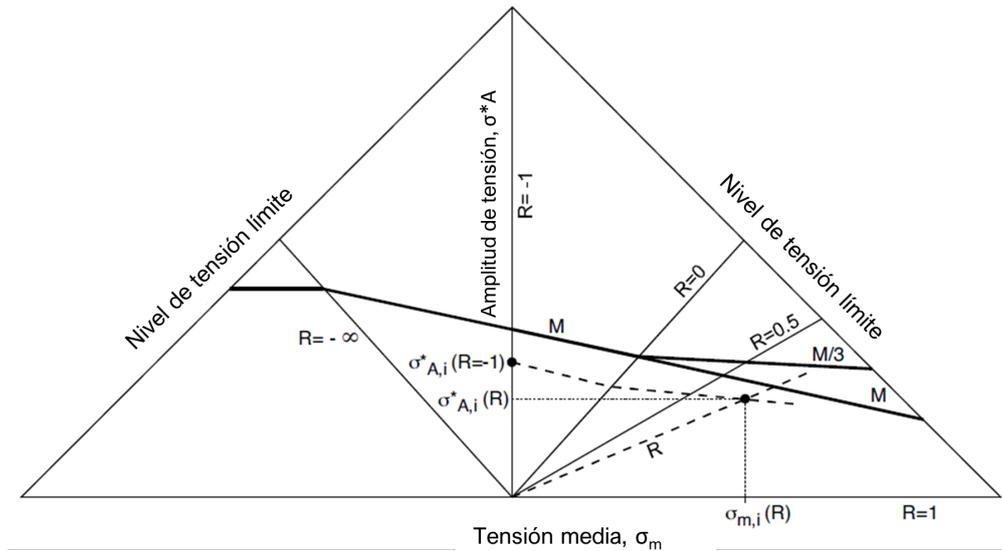


Ilustración 17. Diagrama de Haigh

Para finalizar, se realiza la predicción de vida a iniciación en base al máximo daño admisible en comparación al daño acumulado en el instante del cálculo. La norma, al contrario que para el caso de las soldaduras, establece dicho límite en 1.

### 5.2.3 Propagación

El procedimiento que se pasa a exponer en este apartado ha sido íntegramente establecido en base a la norma BS 7910:2013+A1:2015 sobre métodos para evaluar la admisibilidad de grietas en estructuras metálicas [3]. Un esquema ilustrativo de dicho proceso iterativo se muestra en la Ilustración 18.

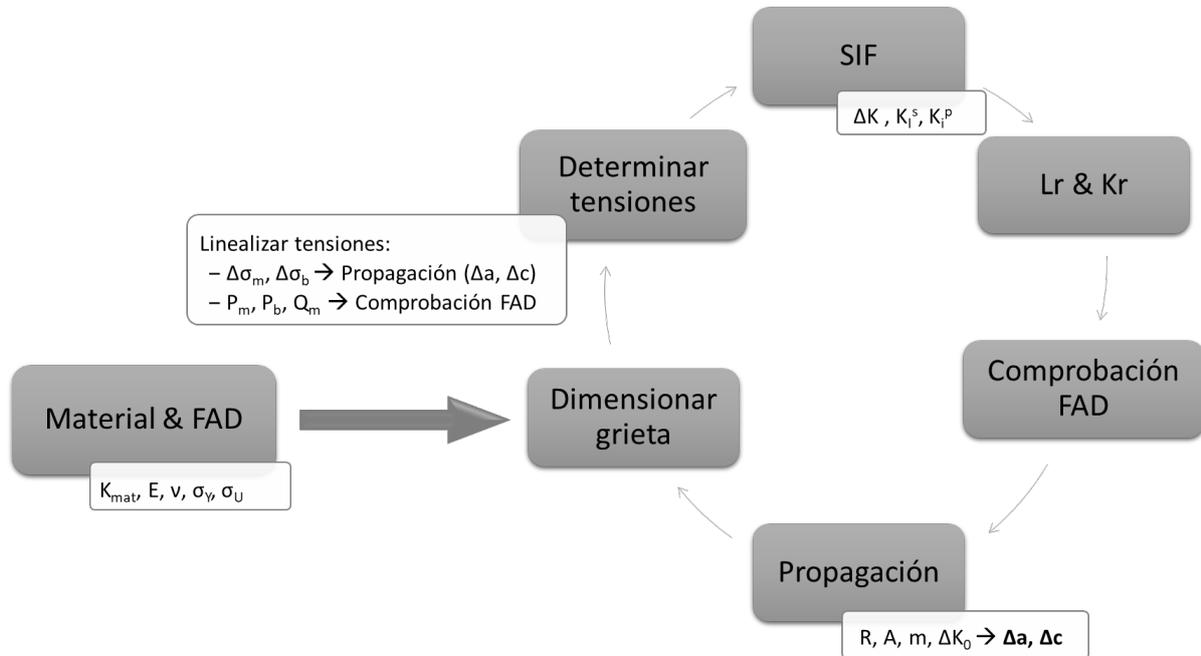


Ilustración 18. Esquema del cálculo de vida a propagación

En primer lugar, se deben definir todos y cada uno de los parámetros representativos de las propiedades de resistencia a la fractura del material, necesarios para el cálculo de propagación de grietas en fatiga: tensión de límite elástico o de fluencia ( $\sigma_v$ ), tensión última o de rotura ( $\sigma_U$ ), módulo de Young (E), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y la tenacidad de fractura ( $K_{mat}$ ). En el caso de no disponer de dichos parámetros caracterizados expresamente para el material, la norma proporciona valores genéricos para algunos de ellos y describe métodos o ensayos para la obtención de otros. Por otra parte, también permite basarse en la literatura disponible siempre y cuando los valores seleccionados sean plenamente representativos del material que se vaya a emplear, y estén siempre del lado de la seguridad.

Una vez caracterizado el material y con el fin de poder evaluar a fatiga una estructura, se calcula un diagrama de evaluación de fallos ("Failure Assessment Diagram", FAD) (Ilustración 19) basado en los principios de la mecánica de la fractura.

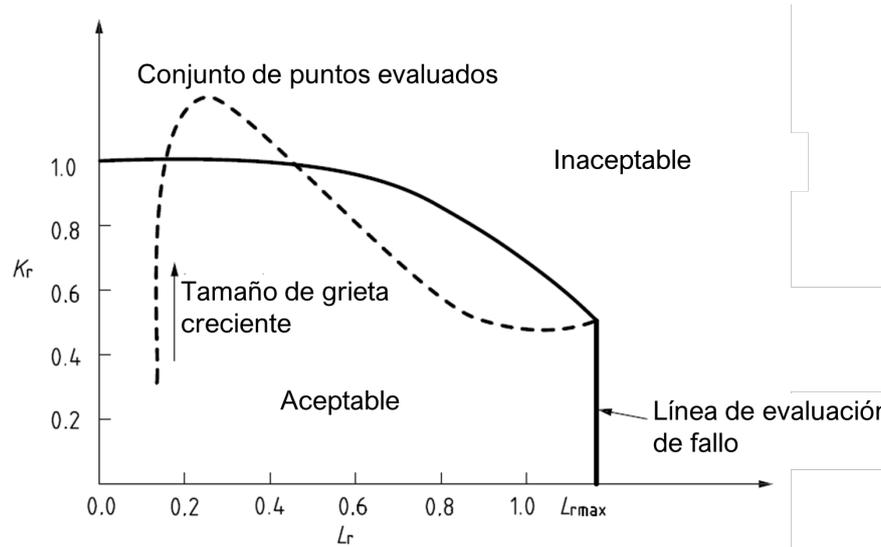


Ilustración 19. Ejemplo de un diagrama de evaluación de fallos (FAD)

El eje vertical del FAD compara la carga aplicada, en términos de los correspondientes Factores de Intensidad de la Tensión, con la resistencia a la fractura del material. El eje horizontal en cambio, representa la relación entre la carga primaria aplicada y la necesaria para el colapso plástico. En el diagrama se traza una línea de evaluación del fallo ("Failure Assessment Line", FAL), representativo de la resistencia del material para una carga aplicada y geometría de grieta determinadas. Los cálculos para un defecto en concreto proporcionan las coordenadas de un punto de evaluación, o, en el caso del crecimiento de la grieta, un conjunto de puntos. Las posiciones de estos se comparan con la línea de evaluación para determinar la aceptabilidad del defecto.

Estas son las ecuaciones que describen la línea de evaluación:

$$f(L_r) = \begin{cases} \left(1 + \frac{1}{2}L_r^2\right)^{-1/2} [0,3 + 0,7e^{-\mu L_r^6}], & L_r \leq 1 \\ f(1) \cdot L_r^{\frac{N-1}{2N}}, & 1 < L_r < L_{r,MAX} \\ 0, & L_r \geq L_{r,MAX} \end{cases}$$

donde:

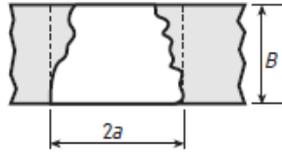
$$\mu = \min\left(0,001 \frac{e}{\sigma_Y}; 0,6\right)$$

$$N = 0,3 \left(1 - \frac{\sigma_Y}{\sigma_U}\right)$$

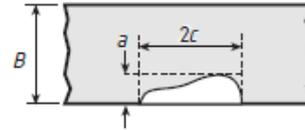
El valor máximo para la razón de cargas (eje horizontal,  $L_{r,MAX}$ ) se establece para prevenir el colapso plástico.

$$L_{r,MAX} = \frac{\sigma_Y + \sigma_U}{2\sigma_Y}$$

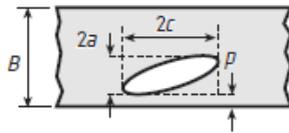
A partir de este punto, se describe el proceso que iterativamente se realizará para el cálculo de la propagación de grieta. El primer paso es dimensionar la grieta de la cual se quiera calcular el crecimiento. Para ello, en la Ilustración 20 se muestran las medidas a anotar para las posibles geometrías de grieta.



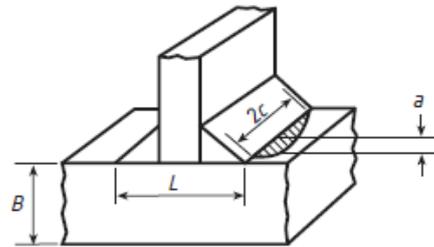
a) Through thickness flaw [Required dimensions:  $2a$ ,  $B$ ]



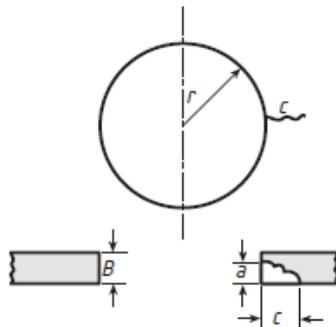
b) Surface flaw [Required dimensions:  $a$ ,  $2c$ ,  $B$ ]



c) Embedded flaw (Required dimensions:  $2c$ ,  $p$ ,  $2a$ ,  $B$ )



d) Flaw at toe of fillet weld (Required dimensions:  $2c$ ,  $a$ ,  $B$ ,  $L$ )

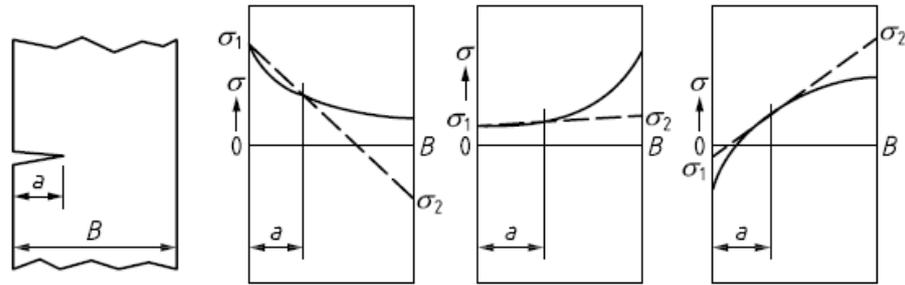


e) Flaw at hole (Required dimensions:  $c$ ,  $a$ ,  $B$ ,  $r$ )

Ilustración 20. Definiciones de dimensiones de grietas

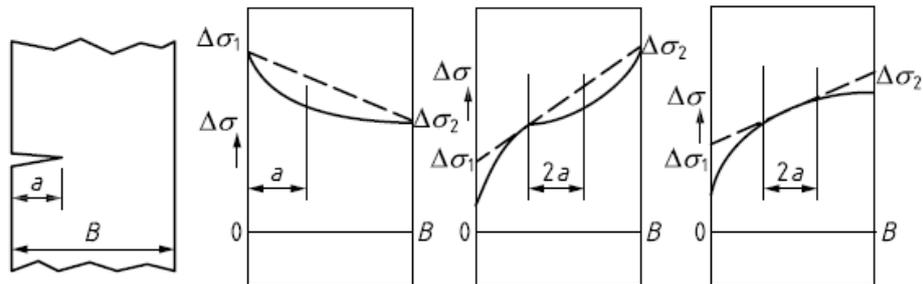
El siguiente paso, es determinar el estado tensional en el plano de la grieta. Las tensiones que deben considerarse en la evaluación, son aquellas que se calcularían en un análisis tensional de la estructura sin defectos. En este punto hay dos opciones, por una parte, pueden ser utilizadas las distribuciones de tensiones reales, o alternativamente, las tensiones y rangos de tensiones pueden ser linealizados, tal y como se muestra en la Ilustración 21. La linealización puede realizarse a lo largo de todo el plano del defecto (Ilustración 21.b), lo que suele dar lugar a sobreestimaciones, pero tiene la ventaja de que la linealización no necesita repetirse según la grieta vaya propagándose y aumentando de tamaño, a menos que cambie su geometría y los puntos a tener en cuenta para la linealización sean otros.

a) Linearization of stress distributions across flaw in fracture assessments



i) Examples of linearization of primary or secondary stress distributions for surface flaws

b) Linearization of stress range distributions across section in fatigue assessment



i) Examples of linearization of stress range distributions for surface flaws

Ilustración 21. Linealización de tensiones y rangos de tensiones

De esta linealización, se obtienen las componentes de membrana (m) y de flexión ("bending", b) tanto para el caso de las tensiones como de los rangos, que posteriormente se emplearán para la comprobación de la admisibilidad del fallo mediante el FAD y para el cálculo de la propagación a fatiga respectivamente.

$$P_m, Q_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad ; \quad P_b, Q_b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

$$\Delta\sigma_m = \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{2} \quad ; \quad \Delta\sigma_b = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2}{2}$$

En una evaluación del efecto de una carga única o aplicada en estado estacionario, es importante distinguir entre tensiones primarias ( $P_m, P_b$ ) y secundarias ( $Q_m, Q_b$ ), ya que sólo las primeras contribuyen al colapso plástico. En una evaluación de la fatiga, la distinción importante es entre tensiones estáticas y fluctuantes, y en el caso de estas últimas, se tratan del mismo modo como tensiones primarias.

Las tensiones primarias son tensiones que, si son suficientemente elevadas, pueden contribuir al colapso plástico. También pueden contribuir al fallo por fractura, fatiga o fluencia, e incluyen todas las tensiones derivadas de la presión interna y las cargas externas. Tal y como se ha mencionado, las tensiones primarias se dividen en componentes de membrana,  $P_m$ , y de flexión,  $P_b$ , como sigue:

- La tensión de membrana ( $P_m$ ) es la tensión media a través del espesor de la sección que es necesaria para asegurar el equilibrio del componente o la estructura.
- La tensión de flexión ( $P_b$ ) es la componente de la tensión debida a la carga impuesta que varía linealmente a través del espesor de la sección. Los esfuerzos de flexión están en equilibrio con el momento flector local aplicado al componente.

Por otro lado, las tensiones secundarias,  $Q$ , son tensiones auto equilibradas necesarias para satisfacer la compatibilidad en la estructura. Estas no causan el colapso plástico, ya que surgen de fenómenos limitados por la deformación/desplazamiento. Sin embargo, contribuyen a la gravedad de las condiciones locales en la punta de la grieta y, cuando sea necesario incluirlas en una evaluación, deben incluirse en los cálculos de los Factores de Intensidad de Tensiones. Son las tensiones térmicas y residuales las que suelen ser secundarias, muy a tener en cuenta en las zonas próximas a soldaduras. Al igual que las tensiones primarias, pueden dividirse en componentes de membrana,  $Q_m$ , y de flexión,  $Q_b$ .

Una vez obtenidas las componentes tensionales en el plano de la grieta, se emplean como ya se ha mencionado, en el cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones ("Stress Intensity Factor", SIF),  $K$ . El SIF es un parámetro que define el campo de tensiones y desplazamientos en las proximidades del frente de la fisura, y es directamente proporcional a la profundidad de la grieta ( $a$ ) y a la tensión de referencia ( $\sigma$  y  $\Delta\sigma$ ), la cual depende de las fuerzas externas:

$$K_I = Y\sigma \cdot \sqrt{\pi a} \quad y \quad \Delta K_I = Y\Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

Donde  $Y$  es el factor de corrección adimensional que depende de la geometría de la fisura, y se calcula de la siguiente forma:

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s$$

$$(Y\sigma)_p = M f_w \{k_{tm} M_{km} M_m P_m + k_{tb} M_{kb} M_b [P_b + (k_m - 1)P_m]\}$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b$$

y

$$Y\Delta\sigma = M f_w \{k_{tm} M_{km} M_m \Delta\sigma_m + k_{tb} M_{kb} M_b [\Delta\sigma_b + (k_m - 1)\Delta\sigma_m]\}$$

En estas ecuaciones,  $M$ ,  $M_m$ ,  $M_b$  y  $f_w$  dependen de la geometría concreta de la grieta;  $M_{km}$  y  $M_{kb}$  se aplican para incluir la influencia de una región de concentración de tensiones como las proximidades de una soldadura, y, por último,  $k_t$ ,  $k_{tm}$ ,  $k_{tb}$  y  $k_m$  representan la distribución de las tensiones a lo largo del plano. La formulación detallada de estas variables para las geometrías de grieta más típicas se recoge en el Anexo M de la norma BS 7910:2013 + A1:2015 [3].

En el siguiente paso, se debe realizar la comprobación de la admisibilidad de la grieta actual mediante el FAD (Ilustración 19). Para ello, tal y como se ha indicado, se calculan las ratios de fractura y de carga ( $K_r$  y  $L_r$ ) que ubican un punto en el diagrama, y a continuación se comparan con la línea de evaluación.

$$K_r = \frac{K_I^p + VK_I^s}{K_{mat}} \quad y \quad L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} = \frac{P}{P_L}$$

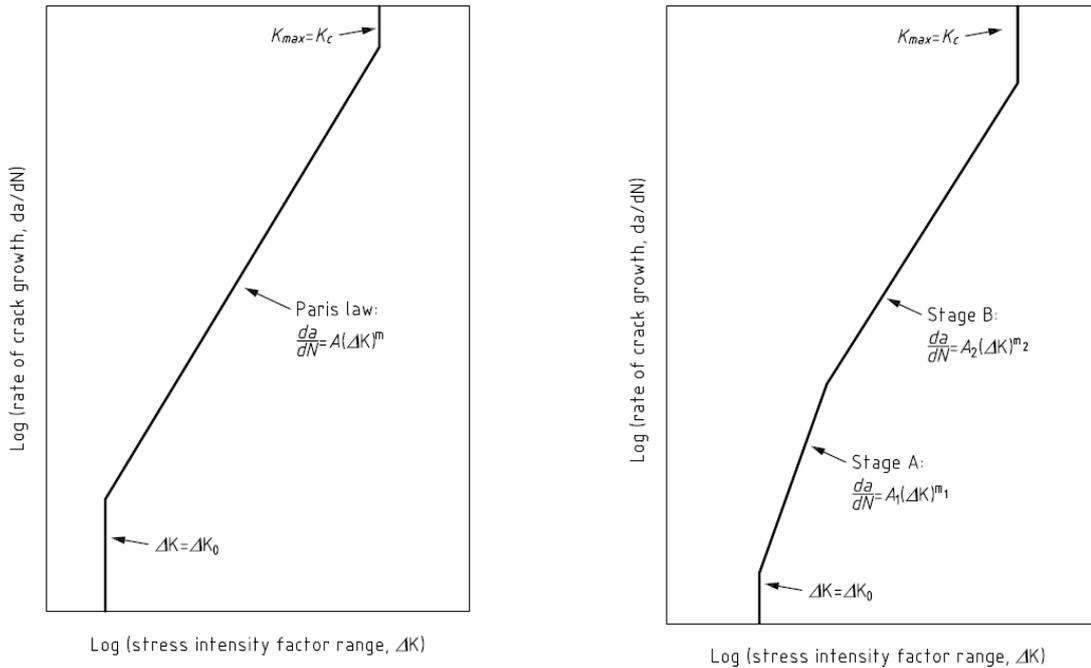
donde:

$K_I^p$	Factor de Intensidad de Tensiones debida solo a las cargas primarias
$K_I^s$	Factor de Intensidad de Tensiones debida solo a las cargas secundarias
$K_{mat}$	Tenacidad de fractura del material
$\sigma_{ref}$	Tensión de referencia
$\sigma_y$	Tensión de fluencia del material
$P$	Carga aplicada total
$P_L$	Carga límite

También en este punto, la formulación para el cálculo de las tensiones de referencia es específica para cada geometría de grieta, no siendo objeto de este documento. Dicha formulación, se detalla en el Anexo P de la norma BS 7910:2013 + A1:2015 [3].

Posteriormente, si efectivamente la grieta resulta ser admisible, se pasará a calcular su propagación. El método principal recogido en la norma (BS 7910:2013+A1:2015), se basa en el análisis de la mecánica de la fractura de las grietas bajo carga de fatiga, y estima la vida de fatiga mediante la integración de la ley de crecimiento de grieta. El procedimiento general permite utilizar expresiones precisas para el Factor de Intensidad de la Tensión cíclica y datos específicos de crecimiento de grietas por fatiga.

El enfoque de la mecánica de la fractura supone que un defecto puede idealizarse como una grieta de punta afilada que se propaga de acuerdo con la ley que relaciona la velocidad de propagación de la grieta ( $da/dN$ ) y el rango del Factor de Intensidad de la Tensión,  $\Delta K$ , para el material que contiene el defecto. La relación global entre la tasa de crecimiento y  $\Delta K$  se observa normalmente como una curva sigmoidea en un gráfico  $\log(da/dN)$  frente a  $\log(\Delta K)$  (Ilustración 22). En esta, existe una parte central para la que puede ser razonable suponer una relación lineal (es decir, la ley de Paris) (Ilustración 22.a) o, para mayor precisión, representar los datos mediante dos o más líneas rectas (Ilustración 22.b).



a) Simple Paris law crack growth relationship

b) Two stage crack growth relationship

*Ilustración 22. Ilustración esquemática de la ley de crecimiento de grieta*

Para valores bajos de  $\Delta K$  la tasa de crecimiento cae rápidamente, de tal manera que, por debajo de un valor umbral del rango del Factor de Intensidad de Tensión,  $\Delta K_0$ , el crecimiento de la grieta es insignificante. En cambio, en valores altos de  $\Delta K$ , cuando el SIF máximo en el ciclo,  $K_{max}$ , se aproxima al SIF crítico para el fallo bajo carga estática,  $K_c$ , la tasa de crecimiento de la grieta se acelera rápidamente.

Existen varias leyes de crecimiento de grietas que describen toda la relación sigmoidea, sin embargo, a menudo es suficiente asumir que la parte central se aplica para todos los valores de  $\Delta K$ , desde  $\Delta K_0$  hasta el fallo. Suponiendo, a efectos ilustrativos, la ley de Paris, la ecuación pertinente es la siguiente:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m$$

Donde  $A$  y  $m$  son constantes dependientes del material y las condiciones aplicación, incluyendo el ambiente y la frecuencia cíclica. La Tabla 5 recoge valores recomendados de estas dos variables para el acero en condiciones atmosféricas normales. Como se ha mencionado, existen leyes de crecimiento más precisas de dos etapas, para las cuales, se dan tanto la media como la media más dos desviaciones estándar (mean + 2SD) de las relaciones entre la tasa de crecimiento frente a  $\log(\Delta K)$  para  $R < 0,5$  y  $R \geq 0,5$ . Sin embargo, por motivos de conservadurismo y para tener en cuenta la influencia de las tensiones residuales, las leyes de media + 2SD para  $R \geq 0,5$  deben utilizarse normalmente para evaluar los componentes soldados, como es el caso (BS 7910:2013+A1:2015, apartado 8.2.3.3).

Tabla 5. Leyes de crecimiento de grietas por fatiga recomendadas para aceros en el aire

R	Stage A				Stage B				Stage A/Stage B transition point $\Delta K$ N/mm <sup>3/2</sup>	
	Mean curve		Mean + 2SD		Mean curve		Mean + 2SD		Mean curve	Mean + 2SD
	A <sup>B)</sup>	m								
<0.5	$1.21 \times 10^{-26}$	8.16	$4.37 \times 10^{-26}$	8.16	$3.98 \times 10^{-13}$	2.88	$6.77 \times 10^{-13}$	2.88	363	315
≥0.5	$4.80 \times 10^{-18}$	5.10	$2.10 \times 10^{-17}$	5.10	$5.86 \times 10^{-13}$	2.88	$1.29 \times 10^{-12}$	2.88	196	144

A) Mean + 2SD for  $R \geq 0.5$  values recommended for assessing welded joints.

B) For  $da/dN$  in mm/cycle and  $\Delta K$  in N/mm<sup>3/2</sup>.

Complementariamente, los valores umbral del rango de Factor de Intensidad de Tensiones,  $\Delta K_0$ , dependen en gran medida del entorno y de la ratio de tensiones aplicada,  $R$ . Se observa que  $\Delta K_0$  aumenta con la disminución de  $R$ . Los valores recomendados de  $\Delta K_0$  son los siguientes (en (N/mm)<sup>3/2</sup>):

$$\Delta K_0 = \begin{cases} 63, & R \geq 0,5 \\ 170 - 214 \cdot R, & 0 \leq R < 0,5 \\ 170, & R < 0 \end{cases}$$

Cabe destacar, que, para todas las evaluaciones de los defectos en juntas soldadas, el valor a adoptar es el límite inferior obtenido con valores altos de  $R$ .

Por lo tanto, mediante este procedimiento se deben de calcular los crecimientos en ambas direcciones principales de la grieta ( $\Delta a$  y  $\Delta c$ ), cambiando su geometría según esta se vaya propagando por la estructura y adopte diversas formas.

En definitiva, se debe repetir el proceso descrito iterativamente calculando la propagación de la grieta progresivamente en cada iteración, redimensionando su tamaño, considerando las tensiones oportunas y calculando los Factores de Intensidad de Tensiones cada vez, hasta llegar al punto en el cual mediante el Diagrama de Evaluación de Fallos se determine que la grieta en cuestión es inadmisibles, lo que finalmente determina la vida de propagación en fatiga de la estructura. En la Ilustración 18 se muestra un esquema resumido del proceso.

### 5.3 Sensorización Virtual

Previamente en este documento, ya se ha comentado que la monitorización de la salud estructural (SHM) es el campo de la ingeniería que se centra en la sensorización y monitorización de bienes estructurales con el objetivo de detectar posibles daños y de realizar predicciones de la vida útil remanente de los componentes, aumentando así la seguridad del sistema y permitiendo optimizar las acciones de mantenimiento preventivo [14], [21].

En esta línea de estudio, mediante técnicas de sensorización virtual (SV) es posible obtener medidas en puntos no monitorizados directamente con un sensor [22]. El uso de sensores virtuales en el ámbito de la SHM resulta de especial interés para los casos en los que se requiera obtener medidas de puntos donde no es técnicamente factible ubicar un sensor [15], [23], como puede ser el pie de un cordón de soldadura susceptible a agrietarse. Asimismo, resulta útil en aplicaciones en las que se requiera obtener medidas de una gran cantidad de puntos, demandando una red de sensores demasiado extensa [14], o bien, en el escenario de que un sensor real falle.

Las técnicas de sensorización virtual pueden clasificarse en dos grupos principales: técnicas basadas en datos ("data-driven") y técnicas basadas en modelos ("model-based") [24], [25]. Las primeras utilizan datos obtenidos de sensores reales como datos de entrenamiento para crear relaciones numéricas entre los sensores reales y el sensor virtual, evitando la necesidad de desarrollar un modelo físico del sistema [26]. Las segundas requieren del desarrollo de un modelo que describa el comportamiento del sistema. Las técnicas "model-based" pueden ser clasificadas a su vez en dos tipos: determinísticas, donde se asume que el modelo describe el comportamiento real del sistema; y estocásticas, donde se asume cierto grado de incertidumbre [27].

A continuación, se exponen diversos métodos de sensorización virtual de las tensiones en puntos de interés de la estructura, contemplados para su aplicación en este proyecto.

### 5.3.1 Relación lineal

Suponiendo una estructura de comportamiento lineal, sometida a cargas de naturaleza estática o cuasiestática (que no produce efectos dinámicos), la relación entre las tensiones en dos puntos de esta es constante, de la misma forma que también lo es la relación entre el valor de la carga aplicada y la tensión en un punto. Por lo tanto, es posible crear sensores virtuales de deformación/tensión mediante el uso de modelos basados en Métodos de Elementos Finitos (FEM). Así, se diferencian cuatro casos posibles en función de la cantidad de cargas aplicadas y la mensurabilidad de estas.

Si la carga aplicada sobre la estructura es única y medible, puede utilizarse para estimar la deformación en un punto no medido (galga virtual). Para ello, en el modelo FEM, se aplica una carga unitaria y se observa qué deformación produce en el punto de interés. La relación entre la carga unitaria y la deformación obtenida,  $K_f$ , es utilizada para implementar la galga virtual.

$$\varepsilon_e = K_f \cdot F$$

En cambio, si la carga aplicada sobre la estructura es única pero no medible, puede utilizarse una galga real para estimar la deformación en un punto no medido (galga virtual). Para ello, en el modelo FEM, se aplica también una carga unitaria y se observa qué deformación produce en ambos puntos, tanto en la ubicación de la galga real como en la de la galga virtual. Esta relación,  $K_g$ , es utilizada para implementar la galga virtual.

$$\varepsilon_e = K_g \cdot \varepsilon$$

Por otro lado, si las cargas aplicadas sobre la estructura son múltiples y cada una de ellas es por su parte medible, pueden utilizarse para estimar la deformación en un punto no medido (galga virtual). Para ello, cargas unitarias se aplican por separado en los puntos de aplicación en el modelo FEM, y se observa qué deformación produce cada una de ellas en el punto de interés. Las relaciones entre las cargas unitarias y la deformación obtenida ( $K_{fn}$ ) son utilizadas para implementar la galga virtual.

$$\varepsilon_e = K_{f1} F_1 + K_{f2} F_2 + \dots + K_{fn} F_n$$

Por último, si las cargas aplicadas sobre la estructura son múltiples, pero no son medibles, se requieren tantas galgas reales como cargas para estimar la deformación en un punto no medido (galga virtual), además, las galgas reales deben estar situadas en ubicaciones cercanas al punto de aplicación de las distintas cargas. Para ello, en el modelo FEM, se aplican por separado cargas unitarias en los puntos de aplicación y se observa qué deformación produce cada una de ellas en las galgas. En la siguiente ecuación se ejemplifica el procedimiento para el caso de dos fuerzas ( $F_1$  y  $F_2$ ) y dos galgas ( $\varepsilon_1$  y  $\varepsilon_2$ ).

$$\varepsilon_e = [K_{g,ref,F1} \quad K_{g,ref,F2}] \left( \begin{bmatrix} K_{g1,F1} & K_{g2,F1} \\ K_{g1,F2} & K_{g2,F2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \right)$$

### 5.3.2 Relación múltiple

En la situación de disponer de más medidas de deformación de las necesarias para utilizar el método de la relación lineal, debe utilizarse un método que pondere los datos ofrecidos por cada sensor con el fin de obtener una estimación en el punto de interés. Una opción es utilizar una regresión lineal:

$$\varepsilon_e = C_0 + C_1 \varepsilon_1 + C_2 \varepsilon_2 + \dots + C_n \varepsilon_n + e$$

Una regresión lineal es un modelo que aproxima una relación de dependencia entre una variable dependiente (output) y un conjunto de variables independientes (inputs). Este modelo, el cual consiste en un conjunto de parámetros,  $C_n$ , se obtiene a partir de un grupo limitado de ejemplos de inputs y sus correspondientes outputs, buscando minimizar el error,  $e$ . Los inputs se corresponden con las galgas reales ubicadas en la estructura, y, el output, con la galga virtual. Si se dispone de  $n$  inputs y  $m$  ejemplos, el modelo de regresión se obtiene minimizando  $e$  en la expresión.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{e1} \\ \varepsilon_{e2} \\ \vdots \\ \varepsilon_{em} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \dots & \varepsilon_{1m} \\ 1 & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \dots & \varepsilon_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \dots & \varepsilon_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix}$$

### 5.3.3 Relación lineal con incertidumbre

Al igual que para el caso anterior, en caso de disponer de más medidas de deformación de las estrictamente necesarias para la aplicación del método de la relación lineal, y conociendo la incertidumbre asociada a cada una de ellas, se puede realizar una estimación ponderada, asignando un valor de influencia a cada una de las medidas. Si se dispone de un número  $n$  de medidas, deben definirse  $n$  ponderaciones ( $\alpha_n$ ) con la condición de que la suma de todas ellas sea la unidad.

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$$

Para obtener la estimación de la deformación en la galga virtual, cada medida de galga real, con su correspondiente relación, debe ser multiplicada por el valor de ponderación asignado.

$$\varepsilon_e = \alpha_1 K_{g1} \varepsilon_1 + \alpha_2 K_{g2} \varepsilon_2 + \dots + \alpha_n K_{gn} \varepsilon_n$$

Cada medida de deformación lleva asociada una incertidumbre ( $\delta \cdot \varepsilon$ ), la cual puede expresarse en términos relativos ( $\delta\varepsilon/|\varepsilon|$ ). La incertidumbre de la deformación estimada,  $\delta\varepsilon_e$ , se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\delta\varepsilon_e = \sqrt{(\delta\varepsilon_1)^2 + (\delta\varepsilon_2)^2 + \dots + (\delta\varepsilon_n)^2}$$

### 5.3.4 Kalman estático

El filtro de Kalman es un algoritmo recursivo el cual es capaz de estimar las variables de estado de un sistema, a partir de un modelo del mismo y un conjunto limitado de medidas, asumiendo que ambos conllevan una cierta incertidumbre. En cada instante, el filtro de Kalman realiza en primer lugar una estimación del estado actual, basada en el estado inmediatamente anterior. Posteriormente, realiza una observación utilizando las medidas tomadas, para finalmente corregir la estimación inicial.

Habitualmente, el filtro de Kalman es utilizado en conjunto con un modelo dinámico descrito en espacio de estados, que en el caso de una estructura es un modelo de masa, rigidez y amortiguamiento. No obstante, es posible utilizar la formulación de Kalman en modelos mucho más sencillos.

Si únicamente se dispone de un conjunto limitado de galgas en la estructura, se puede plantear un filtro de Kalman que solamente considere las galgas como variables de estado. En ese caso, el modelo consistiría en un conjunto de relaciones lineales que ligen las galgas disponibles con todos los estados. Se ejemplifica con el caso de tres galgas reales y una galga virtual. Debe crearse un vector de estados con todas las galgas,  $x(t)$ , y una matriz de observación,  $H$ , que relacione las medidas con los estados. Al no ser esta una matriz cuadrada, su inversión debe hacerse mediante la pseudoinversa de Moore-Penrose.

$$x(t) = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{ref} \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_{g1}}{3} & \frac{K_{g2}}{3} & \frac{K_{g3}}{3} \end{bmatrix}^t$$

$$H^{-1} \cdot z(t) = x(t)$$

A continuación, se describe la formulación del “static Kalman”. Tal y como se ha mencionado, en primer lugar, el filtro realiza una estimación basada en los estados anteriores.

$$x(t) = x(t - 1)$$

Luego, hace una estimación de la covarianza del filtro basada asimismo en su valor anterior, y a continuación se calcula la ganancia.

$$P_t = P_{t-1} + Q$$

$$K_{gain} = P \cdot H^t \cdot (H \cdot P \cdot H^t + R)^{-1}$$

Seguidamente, la estimación de los estados es corregida a partir de las medidas provenientes de los sensores, y para finalizar, la estimación de la covarianza del filtro también es corregida.

$$x(t) = x(t) + K_{gain} \cdot [z(t) + Hx(t)]$$

$$P_t = (I - K_{gain} \cdot H) \cdot P_t$$

### 5.3.5 Modelo dinámico

Es posible obtener un modelo dinámico de una estructura a partir de un modelo de elementos finitos. Definiendo un conjunto limitado de grados de libertad  $q(t)$  correspondientes a los desplazamientos de un conjunto de nodos máster de la estructura, mediante un método de reducción de modelos, como la condensación estática de Guyan, pueden obtenerse las matrices de masa ( $M$ ), amortiguación ( $C$ ) y rigidez ( $K$ ) del sistema. El comportamiento del modelo se describe mediante la siguiente ecuación:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t)$$

Si los inputs externos sobre la estructura real son conocidos, pueden aplicarse al modelo dinámico para realizar una simulación de la estructura real. Mediante la matriz de transformación entre desplazamientos y deformaciones,  $G^*$ , puede obtenerse la deformación en la ubicación concreta de una galga virtual.

## 6. ANÁLISIS DE RIESGOS

En este apartado se pretenden analizar los posibles riesgos que haya en el desarrollo del proyecto. Para ello, en los puntos que siguen se clasifican según su naturaleza y se expone una breve descripción de estos, analizando la probabilidad que tienen de ocurrir, así como las consecuencias que pudieran causar ponderándolos en base a la matriz de probabilidad e impacto propuesta por el PMI, "Project Management Institute" (Ilustración 23). En esta matriz, se valorarán los riesgos en función de las dos variables mencionadas asignando a cada uno de ellos un valor representativo de su gravedad. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la gravedad del riesgo y por lo tanto la atención que deba prestársele.

		Amenazas				
Probabilidad	Muy alta 0,90	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72
	Alta 0,70	0,04	0,07	0,14	0,28	0,56
	Mediana 0,50	0,03	0,05	0,10	0,20	0,40
	Baja 0,30	0,02	0,03	0,06	0,12	0,24
	Muy baja 0,10	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08
		Muy bajo 0,05	Bajo 0,10	Moderado 0,20	Alto 0,40	Muy alto 0,80
		Impacto negativo				

Ilustración 23. Matriz de probabilidad e impacto. Fuente: PMI 2017

### 6.1 Gestión

El riesgo principal en cuanto a la gestión del proyecto es el relativo al tiempo o cumplimiento de los plazos propuestos inicialmente en la planificación. Existe un riesgo en extenderse en exceso en la realización de cualquiera de las tareas, ya sea en la parte de diseñar la estructura o en la de desarrollar el gemelo digital. Si esto ocurriera, es posible que no se dispusiera del tiempo necesario para finalizar el proyecto en su totalidad, pudiéndose quedar el gemelo digital sin demostrar o en el peor de los casos, sin acabar siquiera la propia programación de este. La probabilidad que se le asigna a este riesgo es mediana, debido al ambicioso alcance y extensión del proyecto. En cambio, el impacto negativo es bajo, ya que tenemos flexibilidad para adaptar la planificación a la nueva situación de retraso, pudiendo en cualquier caso dejar algunas tareas fuera del marco de este TFM que se engloba en un proyecto mayor. Por lo tanto, según la matriz se pondera este riesgo con un valor de 0,05, riesgo bajo.

En la misma línea, se encuentran los retrasos que pudieran surgir de las relaciones con terceras empresas proveedoras, ya sea para la fabricación de la

estructura o para la compra de material de sensorización. Se califica la probabilidad de este riesgo en baja, pero el impacto que pueden tener en el desarrollo del proyecto se considera moderado, por lo que en base a la matriz el riesgo se pondera en 0,06, riesgo bajo.

## 6.2 Experimentales

Aunque en lo que concierne al contenido de este TFM no se vayan a realizar ensayos de fatiga reales en un banco de pruebas, la calidad en la fabricación de la estructura es un riesgo a tener en cuenta en este proyecto. Los errores de fabricación pueden ser varios: fallos de desalineación de sus elementos, irregularidades, mala calidad de las uniones soldadas etc. Todos ellos pueden influir muy negativamente sobre el proyecto, ya que pueden provocar una redistribución tensional respecto del diseño final de la estructura, pudiendo en última instancia provocar la aparición de grietas y el fallo de la estructura en ubicaciones para cuyo cálculo el gemelo digital no esté programado. En ese caso, el gemelo digital no resultaría de gran utilidad y no se cumpliría el objetivo principal de este proyecto, por lo que el impacto negativo resulta muy alto. Por otro lado, la probabilidad de que tal cosa pudiere ocurrir se estima en muy baja. En consecuencia, este riesgo con un valor de 0,08 es moderado, por lo que es necesario prestarle especial atención y cerciorarse de que el trabajo realizado en este aspecto, como la generación de planos del demostrador, sea excelente.

En este análisis, también se ha considerado el riesgo que suponen los errores experimentales que puedan darse en la sensorización. Si las lecturas de las galgas extensiométricas no son fieles a la realidad, al basarse del principal input del sistema basado en la deducción de tensiones mediante técnicas de sensorización virtual, cabe la posibilidad, aunque muy baja, de que los cálculos realizados por el gemelo digital no sean representativos de la realidad, lo que supone de alto impacto en el trabajo. Así, este riesgo se valora en 0,04 y es bajo. Para prevenirlo, es importante la correcta colocación y calibración de los sensores.

## 6.3 Grado de satisfacción de los resultados

Por último, existe el riesgo de que, una vez realizado todo el proyecto, resulte que el gemelo digital no cumpla las expectativas y que no sirva para la función que fue diseñado. Puede ocurrir que por acumulación de diversos errores tales como el cúmulo de márgenes de seguridad contemplados por las normas y estándares, siempre del lado de la seguridad, la falta de representatividad con respecto a la realidad de las velocidades de propagación de grietas calculadas en base a diversas suposiciones y generalidades contempladas en los procedimientos, etcétera. Al fin y al cabo, puede ocurrir que el resultado de vida a fatiga obtenido no sea realista y no resulte de utilidad. En ese caso, el impacto del riesgo es alto, pero la probabilidad de que ocurra se espera

baja. En consecuencia, a este riesgo se le asigna un valor de 0,12, lo que representa un riesgo moderado.

## 7. METODOLOGÍA

---

En este apartado del documento, en primer lugar, se tratarán aspectos relacionados con la planificación y la organización del proyecto. Se expondrá una lista que recoge las diversas tareas a realizar en su desarrollo, agrupadas en las fases principales que la componen, incluyendo una breve descripción de cada una de ellas. A continuación, se muestra el diagrama de Gantt que aglutina todas ellas y establece la gestión temporal de dichas tareas de forma ordenada. Posteriormente, se pasa a exponer de forma detallada la metodología empleada en el desarrollo de las tres fases de este proyecto. Para finalizar, se muestran los resultados del gemelo digital obtenidos de las simulaciones de ensayos realizadas y se elabora un análisis de estos.

### 7.1 Descripción de fases y tareas

Este proyecto consta de 4 tareas centrales, de las cuales 3, corresponden a las fases principales del mismo, y una cuarta, relativa a la redacción de los documentos derivados de este, que se abordará paralelamente a todas las demás.

#### T 1. PLANO FÍSICO: Diseño del demostrador.

Esta fase del proyecto consiste principalmente en obtener un diseño definitivo del demostrador de la prensa real, que posteriormente se ensayará en la tarea T3, partiendo de un diseño conceptual previo del mismo.

##### T 1.1. Diseñar la estructura y los utillajes de amarre.

Partiendo de un prediseño ya existente en la empresa, se lleva a cabo una optimización del mismo con el objetivo de que el demostrador saliente sea, por una parte, en la medida de lo posible representativo de la bancada de una prensa real teniendo en cuenta aspectos como su geometría, las cargas aplicadas sobre él o su modo de fallo. Y, por otra, la viabilidad de los futuros ensayos en cuanto a su duración o las capacidades del banco de ensayos. También se deben diseñar todos los utillajes de amarre necesarios para poder realizar los ensayos en el banco de pruebas correspondiente.

##### T 1.2. Diseñar condiciones de operación para los ensayos.

Diseñar y calcular las cargas que en los ensayos se le aplicarán a la estructura para que estos sean viables en cuanto a vida del prototipo y representativas de posibles cargas reales. Esto incluye una combinación de cargas definiendo su magnitud, el número de ciclos, la frecuencia, el orden de aplicación, la ratio de cargas, la duración del bloque de carga etc.

### T 1.3. Pedir y contrastar ofertas, lanzar pedido.

Una vez diseñados el demostrador y los utillajes necesarios, se solicitan varios presupuestos a diversas empresas dedicadas a la fabricación de componentes mecánicos. Luego, se comparan entre ellas, se elige la más conveniente, y se efectúa el pedido.

### T 1.4. Repasar EdA en gemelos digitales para predicción de vida a fatiga.

Consiste en recabar información en la literatura disponible sobre gemelos digitales de bienes de equipo en servicio, la monitorización de su vida, sensorización, etcétera, incluyendo metodologías y procedimientos para el cálculo de vida a fatiga de estructuras metálicas soldadas.

### T 1.5. Diseñar sensorización.

Incluye la selección de los sensores a emplear (galgas de propagación de fisuras, extensiométricas, ...), su ubicación y su instalación para la monitorización de los inputs necesarios para el funcionamiento del GD. Estos son los posibles tamaños de grietas, la fuerza aplicada sobre la estructura y las tensiones en los puntos de interés (teniendo en cuenta la sensorización virtual). Asimismo, exige la selección de todo el hardware que ello precise para la adquisición de los datos y el diseño de las conexiones pertinentes.

## T 2. PLANO VIRTUAL: Desarrollo e implementación del gemelo digital.

Esta segunda fase principal del proyecto se basa en programar un gemelo digital para la realización de la predicción de vida a fatiga del demostrador de la bancada de la prensa diseñado en la fase anterior. A su vez, primero se deberá definir la estrategia de cálculo para ello, y después, será necesario implementar sistemas complementarios para poner en funcionamiento el GD.

### T 2.1. Definir metodologías para predecir la vida en iniciación y propagación.

Basándose en la literatura disponible en múltiples normas y estándares ya mencionados, fijar un procedimiento a seguir para calcular la vida remanente a fatiga de la estructura partiendo de los inputs medidos por los sensores del GD. Esto requiere la definición de metodologías tanto para la fase de iniciación del fallo como para la de propagación de grieta, así como de la sensorización virtual.

### T 2.2. Diseñar estructura de algoritmos a implementar.

Plantear una estructura general del código del GD a programar, en base a la metodología de cálculo establecida. Definir los módulos principales de los que este estará compuesto, las entradas y salidas de estos, y, todas las interacciones y transferencias de datos entre ellos.

### T 2.3. Implementar GD para calcular tensiones partiendo de inputs.

Consiste en la implementación del módulo de sensorización virtual, encargado de calcular las tensiones en todos los puntos de la estructura necesarios para el procedimiento de cálculo de vida a fatiga establecido (tanto para la fase de iniciación como de propagación), a partir de las señales de deformaciones provenientes de las galgas extensiométricas recibidas mediante el programa de adquisición de datos.

### T 2.4. Implementar GD para predecir daño/vida partiendo de tensiones.

A partir de las tensiones recibidas del módulo de sensorización virtual, programar el código del gemelo para calcular el daño que la carga aplicada genera a la estructura, el tiempo que este tardará en empezar a agrietarse y el punto donde lo hará, cómo se propagará dicha grieta y finalmente, cuánto tiempo se prevé que transcurrirá hasta que el futuro daño causado a la estructura se considere inadmisibile.

### T 2.5. Desarrollar programa para adquisición de datos de ensayo.

Consiste en programar mediante las herramientas provistas por el fabricante del hardware de adquisición, el instrumento necesario para procesar las señales medidas por los sensores y transformarlas en inputs legibles para el GD.

### T 2.6. Desarrollar interfaz de usuario.

Una vez implementado el GD, se trata de crear una interfaz para que el usuario del sistema pueda controlarlo e interactuar con él, introduciendo información externa y visualizando los resultados obtenidos durante la vida en servicio del activo en cuestión.

## T 3. PLANOS FÍSICO & VIRTUAL: Demostración del gemelo digital.

En esta última fase del proyecto, se integrará el trabajo realizado hasta el momento; por un lado, el diseño del demostrador de la bancada de la prensa, por otro, el gemelo digital. Consiste en demostrar que el GD funciona correctamente y que los resultados obtenidos se asemejan a los esperados en la realidad, contrastando las tendencias observadas en el desarrollo del cálculo y otras variables intermedias (daño, longitud de grieta, etc.) que se esperan.

### T 3.1. Diseñar escenarios de simulación.

Una vez desarrollado en gemelo digital, se trata de diseñar escenarios oportunos bajo los cuales el sistema será simulado y puesto a prueba para su demostración. Conviene jugar con diversas variables y analizar la respuesta del gemelo en estas circunstancias.

### T 3.2. Desarrollar el código para la simulación del GD.

Con los escenarios de simulación definidos, consiste en elaborar los scripts necesarios en Python que sirvan para generar el input según dichos escenarios, con el fin de emular los ensayos y demostrar el GD.

### T 3.3. Realizar simulaciones piloto del GD.

Se debe comprobar si el funcionamiento conjunto entre el código para la simulación de los ensayos y el propio gemelo digital, también por su parte, es correcto.

### T 3.4. Tratar datos de las simulaciones piloto y realizar correcciones.

Consiste en analizar los posibles errores y realizar los reajustes y correcciones necesarios.

### T 3.5. Realizar simulaciones diseñadas.

### T 3.6. Tratar los datos de las simulaciones y concluir validez de GD.

Analizar los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones, así como los datos intermedios recopilados a lo largo de las mismas, extrayendo conclusiones que confirmen la validez del gemelo.

## T 4. REDACCIÓN DE DOCUMENTOS

Esta tarea consiste en la elaboración de toda la documentación necesaria para el desarrollo del proyecto, así como la redacción de este mismo documento final.

### T 4.1. Dibujar planos del demostrador.

Se trata de elaborar mediante un software CAD planos detallados de la estructura diseñada para enviarlos al fabricante.

### T 4.2. Redactar informe de sensorización y adquisición de datos.

Este documento incluye toda información en cuanto a los sensores, las tarjetas de adquisición de datos y las correspondientes conexiones a realizar para llevar a cabo los ensayos de demostración, extrayendo debidamente la información necesaria para el correcto funcionamiento del GD.

### T 4.3. Redactar informe de estructura general del GD.

En el informe se recoge toda la información relativa a la estructura general de los algoritmos diseñados para el funcionamiento del gemelo, incluyendo los módulos principales que lo componen, así como las interacciones que hay entre ellos.

### T 4.4. Redactar memoria del Trabajo Fin de Máster.

## 7.2 Diagrama de Gantt

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt realizado para la gestión temporal de las fases y tareas programadas en el proyecto, descritas en el punto anterior. La fecha de inicio de este proyecto ha sido el 1 de marzo de 2021 y ha finalizado el 30 de julio del mismo año, en coherencia con el periodo de realización de las prácticas externas realizadas en la empresa IKERLAN.

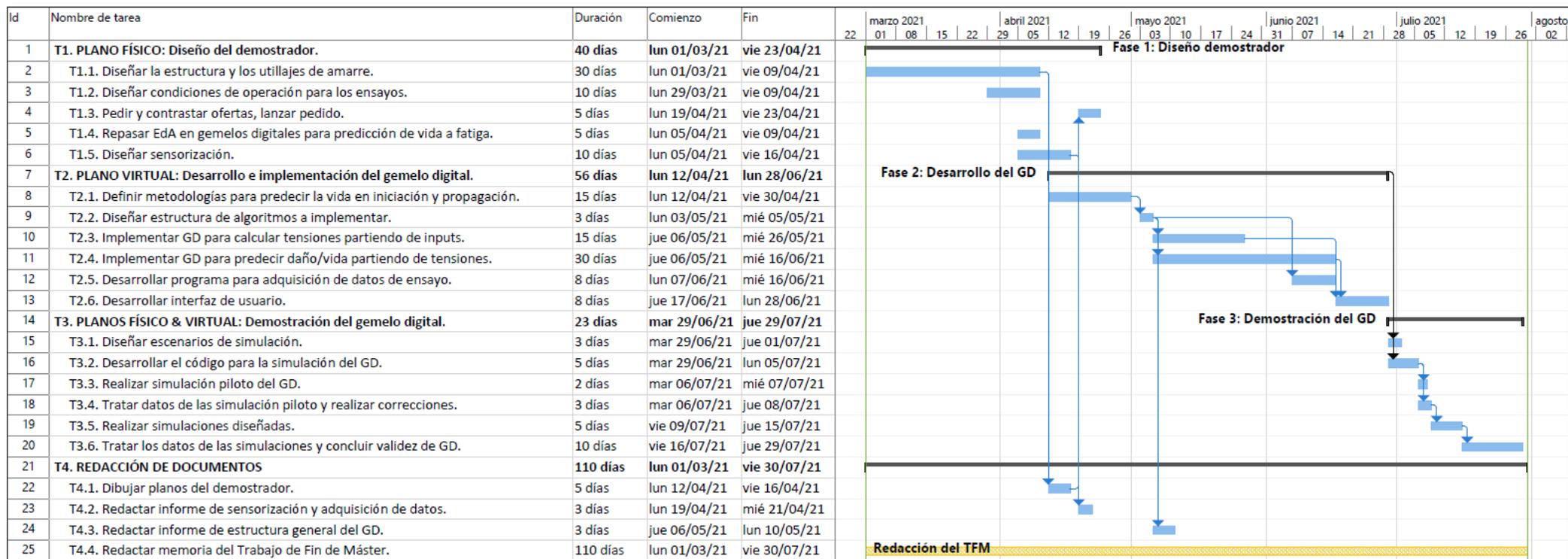


Ilustración 24. Diagrama de Gantt

## 7.3 Diseño del demostrador

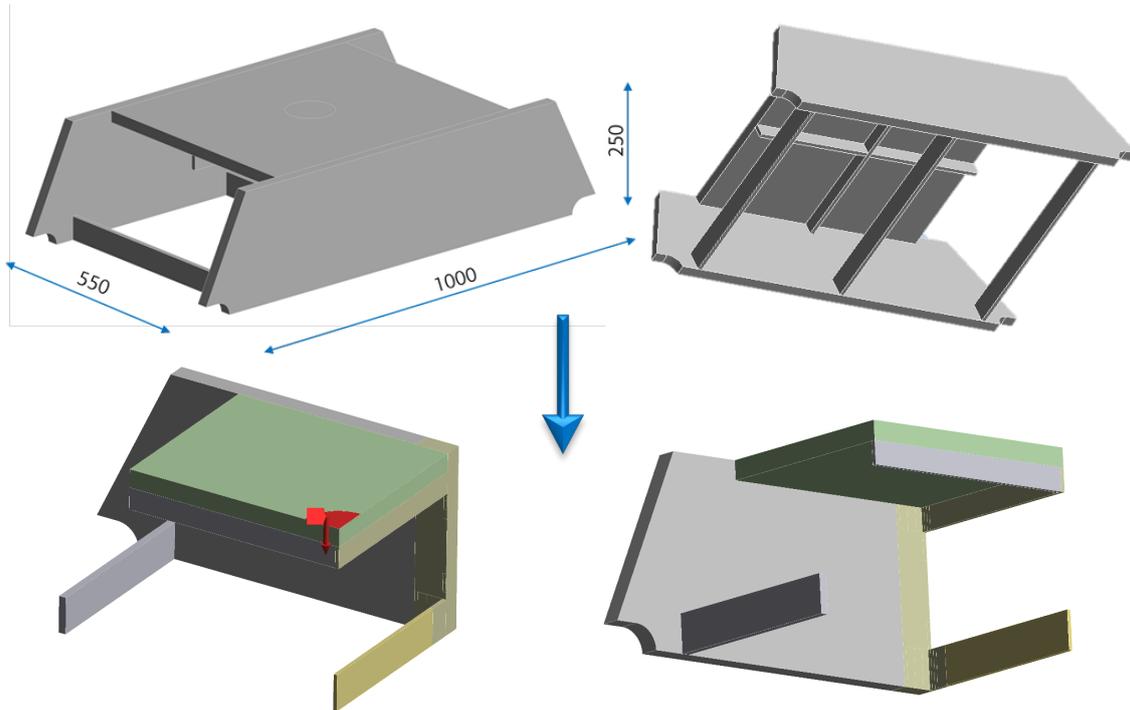
### 7.3.1 Optimización del diseño

Tal y como se ha mencionado anteriormente, la finalidad de este apartado es redimensionar el diseño conceptual del demostrador existente (véase la Ilustración 6) con el fin de que su modo de fallo principal, su geometría y las cargas aplicadas sobre él sean representativas de la prensa real, y apropiadas para su ensayo y posterior estudio.

A lo largo de este proceso, la herramienta que se ha utilizado en el diseño de la estructura ha sido el software para simulaciones de ingeniería ANSYS, basado en Métodos de Elementos Finitos (FEM). En concreto, se han realizado simulaciones estructurales bajo cargas estáticas mediante Ansys Mechanical, observando resultados de tensiones, deformaciones, desplazamientos, etc. en prácticamente cualquier punto del modelo en cuestión. Así, este proceso de optimización se ha planteado de forma que, partiendo de los resultados de la simulación del diseño simplificado inicial, se han ido creando y simulando nuevos modelos, cada uno de ellos con ciertas modificaciones respecto del anterior, cuya influencia ha sido analizada en relación con el objetivo específico de cada fase de optimización, hasta llegar al diseño final.

#### 7.3.1.1 Punto de partida

Como se ha mencionado, se parte de un prototipo simplificado de una bancada de prensa real. A la hora de realizar los cálculos estructurales correspondientes, se ha optado por simular modelos de únicamente una cuarta parte de la estructura, debido a la doble simetría de la misma, para así reducir considerablemente el coste computacional de cada simulación (Ilustración 25).



*Ilustración 25. Modelo FEM simplificado del diseño inicial*

Por otra parte, la carga aplicada a la estructura en las simulaciones ha sido de 150 kN (37,5 kN a la cuarta parte de la estructura), siendo esta la carga máxima aplicable por el banco de ensayos. Esta se aplica verticalmente en una circunferencia de 50 mm de radio, centrada en la mesa. En cuanto a la sujeción, la estructura se encuentra simplemente apoyada sobre las superficies planas horizontales de sus 4 apoyos.

Tras simular este primer modelo, se obtienen los resultados del estado tensional de la estructura (tensiones equivalentes de Von-Mises) mostrados en la Ilustración 26. Se puede observar, por un lado, que los valores de las tensiones máximas no son admisibles, y por otro, que las zonas más críticas de la estructura se hayan en ubicaciones no deseadas (redondeadas en rojo). Ya que, con el fin de representar lo más fielmente posible las condiciones de servicio de una prensa real, se desea que la zona crítica de la estructura sea la unión del travesaño inferior central con el lateral de la bancada (redondeado en verde). Sin embargo, se ve cómo las zonas con mayores tensiones son principalmente el apoyo, la unión central de los nervios de debajo de la mesa, y, la unión del nervio central con la placa lateral de la bancada, donde se encuentran los valores más críticos (Ilustración 27).

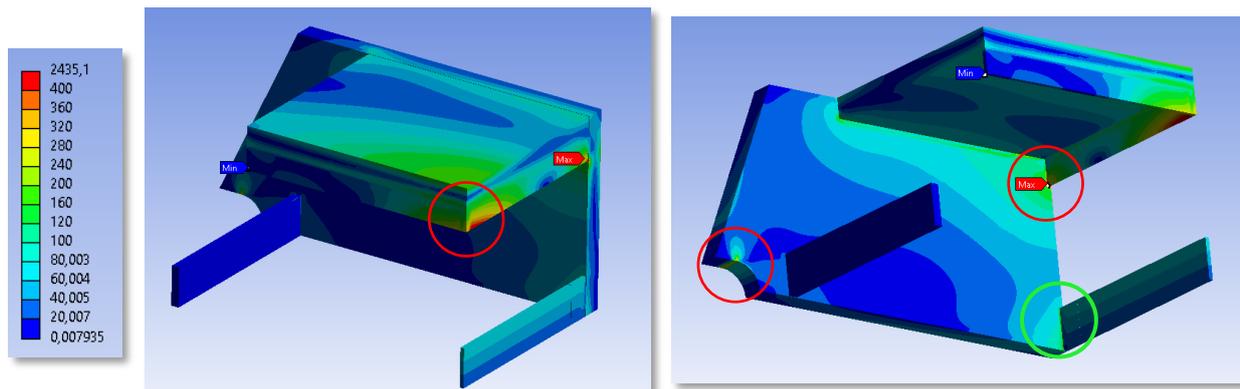


Ilustración 26. Diseño inicial. Tensión equivalente de Von-Mises [MPa]

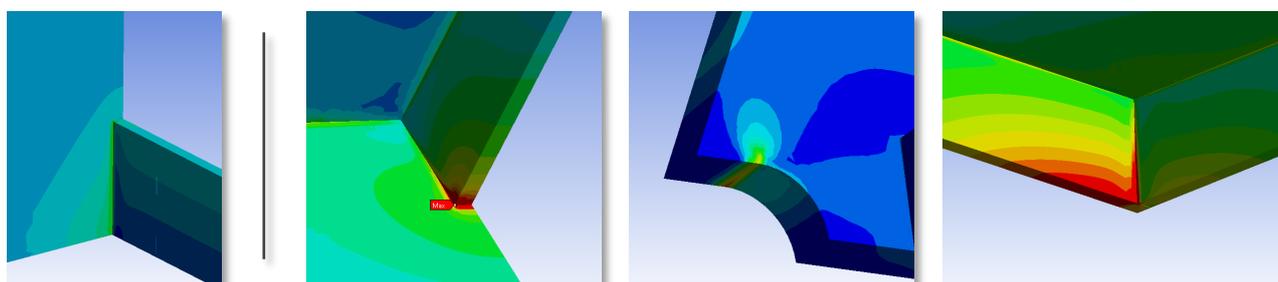


Ilustración 27. Diseño inicial. Ubicación de zona crítica deseada (izq.) y potenciales zonas críticas (dcha.)

Por consiguiente, se deciden llevar a cabo 2 fases de optimización del diseño. En la primera, el objetivo será una redistribución de tensiones en la estructura para conseguir trasladar la ubicación del punto crítico actual, a la zona deseada, la unión del travesaño central con el lateral. En la segunda, se ajustará la vida de iniciación de ese nuevo punto crítico a un tiempo viable para la realización de los ensayos, que se estima en alrededor de un día.

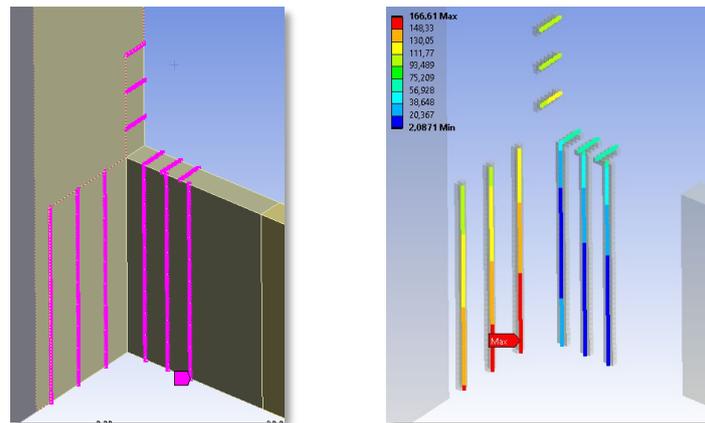
Para poder acometer dichas optimizaciones, es primordial cuantificar la vida (vida de iniciación) de los diferentes puntos y/o zonas que se estudian, para poder contar con un buen criterio a la hora de decidir cuál es el punto crítico de la estructura, ya que, únicamente el mero hecho de estar sometido a mayores valores tensionales no necesariamente significa que sea el punto más crítico de la estructura en cuanto a vida a fatiga.

En consecuencia, en aplicación de los procedimientos descritos en el apartado relativo al estado de arte de este documento, se ha establecido la siguiente metodología para el cálculo de vida a iniciación en los puntos de interés.

### 7.3.1.2 Metodología de cálculo

Todas las zonas potencialmente críticas mencionadas anteriormente a excepción del apoyo, son uniones soldadas. Por lo tanto, el primer paso será obtener las tensiones de "Hot-Spot" (HS) a lo largo de los pies de todos los cordones de soldadura de las potenciales uniones críticas. Para ello, se extraen del modelo FEM, para cada

punto de cada pie, los tensores de tensiones de todos aquellos puntos necesarios para la extrapolación del tensor de tensiones en el HS, separados a las distancias determinadas por la norma del correspondiente pie de soldadura, en función del tipo de HS y espesor del elemento. Por ejemplo, en la Ilustración 28 se muestran las tensiones de los puntos necesarios para la extrapolación de las tensiones de HS, de la totalidad de los puntos que componen cada uno de los pies de soldadura presentes en la unión del travesaño central con el lateral de la bancada.



*Ilustración 28. Tensiones en los puntos necesarios para el cálculo de las tensiones de HS en la unión del travesaño central con el lateral*

Con esta información, se lleva a cabo un postprocesado mediante el software de cálculo MatLab, con el que se obtienen dichas tensiones de HS. Asimismo, se calculan las tensiones principales para todos los puntos, y se establece como criterio de selección del punto crítico de cada pie, aquel que tenga la máxima tensión principal absoluta. Podría pensarse, que la opción más acertada hubiera sido escoger directamente el punto con la mayor tensión principal, no obstante, si el valor absoluto de alguna de ellas es mayor, aun siendo negativa, es necesario tenerla en consideración. Ya que, debidas a la presencia de la propia soldadura, en sus proximidades pudieren existir tensiones residuales de tracción mayores en magnitud que la propia tensión principal máxima, y, en el cálculo de fatiga lo que predomina es el rango de tensiones aplicado, y no el valor máximo de dicho rango.

A continuación, en la Ilustración 29 se muestra el resultado de estos cálculos para el modelo inicial. En él, pueden observarse la máxima tensión principal absoluta del punto crítico de cada pie de cada cordón de soldadura a analizar, así como el vector característico de dicha tensión principal y la posición del punto en cuestión dentro del cordón. Para poder identificar de forma clara todos los posibles pies de soldadura de la estructura, se ha establecido la nomenclatura mostrada en la Ilustración 30.

Cordón	Tensión Abs.Max.Pri.	x	y	z	Distancia
"11"	110.85	-0.99975	-0.022221	0.00014002	5
"12"	67.343	-0.010773	-0.0063946	0.99992	50
"21"	70.163	-1	-2.17e-05	2.1862e-07	5
"22"	99.092	0.098321	-0.00055263	0.99515	2
"31"	177.89	0.008546	0.99513	-0.00021059	1
"33"	467.63	-0.00089894	0.31312	0.94971	2
"41"	197.63	-3.8597e-07	-1	0.00085489	5
"43"	464.22	0.014076	-0.00033981	0.9999	2
"53"	405.78	0.0023427	-0.00051153	1	0
"54"	205.88	0.30482	-0.19995	0.93119	30

Ilustración 29. Ejemplo del resultado del postprocesado de MatLab

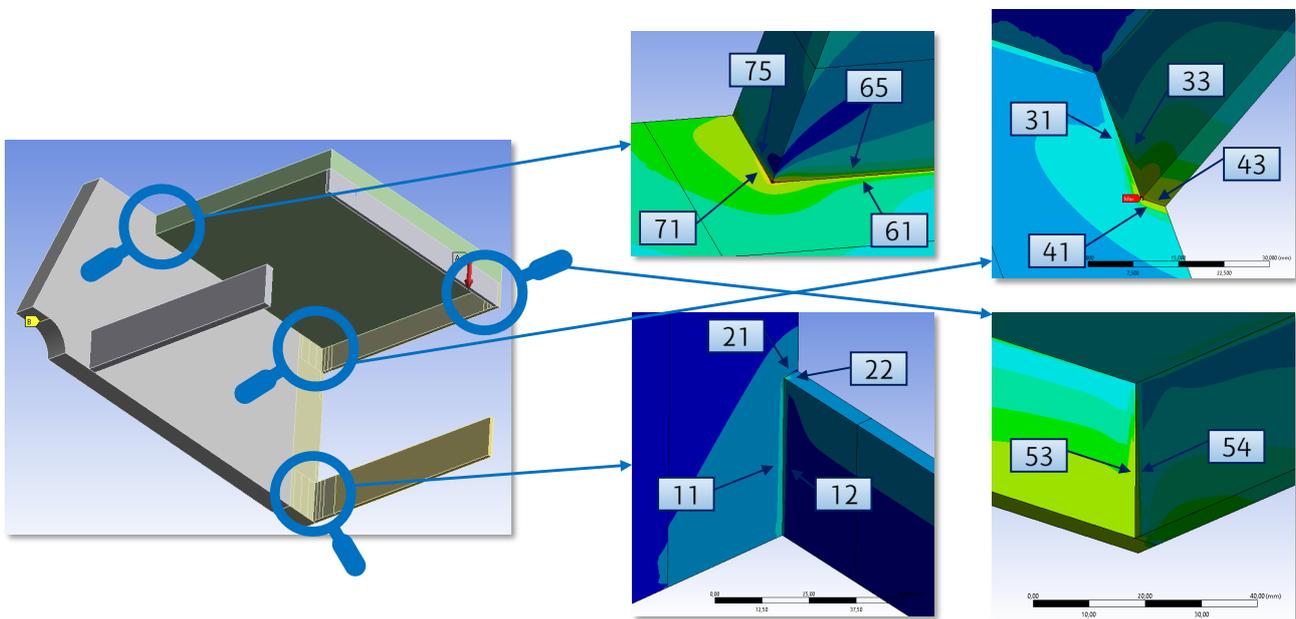


Ilustración 30. Identificación de los pies de soldadura de la estructura

Una vez obtenidas las tensiones de los puntos críticos de cada soldadura, se pueden calcular los daños ( $d_i$ ) que la aplicación de diversos bloques de carga de cierta cantidad de ciclos ( $n_i$ ), a cierto rango de tensiones ( $\Delta\sigma$ ) generarán a la unión. Para ello, se utilizarán las curvas S-N correspondientes para la clase FAT de cada soldadura (Ilustración 15). De esta manera, suponiendo varios bloques de carga y mediante la regla de acumulación de daño de Palmgren-Miner, pueden calcularse el daño total de cada bloque ( $D_{bloque}$ ) y la vida de iniciación de grieta para cada punto crítico de cada pie de cada cordón de soldadura de la estructura. En este proceso, se ha calculado la vida hasta alcanzar un daño acumulado de valor 1.

Por ejemplo, para el caso del pie 31 correspondiente a la unión entre el nervio central y el lateral de la bancada, en la Tabla 6 se muestra el cálculo de vida de iniciación recién descrito. En este ejemplo, se ha supuesto tal y como se puede observar, un bloque de carga compuesto por 36.000 ciclos a 150 kN, 36.000 ciclos a 130 kN y otros 36.000 ciclos a 120 kN, todos ellos con una ratio de 0,05 y a 10 Hz de frecuencia. Cabe recordar, que al tratarse de una única carga aplicada y al ser esta cuasiestática (no existe presencia

de efectos dinámicos), aparte de las clásicas hipótesis en los cálculos de la Resistencia y Elasticidad de Materiales (p.e. pequeñas deformaciones), todas las componentes del tensor de tensiones en cualquier punto de la estructura son proporcionales a la carga aplicada. Por lo tanto, las tensiones de los puntos de interés serán también proporcionales a la carga aplicada, por lo que no resulta necesario simular el modelo repetidamente para los diversos estados de aplicación de carga.

Por otra parte, existe la posibilidad de aplicar un tratamiento de liberación de tensiones residuales posterior a la fabricación de la estructura, en cuyo caso, la norma permite considerar únicamente un 60% del valor de las tensiones de compresión. Por lo tanto, para los cordones en los que la máxima tensión principal absoluta responda a un esfuerzo de compresión, como es el caso, la vida de la soldadura en cuestión aumentaría considerablemente. Cabe aclarar, que el signo negativo en los valores de los rangos de tensiones únicamente representa que dicho esfuerzo es de compresión, los rangos, por definición, son siempre positivos.

En ambas fases de optimización del diseño del demostrador, se ha contemplado en todo momento la posibilidad de poder aplicar dicho tratamiento, por lo que en cada caso, se han calculado dos valores de vida.

Tabla 6. Modelo inicial. Ejemplo de cálculo de vida a iniciación para el cordón 31

Daño y Vida - Punto crítico CORDÓN 31 - Modelo Inicial						
i	1	2	3	4	5	6
FAT class [MPa]	100	100	100	100	100	100
Amplitud constante?	SI	SI	SI	SI	SI	SI
F [kN]	150	140	130	120	110	100
$\Delta\sigma$ [MPa]	-168.996	-157.729	-146.463	-135.196	-123.930	-112.664
$\Delta\sigma_{60\%}$ [MPa]	-101.397	-94.637	-87.878	-81.118	-74.358	-67.598
$n_i$ [ciclos]	36,000	-	36,000	36,000	-	-
f [Hz]	10	10	10	10	10	10
$t_i$ [h]	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
$N_i$ [ciclos]	4.14E+05	5.10E+05	6.37E+05	8.09E+05	1.05E+06	1.40E+06
$N_{i_{60\%}}$ [ciclos]	1.92E+06	2.36E+06	2.95E+06	3.75E+06	4.86E+06	6.47E+06
$d_i$	8.69%	0.00%	5.66%	4.45%	0.00%	0.00%
$d_{i_{60\%}}$	1.88%	0.00%	1.22%	0.96%	0.00%	0.00%
$D_{\text{bloque}}$	18.79%					
$D_{\text{bloque}_{60\%}}$	4.06%					
$T_{\text{ini.}}$	15.97 horas		0.67 días		0.02 meses	
$T_{\text{ini.}_{60\%}}$	73.91 horas		3.08 días		0.10 meses	

Por otro lado, se encuentra el caso de que la potencial zona crítica no corresponda a una unión soldada sino a cualquier otro punto de la estructura, como es el caso de los apoyos.

Para el cálculo de vida a iniciación de estos puntos, se parte de la obtención de tensiones del modelo de elementos finitos. Como ya se explicó en el apartado del estado

del arte, se debe de calcular una tensión equivalente al estado tensional triaxial que pueda haber en cada punto. En este caso, se aplica el criterio de la máxima energía de distorsión, es decir la tensión equivalente de von Mises. Pero esta vez, a diferencia de en el caso de las soldaduras, la no presencia de tensiones residuales considerables, obliga a diferenciar entre esfuerzos de tracción y compresión. Por lo tanto, se aplica una pequeña variante que se basa en adoptar en dicha tensión equivalente, el signo de la tensión principal de mayor valor absoluto. Es decir, si la mayor tensión principal en términos absolutos es de compresión, en el cálculo se utiliza la tensión equivalente de von Mises, pero con signo negativo, considerándolo un esfuerzo de compresión. A este criterio de tensión equivalente, se le llama la tensión de von Mises con signo.

Por lo tanto, el punto crítico de cualquier zona no próxima a una soldadura, será el de mayor tensión equivalente de von Mises, delimitando dicha zona al área donde los esfuerzos principales son del mismo tipo (tracción o compresión) y el espesor del elemento no varíe.

Una vez obtenida esta tensión equivalente, con el fin de poder utilizar una sola curva S-N, se aplica la corrección de la tensión media en base al Diagrama de Haigh (Ilustración 17), y con este valor del rango de tensiones corregido, se calculan el daño y la vida de iniciación de la misma forma que para el caso anterior. La diferencia reside, en que en este caso es necesario obtener una curva S-N sintética que caracterice nuestro material, el acero estructural S275. Para ello, partiendo de las propiedades del material y el espesor del elemento en que se encuentra el punto analizado, que se muestran a continuación (Tabla 7), y siguiendo el procedimiento recogido en el Anexo II, se obtiene la curva S-N mostrada en la Ilustración 31.

Tabla 7. Parámetros de entrada para S-N sintética

Parámetro		Valor
$R_m$	Resistencia a la tracción	510 MPa
$R_{p0,2}$	Tensión de fluencia	315 MPa
R	Ratio de tensiones	-1
$\alpha_k$	Factor de concentración de tensiones	1
$R_z$	Rugosidad superficial	9 $\mu\text{m}$
$\gamma_M$	Factor de seguridad parcial del material	1,2
t	Espesor del elemento	15 mm

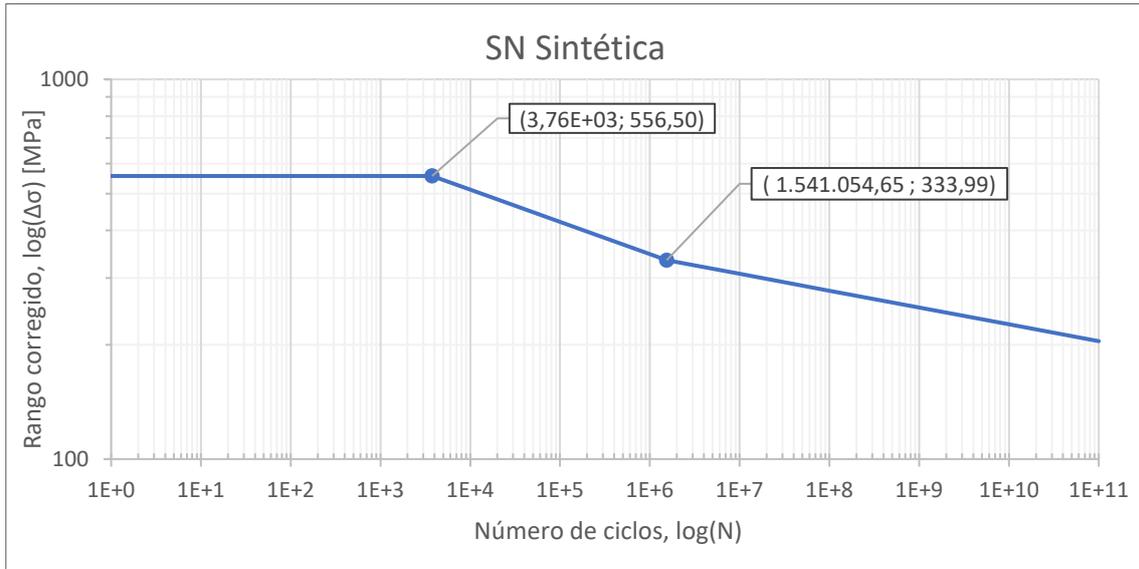


Ilustración 31. Curva S-N sintética para acero estructural S-275

A continuación, en la Tabla 8 se muestra como ejemplo el cálculo de vida a iniciación realizado para el punto crítico del apoyo del modelo inicial.

Tabla 8. Modelo inicial. Ejemplo de cálculo de vida a iniciación del apoyo

Daño y Vida - APOYO - Modelo INICIAL						
i	1	2	3	4	5	6
F [kN]	150	140	130	120	110	100
$\sigma$ [MPa]	-411.29	-383.87	-356.45	-329.03	-301.61	-274.19
$n_i$ [ciclos]	36,000	-	36,000	36,000	-	-
f [Hz]	10	10	10	10	10	10
$t_i$ [h]	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
R	20	20	20	20	20	20
$\Delta\sigma$ [MPa]	390.73	364.68	338.63	312.58	286.53	260.48
$\pm \sigma _{\min}$ [MPa]	-20.56	-19.19	-17.82	-16.45	-15.08	-13.71
$\pm \sigma _{\max}$ [MPa]	-411.29	-383.87	-356.45	-329.03	-301.61	-274.19
$\sigma_{\text{mean}}$ [MPa]	-215.93	-201.53	-187.14	-172.74	-158.35	-143.95
$\sigma_{\text{amplitud}}$ [MPa]	195.36	182.34	169.31	156.29	143.27	130.24
$\sigma_{a,R=0}$ [MPa]	183.49	171.25	159.02	146.79	134.56	122.32
$\sigma_{a,\text{corregida}}$ [MPa]	177.93	166.07	154.21	142.35	130.49	118.62
$\Delta\sigma_{\text{corregido}}$ [MPa]	355.87	332.14	308.42	284.70	260.97	237.25
$N_i$ [ciclos]	4.00E+05	9.01E+05	2.94E+06	1.79E+07	1.27E+08	1.09E+09
$d_i$	9.01%	0.00%	1.23%	0.20%	0.00%	0.00%
$D_{\text{ciclo}}$	10.43%					
$T_{\text{ini.}}$	28.75 horas	1.20 días		0.04 meses		

### 7.3.1.3 Primera fase: redistribución tensional de la estructura

Tal y como se indicaba en el ejemplo de cálculo recogido en la Tabla 6, en esta primera fase de optimización de la estructura, la carga aplicada será un bloque repetido periódicamente compuesto por 36.000 ciclos a 150 kN, 36.000 ciclos a 130 kN y otros 36.000 ciclos a 120 kN, todos ellos con una ratio de 0,05 y a 10 Hz de frecuencia.

En estas condiciones y aplicando la metodología expuesta, se calculan las vidas de iniciación en fatiga de todas las zonas potencialmente críticas mencionadas (Tabla 9).

Tabla 9. Modelo inicial. Vidas de iniciación

	VIDA A INICIACIÓN EN FATIGA - Modelo Inicial - [días]										
	Soldaduras										No soldaduras
	11	12	21	22	31	33	41	43	53	54	Apoyo
$T_{ini}$	2.75	20.80	14.66	3.85	0.67	0.04	0.49	0.04	0.06	1.34	1.20
$T_{ini, s.rel.}$	2.75	20.80	14.66	3.85	3.08	0.17	2.25	0.17	0.06	1.34	

Como se puede observar, el pie donde se desea ubicar el punto crítico de la estructura, el 11, tiene una vida notablemente superior a otros puntos de la estructura situados en las soldaduras 3, 4 y 5, correspondientes a las uniones del nervio central con el lateral y la de los nervios debajo de la mesa.

Posteriormente, se han realizado diversas modificaciones en base al modelo inicial, evaluando en cada iteración la influencia de cada una de ellas en la consecución del objetivo de esta fase, redistribuir las tensiones para trasladar la ubicación del punto crítico de la estructura a la zona de interés. Como resultado, se deciden aplicar una serie de cambios estructurales reunidos en la siguiente tabla.

Tabla 10. Modificaciones estructurales en optimización 1

Modificación	Valor inicial	Valor final
Ampliar grosor de la mesa	25 mm	35 mm
Retirar nervios	-	-
Elemento de aplicación de carga	-	-
Reducir espesor del lateral	25 mm	20 mm
Disminuir altura de la bancada	250 mm	210 mm
Introducir apoyos modelados	-	-
Reducir altura del travesaño central	50 mm	40 mm
Reducir longitud de la mesa	550 mm	390 mm

Tras la aplicación de estas modificaciones, en la Ilustración 32 se muestra el modelo resultante de la primera fase de optimización. De igual forma, se recalculan las vidas de iniciación de los mismos puntos analizados al principio del proceso, o en su caso, de los equivalentes tras los cambios en la geometría. Asimismo, en la Ilustración 33 se muestra el estado tensional de dichas zonas, y, en la Tabla 11 se recogen los resultados obtenidos.

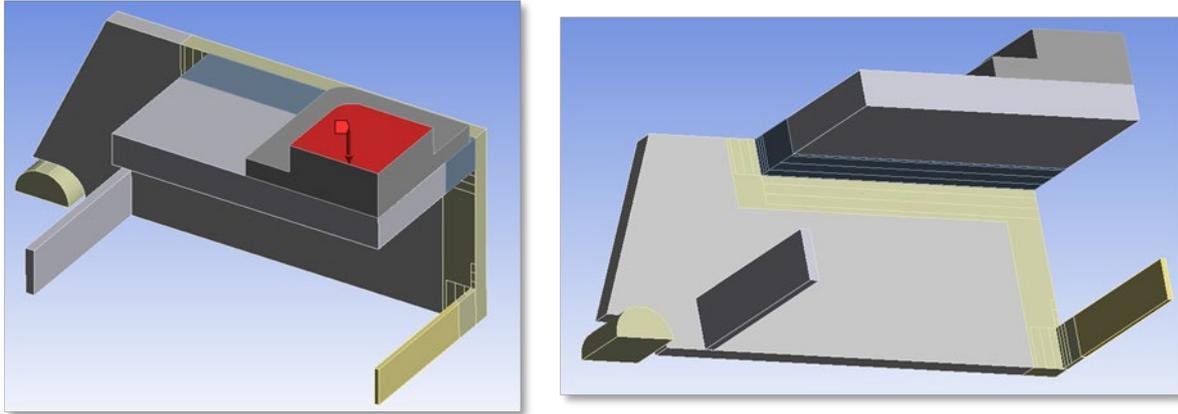


Ilustración 32. Modelo final de la optimización 1

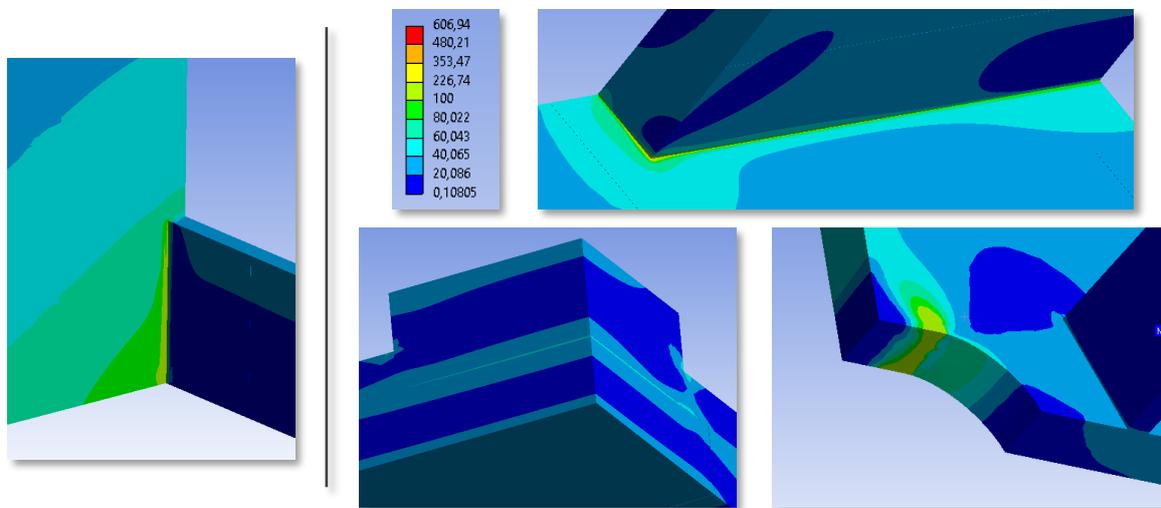


Ilustración 33. Modelo final optimización 1. Potenciales zonas críticas

Tabla 11. Modelo final optimización 1. Vidas de iniciación

	VIDA A INICIACIÓN EN FATIGA - Fin Optimización 1 - [días]									
	Soldaduras								No soldaduras	
	11	12	21	22	61	65	71	75	Apoyo	Mesa
$T_{ini}$	4.18	3.0E+05	27.99	8.3E+05	6.44	4.0E+06	6.98	23.26	8.1E+04	4.9E+23
$T_{ini, s.rel.}$	4.18	2.3E+10	27.99	8.3E+05	3.2E+03	3.1E+11	5.6E+03	23.26		

Como resultado de esta fase de optimización, se observa cómo efectivamente el punto crítico de la estructura pasa a ubicarse en el pie 11, manteniendo una diferencia en cuanto a vida del 54% y 67% respecto a las siguientes zonas más críticas de la estructura, los cordones 61 y 71 respectivamente. Al mismo tiempo, la criticidad de zonas como el apoyo o el punto central de debajo de la mesa dejan de ser relevantes.

#### 7.3.1.4 Segunda fase: ajustar la vida del punto crítico

A pesar de haber conseguido posicionar el punto crítico en la zona de interés, esto se ha conseguido en parte a costa de aumentar la vida de la estructura en general, o, dicho de otra forma, haciendo desaparecer las zonas que previamente eran críticas.

Por lo tanto, en esta segunda fase del proceso se buscará la disminución de la vida de dicho punto a como máximo en torno a 1 día, manteniendo una diferencia razonable con respecto al resto.

Por otra parte, en esta fase se ha pasado a tener en cuenta que el banco de ensayos está limitado a un máximo de 6 Hz en la frecuencia de aplicación de la carga. Este hecho influye negativamente en la finalidad de la optimización, por lo que se ha tenido a bien duplicar el número de ciclos aplicados a la máxima carga. En consecuencia, esta es la secuencia aplicada en el bloque de carga, en este caso, con una ratio de 0:

- 72.000 ciclos a 150 kN y 6 Hz
- 36.000 ciclos a 130 kN y 6 Hz
- 36.000 ciclos a 120 kN y 6 Hz

Teniendo en cuenta esta variación de la carga en el cálculo de vida de las zonas críticas, en la Tabla 12 se reúnen los valores iniciales para esta segunda fase de optimización del diseño. Como se puede comprobar, la disminución de la frecuencia de aplicación de la carga aun aumentando el número de ciclos a la carga máxima, aumenta en más de un día la vida de iniciación del cordón 11.

Tabla 12. Modelo inicial optimización 2. Vidas de iniciación

	VIDA A INICIACIÓN EN FATIGA - Fin Optimización 1 - [días]									
	Soldaduras								No soldaduras	
	11	12	21	22	61	65	71	75	Apoyo	Mesa
$T_{ini}$	5.45	1.1E+05	25.87	3.1E+05	8.39	1.5E+06	9.09	21.03	2.9E+04	1.9E+23
$T_{ini, s.rel.}$	5.45	8.4E+09	25.87	3.1E+05	1.2E+03	1.1E+11	2.1E+03	21.03		

Al igual que en la fase anterior, en esta se han realizado ciertas modificaciones en la estructura analizando el efecto causado en las vidas de las zonas de interés, sobre todo los cordones de soldadura 11, 61 y 71. Los parámetros geométricos principales con los que se ha jugado en este proceso han sido la altura y la longitud de la bancada, el grosor de la mesa y la placa lateral, la altura y posición de los travesaños inferiores, y las geometrías de los apoyos y el elemento de aplicación de la carga. Así, en la Tabla 13 se muestra la evolución habida en esta fase de optimización, calculando en cada iteración de la misma las vidas a iniciación en todos los pies de soldadura, así como comparando dichos valores con respecto a los valores iniciales del proceso.

Tabla 13. Evolución de optimización 2

		Vida de iniciación [días]							Vidas respecto a 11			
		11	12	21	22	61	65	71	75	11 vs Inicial	61	71
<b>Fin Opt. 1</b>		<b>5.45</b>	<b>1.1E+05</b>	<b>25.87</b>	<b>3.1E+05</b>	<b>8.39</b>	<b>1.5E+06</b>	<b>9.09</b>	<b>21.03</b>	<b>0%</b>	<b>54%</b>	<b>67%</b>
Iter. 1	Apoyo 1	4.76	3.0E+04	19.23	2.7E+05	6.81	2.9E+05	7.00	12.12	-13%	43%	47%
Iter. 2	Chapa	5.49	1.1E+05	26.21	3.8E+05	8.38	1.6E+06	9.07	20.04	1%	53%	65%
Iter. 3	Apoyo+Chapa	4.84	3.2E+04	19.97	3.4E+05	6.84	3.1E+05	7.02	12.12	-11%	41%	45%
Iter. 4	Solo chapa larga	4.32	4.6E+04	16.41	4.3E+03	7.47	2.5E+05	8.22	18.42	-21%	73%	90%
Iter. 5	Apoyo 2	5.24	7.4E+04	23.97	3.0E+05	7.80	7.4E+05	8.25	16.91	-4%	49%	57%
Iter. 6	Lateral de 20 a 15	3.33	3.5E+02	10.73	4.6E+05	3.84	1.9E+06	4.13	10.23	-39%	16%	24%
Iter. 7	Altura de 210 a 250	14.65	2.8E+07	1229.75	2.9E+06	19.59	1.1E+08	28.74	912.61	169%	34%	96%
Iter. 8	Angulo de 115 a 125	4.47	1.6E+04	17.16	2.5E+05	6.21	1.4E+05	6.24	10.49	-18%	39%	40%
Iter. 9	Mesa de 35 a 30	4.33	3.8E+04	16.50	5.9E+03	6.99	3.7E+03	7.57	13.31	-20%	61%	75%
Iter. 10	COMBO 1	2.07	30.90	6.53	3.9E+03	2.34	1.2E+04	2.34	5.22	-62%	13%	13%
Iter. 11	COMBO 2	1.93	28.70	6.06	3.1E+03	2.65	2.9E+04	2.53	5.71	-65%	37%	31%
Iter. 12	COMBO 3	1.93	28.76	6.08	3.1E+03	2.85	3.5E+04	2.74	5.75	-65%	48%	42%
Iter. 13	COMBO 4	1.03	11.41	2.93	9.96	1.52	12.59	1.55	3.28	-81%	47%	50%
Iter. 14	COMBO 5	0.73	8.24	1.96	4.94	0.79	4.33	1.20	2.34	-87%	8%	65%
Iter. 15	COMBO 4 + Apoyo 3	1.23	14.87	3.48	10.28	1.61	13.39	1.65	3.64	-77%	30%	34%
Iter. 16	COMBO 4 + Apoyo 4	0.91	10.04	2.58	9.49	1.47	12.95	1.45	3.41	-83%	62%	60%
Iter. 17	COMBO 4 + Apoyo 6	0.86	9.45	2.47	9.45	1.24	10.63	1.21	2.90	-84%	44%	40%
<b>FINAL</b>	<b>Iter. 17 + R = 0,05</b>	<b>1.01</b>	<b>11.01</b>	<b>2.88</b>	<b>11.02</b>	<b>1.45</b>	<b>12.39</b>	<b>1.41</b>	<b>3.23</b>	<b>-81%</b>	<b>44%</b>	<b>40%</b>

Como se puede observar, volviendo a ajustar la ratio de la fuerza aplicada a 0,05 para el último diseño, se ha alcanzado una reducción de vida del 81% en el punto de interés, perteneciente al pie de soldadura 11, cumpliendo el objetivo fijado de reducir la vida de dicho punto a aproximadamente un día. Del mismo modo, se ha conseguido mantener un margen razonable en cuanto a los siguientes puntos más críticos de la estructura, soldaduras 61 y 71, de un 44% y un 40% respectivamente, frente a unos 54% y 67% iniciales.

Para ello, la combinación de modificaciones realizada en esta última iteración del diseño ha sido la siguiente:

Tabla 14. Modificaciones estructurales en optimización 2

Modificación	Valor inicial	Valor final
Reducir grosor de la mesa	35 mm	25 mm
Apoyo	-	-
Elemento de aplicación de carga	-	-
Reducir espesor del lateral	20 mm	15 mm
Aumentar longitud de la bancada	1000 mm	1100 mm
Reducir anchura de la mesa	390 mm	380 mm
Reducir altura del travesaño lateral	50 mm	30 mm

En consecuencia, en la Ilustración 34 se muestra el modelo resultante de esta optimización. Asimismo, en la Ilustración 35 se pueden ver los estados tensionales de las inicialmente potenciales zonas críticas de la estructura. Y, por último, en la Tabla 15 se recogen las vidas de iniciación de fallo finales de las zonas analizadas.

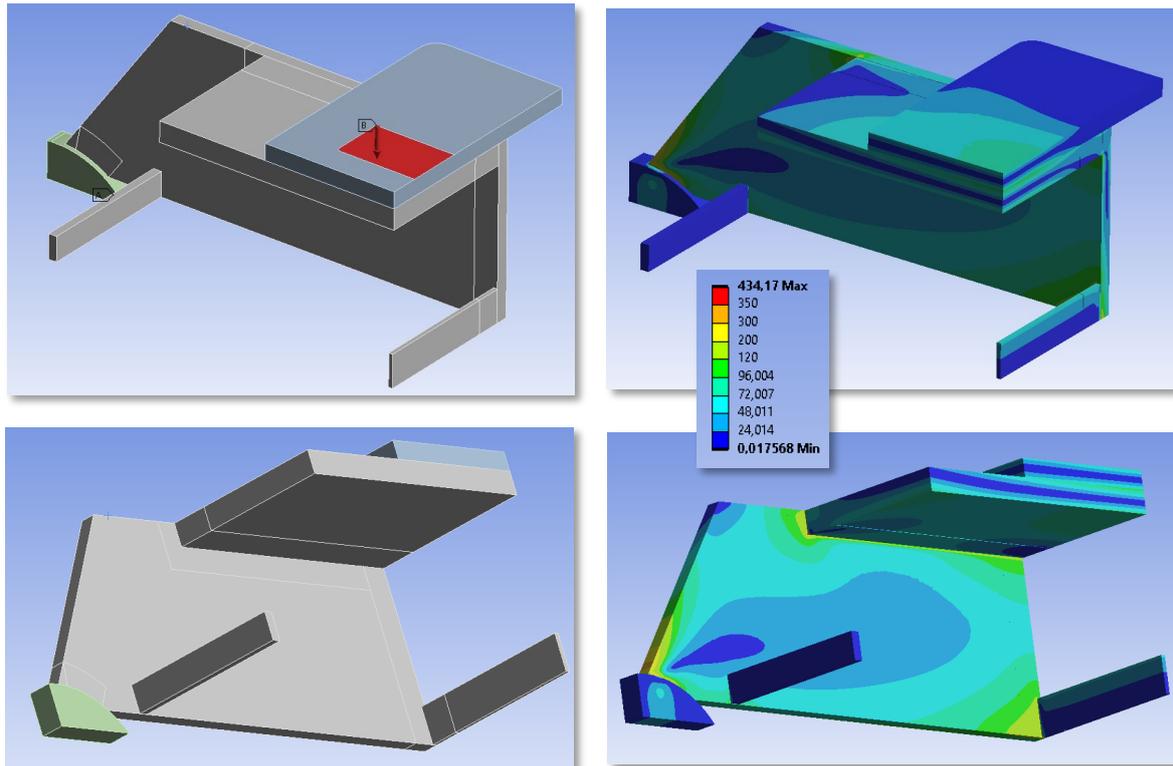


Ilustración 34. Modelo final de la optimización 2

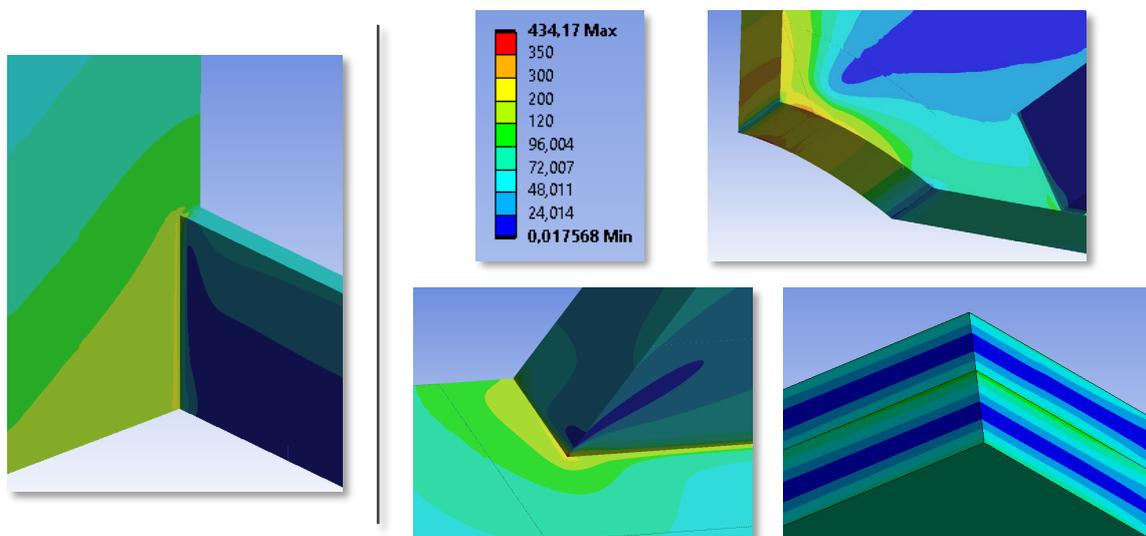


Ilustración 35. Modelo final optimización 2. Potenciales zonas críticas

Tabla 15. Modelo final optimización 2. Vidas de iniciación

VIDA A INICIACIÓN EN FATIGA - Fin Optimización 2 - [días]										
	Soldaduras								No soldaduras	
	11	12	21	22	61	65	71	75	Apoyo	Mesa
$T_{ini}$	1.01	11.01	2.88	11.02	1.45	12.39	1.41	3.23	4.51	5.8E+13
$T_{ini, s.rel.}$	1.01	8.4E+03	2.88	11.02	6.71	2.0E+04	6.55	3.23		

### 7.3.1.5 Diseño final

En conclusión, se puede afirmar que se han cumplido ambos objetivos de la optimización del diseño de la estructura. Por un lado, el punto crítico de la estructura se ubica en el pie perteneciente al lateral del cordón de soldadura vertical de la unión entre el travesaño central y el lateral de la bancada (cordón 11), situado a 4 cm de altura desde la parte inferior. Por otro, la vida a iniciación de grieta en fatiga de dicho punto se estima en 1,01 días, manteniendo una diferencia relativa de como mínimo un 40% respecto al resto de puntos analizados. Para conseguirlo, el bloque de carga diseñado a aplicar hasta la inadmisibilidad del fallo en la estructura, será el siguiente:

- 72.000 ciclos a 150 kN, 6 Hz y  $R = 0,05$
- 36.000 ciclos a 130 kN, 6 Hz y  $R = 0,05$
- 36.000 ciclos a 120 kN, 6 Hz y  $R = 0,05$

Adicionalmente, se ha introducido una pequeña modificación en la geometría de los apoyos, que consta de una parte añadida con un orificio pasante, con el fin de poder amarrar la estructura debidamente al banco de ensayos mediante unos tornillos (Ilustración 36). En cualquier caso, este cambio no afecta de ningún modo en lo que atañe a la vida a fatiga de la estructura.



*Ilustración 36. Diseño final de los apoyos*

En consecuencia, en la Ilustración 37 se muestra el modelo final de la estructura sobre la base del banco de ensayos, al cual se atornillarán los apoyos recién mencionados.

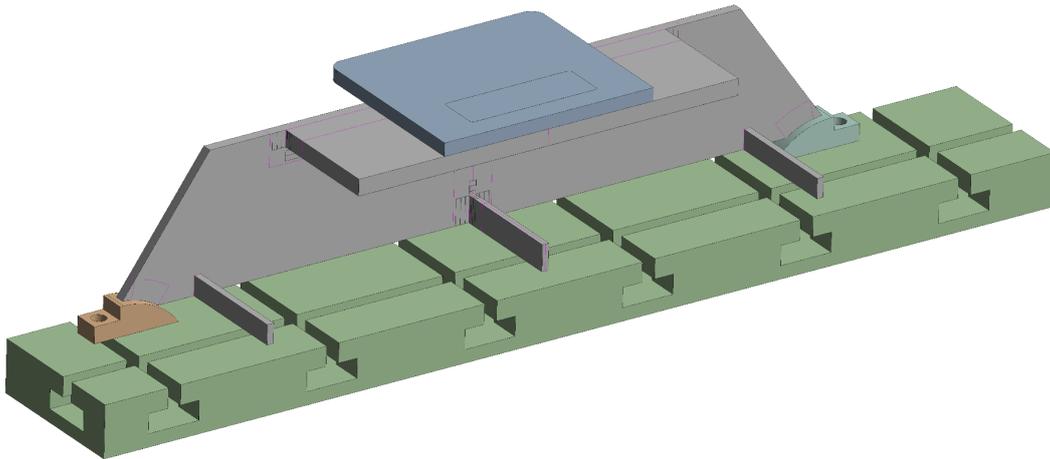


Ilustración 37. Modelo final de la estructura

Para finalizar, se han dibujado los planos de la estructura final recogidos en el Anexo I de este documento, y, asimismo, se ha solicitado a una empresa externa la fabricación de dicha estructura. A continuación, se muestran las imágenes del demostrador de la bancada real.

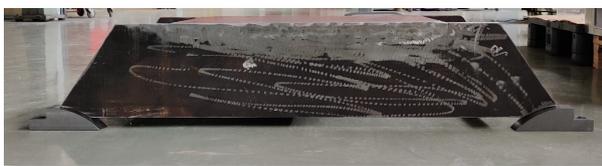


Ilustración 38. Imágenes del demostrador real fabricado

### 7.3.2 Sensorización

Una vez finalizado el diseño del demostrador, se pasa a elaborar una propuesta para la monitorización de todos los parámetros que el gemelo digital empleará como inputs en el cálculo de vida a fatiga de la estructura. Tal y como se ha mencionado, esto incluye la selección de los sensores a emplear, su ubicación y su instalación, así como la selección de todo el hardware que ello precise para la adquisición de los datos y el diseño de las conexiones pertinentes.

Así, para todos los posibles tipos de input, se emplearán las tarjetas de adquisición de datos o módulos de la serie CompactRIO de ©National Instruments, las cuales ofrecen una gran variedad de opciones en la adquisición de datos y control de sistemas. Esta combinación de módulos seleccionados compartirá un mismo chasis (Ilustración 39) mediante el cual se realizarán las conexiones pertinentes con un ordenador para el procesamiento y análisis de estos datos, mediante los softwares correspondientes.



Ilustración 39. Sistema CompactRIO de ©National Instruments

Los tres elementos de entrada que se desean monitorizar para el funcionamiento del gemelo son las tensiones en el plano de la grieta y las potenciales zonas críticas, la posición y el tamaño de grieta en todo momento, y, por último, la fuerza aplicada a la estructura. A continuación, se describe la sensorización propuesta para cada uno de estos parámetros.

#### 7.3.2.1 Tensiones

Esta variable resulta necesaria para el cálculo de daño acumulado en iniciación, como para los modelos de crecimiento de grieta. En este caso en concreto, se focaliza el interés en una zona específica de la bancada: la unión soldada entre el travesaño central y la placa lateral de la estructura, zona crítica de la misma. Resulta evidente, la imposibilidad de la colocación física de sensores reales en dicha zona, ya que la estructura se agrietará en esa parte. Por lo tanto, se plantea la instalación de sensores virtuales en los puntos de interés, los cuales se alimentarán de sensores reales ubicados en otros puntos de la estructura.

El método que se pretende emplear para la sensorización virtual, es el de la relación lineal con incertidumbre (véase 5.3 Sensorización Virtual), por lo que la tensión

se mide indirectamente mediante galgas extensiométricas, las cuales ofrecen medidas de deformación en un punto. Conociendo la rigidez del material, mediante el módulo de Young, se puede deducir la tensión correspondiente a esa deformación.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Los sensores virtuales consisten entonces en galgas extensiométricas virtuales, mediante las cuales se pueden obtener medidas de tensión. El tensor de tensiones en un punto tiene seis componentes (tres tensiones normales y tres cortantes). Es importante entonces definir qué componentes de tensión resultan de interés, tanto para medirlos con las galgas reales, como para estimarlos con los sensores virtuales. En el caso de la unión que se estudia en esta estructura, la tensión predominante en las soldaduras, y por tanto la que marcará su vida a fatiga, es la tensión normal en dirección horizontal (eje x en la imagen del modelo).

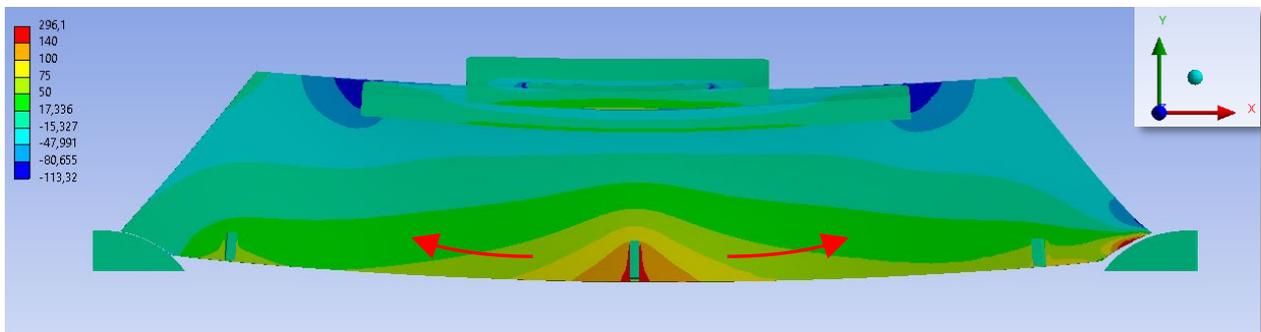


Ilustración 40. Modelo final. Tensión normal en X en MPa (estructura deformada x58)

Tras realizar múltiples pruebas en un entorno virtual, utilizando un modelo de elementos finitos del prototipo, se ha llegado a la conclusión de que ubicar 4 galgas extensiométricas unidireccionales en las caras exteriores de las placas laterales de la bancada, 2 en cada una y de forma simétrica, permite obtener estimaciones de deformaciones precisas en los puntos de interés.

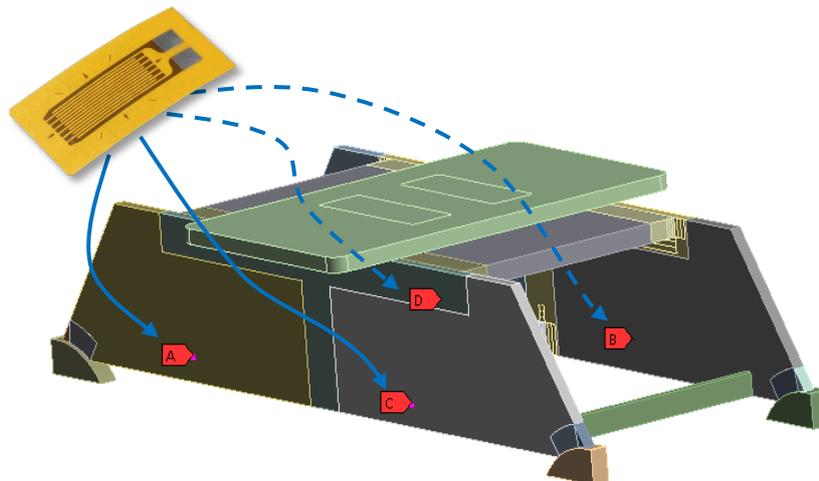


Ilustración 41. Ubicación de las galgas extensiométricas

Concretamente, las galgas extensiométricas a utilizar son las FLA-2-23-5LT de ©TML, cuyas especificaciones generales se muestran en la Ilustración 42.

TYPE		FLA-2-23-5LT	
LOT NO.	C50541A	GAUGE LENGTH	2 mm
GAUGE FACTOR		2.1611 ±1 %	
GAUGE RESISTANCE	120±0.5.5 Ω	QUANTITY	10
TEMP. COMPENSATION FOR	23 ×10 <sup>-6</sup> /°C	TEST CONDITION	23°C 50%RH
TRANSVERSE SENSITIVITY	0.4 %	BATCH NO.	R113F
LEAD WIRES			
10/0.12 3W 5m			

Ilustración 42. Especificaciones de las galgas FLA-2-23-5LT

Para la adquisición de datos de estas galgas, se plantea utilizar las tarjetas NI-9235 (Ilustración 44) de ©National Instruments. Estas, se basan en el circuito de puente de Wheatstone (Ilustración 43), un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. La ecuación por la que se rige el puente de Wheatstone es la siguiente:

$$e = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E$$

donde:

- e Voltaje de salida
- E Voltaje de excitación
- R<sub>1</sub> Resistencia de la galga
- R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> Resistencias fijas

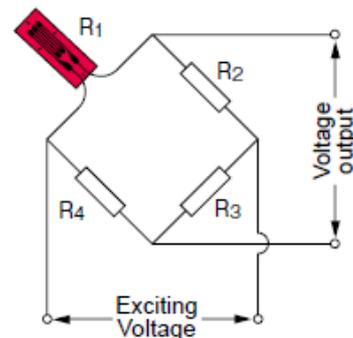


Ilustración 43. Circuito de puente de Wheatstone

En el caso de la tarjeta de adquisición NI 9235, la configuración empleada es la de cuarto de puente de 120 Ω, lo que significa que se pueden conectar directamente las galgas a la tarjeta tal y como se muestra en el circuito de la Ilustración 44.

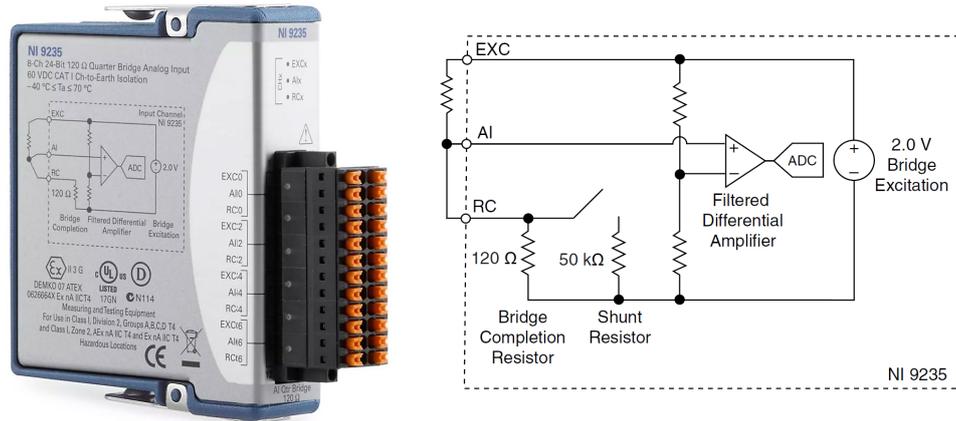


Ilustración 44. Tarjeta NI 9235

### 7.3.2 Posición y tamaño de grieta

Dado que el modo de fallo principal de la bancada de la prensa, y en consecuencia la del demostrador, es la aparición y propagación de grietas a fatiga, se considera una variante del gemelo digital que cuente con información sobre la evolución de la grieta en cuestión a tiempo real. Para ello, se desean monitorizar el punto y momento exactos donde se inicia la fisura, así como la dirección en la que se propaga y su tamaño en todo momento.

Tras analizar brevemente las diferentes opciones disponibles en el mercado para la sensorización de grietas, se ha optado por emplear las galgas de detección de fisuras RDS de ©HBK. En general, el funcionamiento de dichas galgas es sencillo; están compuestas por numerosas resistencias en forma de hilos colocadas en paralelo, que se van rompiendo según aumenta el tamaño de la grieta, y, en consecuencia, cambiando el valor de la resistencia equivalente de dicha galga.

En concreto, existirán dos variantes dentro de la sensorización de los tamaños de grieta, para los cuales se utilizarán dos modelos de galgas y dos formas de conexiones diferenciadas:

- *Galgas de hilos no independientes*

En este caso, al contrario del tipo de galga que se expone en el próximo punto, las resistencias no se pueden conectar en circuitos diferenciados, sino que están todas integradas dentro de la misma galga conectadas en paralelo, dando como resultante una resistencia equivalente que irá aumentando según se propague la grieta y se vayan rompiendo los hilos. Por lo tanto, no es posible saber el punto exacto donde se encuentra la grieta, ni la dirección en la que se propaga. Solamente se obtiene la información de la dimensión que abarca la fisura en el espacio comprendido bajo la galga.

$$R_{eq.} = \frac{R_i}{n}$$

donde:

$R_{eq}$  Resistencia equivalente de la galga  
 $R_i$  Resistencia de cada hilo  
 $n$  Número de hilos intactos

El modelo de galga concreto a utilizar es el RDS 17.8 (Ilustración 45) cuyas especificaciones se recogen en la Tabla 16.

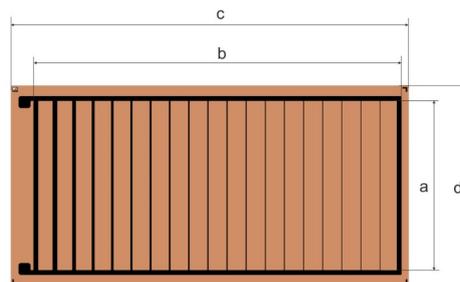


Ilustración 45. Galga de propagación de grietas RDS 17.8

Tabla 16. Especificaciones de la galga RDS 17.8

Product number of standard types	Resistance per link $\Omega$	Dimensions (mm)				Pitch link center/ link center (mm) t	Number of torn links	Max. perm. effective excitation voltage
		Link length a	Meas. grid width b	Meas. grid carrier c   d				
1-RDS17.8	3.5	17.8	38.75	21	41.6	2	20	–

La adquisición de datos para esta galga se hará de la misma forma que para las galgas extensiométricas uniaxiales expuestas en el apartado anterior, es decir, mediante un cuarto de puente de Wheatstone de 120  $\Omega$  y la tarjeta NI 9235 de ©National Instruments. Pero en este caso, la resistencia equivalente de la galga no está centrada en los 120  $\Omega$  requeridos para su correcta medición. Por lo tanto, se debe completar la galga en cuestión mediante dos resistencias adicionales que se añaden formando un pequeño circuito tal y como se muestra en la Ilustración 46. De esta manera, se consigue que según se vayan desgarrando los hilos, la resistencia equivalente que representa dicho circuito vaya experimentando pequeños incrementos, todos ellos próximos a los 120  $\Omega$  necesarios.

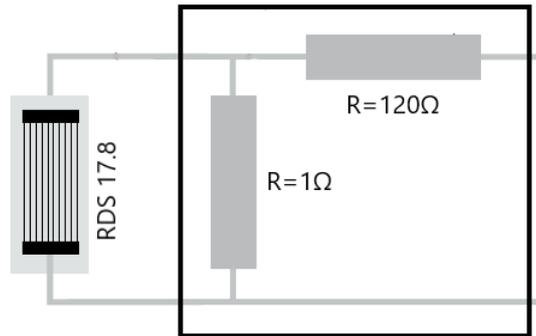


Ilustración 46. Circuito adicional para la galga RDS 17.8

Por consiguiente, se obtiene una variación de la tensión de salida del puente de Wheatstone, consiguiendo un output representativo de la propagación de la grieta, tal y como se muestra en la Ilustración 47.

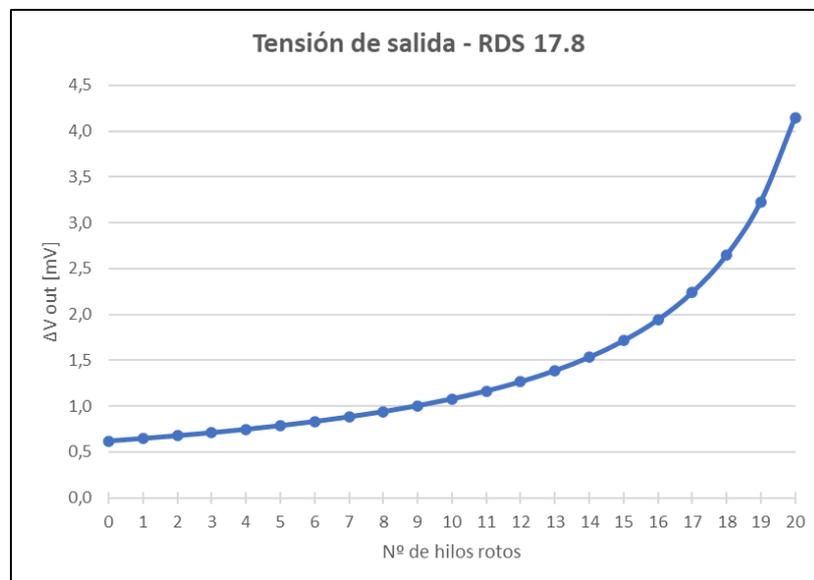


Ilustración 47. Output de la adquisición de datos de la galga RDS 17.8

- *Galgas de hilos independientes*

Es el tipo de galga que nos dota de mayor nivel de información. En estas, al contrario que en el caso anterior, cada hilo se encuentra diferenciado de los demás pudiendo así conectarlos independientemente formando circuitos diferenciados. De esta manera, se puede saber dentro de la propia galga qué hilo es concretamente el que se ha roto, y así conocer el punto exacto ( $\pm 0,575$  mm) donde ha iniciado la grieta, así como su dirección o direcciones de propagación.

El modelo de galga concreto a utilizar es el RDS 20 (Ilustración 48) cuyas especificaciones se recogen en la Tabla 17.

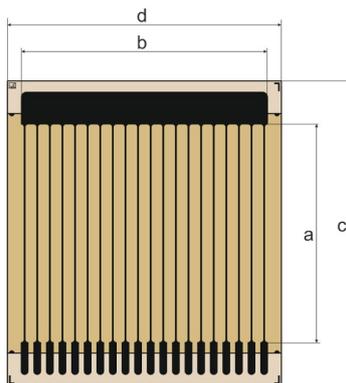


Ilustración 48. Galga de propagación de grietas RDS 20

Tabla 17. Especificaciones de la galga RDS 20

Product number of standard types	Resistance per link $\Omega$	Dimensions (mm)				Pitch link center/ link center (mm) t	Number of torn links	Max. perm. effective excitation voltage
		Link length a	Meas. grid width b	Meas. grid carrier c	d			
1-RDS 20	13	20	22.5	28	25	1.15	20	–

En cuanto a la adquisición de datos para estas galgas, el método idóneo sería poder crear un circuito independiente para cada hilo de cada sensor, contando así con la información más detallada posible de la grieta. Sin embargo, dada la ingente cantidad de hilos a conectar (80 hilos) y el material de adquisición disponible, se propone dividir cada galga de este tipo en cuatro conjuntos de hilos, formado cada uno de ellos por entre 2 y 7 resistencias en paralelo según el caso. De esta forma, cada grupo de hilos funcionará como una galga de hilos no independientes (véase más atrás), y aunque no se pueda contar con la ubicación exacta de la grieta en un primer momento tras la iniciación de la grieta, se establecen 4 "checkpoints" a lo largo del sensor mediante los cuales según se rebase uno de ellos, se podrá deducir el punto de iniciación aproximado.

La tarjeta de adquisición a emplear en este caso es la misma que en los casos anteriores, la NI 9235 (Ilustración 44), y la conexión entre la galga y esta se hará considerando cada uno de los 4 grupos de hilos como si de una galga de hilos no independientes se tratara. En la Ilustración 49 se muestra un esquema de los circuitos formados para estas galgas.

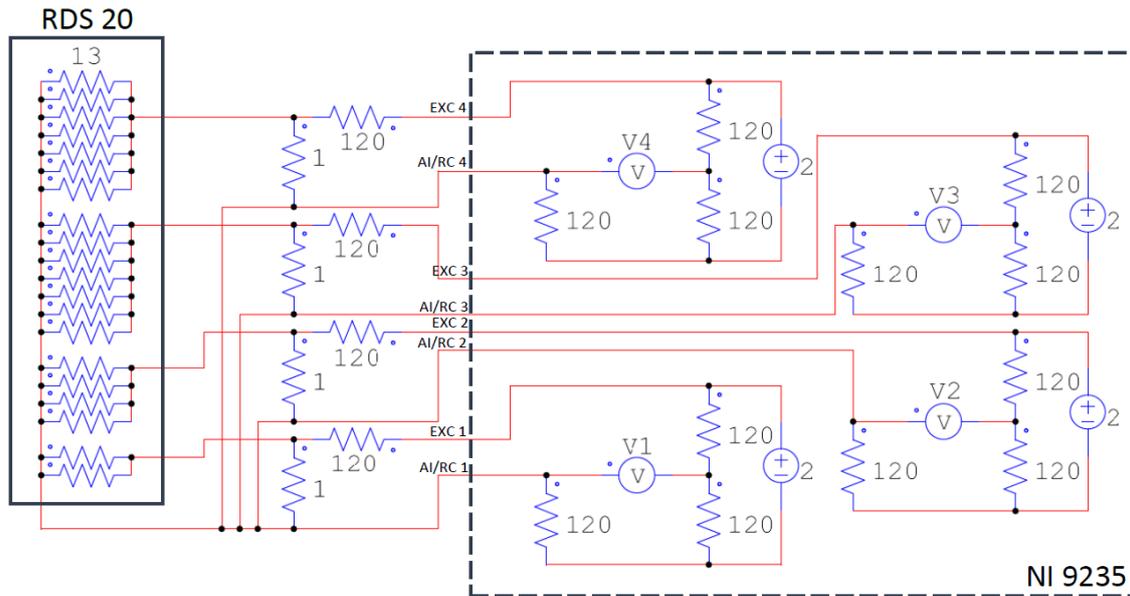


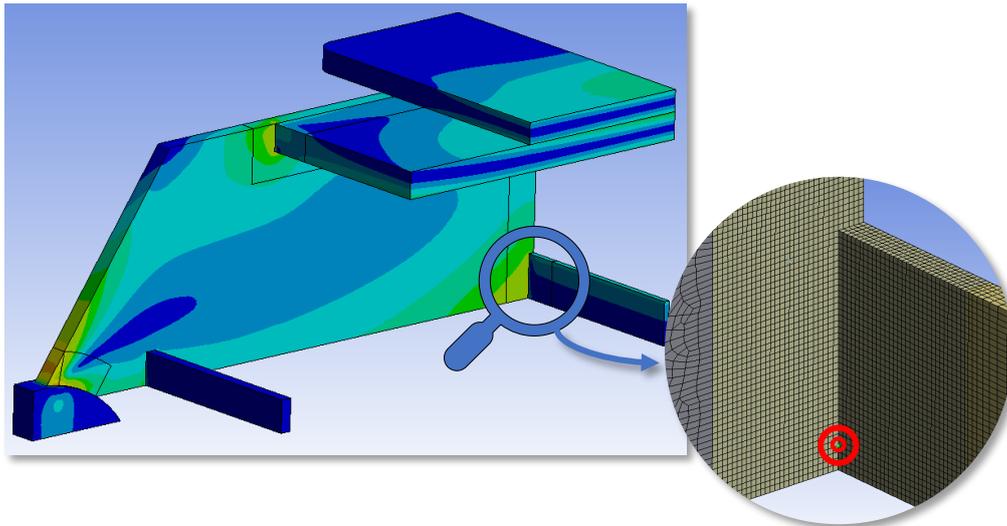
Ilustración 49. Conexiones de las galgas RDS 20

Para la distribución de resistencias seleccionada, en la Ilustración 50 se muestran las señales de tensiones que se esperan obtener para cada grupo de 7, 4 y 2 resistencias respectivamente.



Ilustración 50. Tensiones de salida para 7, 4 y 2 resistencias

En cuanto a la ubicación de estas galgas para monitorizar el estado de grietas, tal y como se ha mencionado anteriormente, basándose en el profundo estudio sobre el modelo de elementos finitos de la estructura que se ha realizado, se calcula que el punto crítico de la estructura se ubica en la unión entre el travesaño central y la placa lateral, en la parte del cordón de soldadura perteneciente a la placa lateral, a 4 mm de la parte inferior de la estructura (Ilustración 51).



*Ilustración 51. Ubicación del punto crítico de la estructura*

Dadas las características, el coste económico y necesidad de material de adquisición de cada galga, así como el potencial recorrido que la grieta tendrá sobre la estructura, se considera oportuno colocar una galga de hilos independientes RDS 20 en la mitad inferior de la unión en cuestión, para así poder monitorizar tanto el momento y la localización en las que se inicia la grieta, como la dirección y velocidad de su propagación de la forma más precisa posible. Asimismo, asumiendo que pasada esta primera fase la grieta se propagará en dirección vertical y ascendente, no resulta necesaria tanta información. Así que se ha decidido colocar 3 galgas de hilos no independientes RDS 17.8 en línea, una encima de la otra en dirección ascendente después de la galga RDS 20. De esta manera, en esta segunda fase solamente se medirá la longitud agrietada bajo los sensores, lo cual es suficiente para la completa monitorización de dicha grieta.

Por supuesto, esta misma configuración se empleará en cada una de las cuatro zonas críticas que por la doble simetría de la estructura es necesario analizar. En la Ilustración 52 se muestra un esquema de la colocación de las galgas de propagación para una potencial grieta.

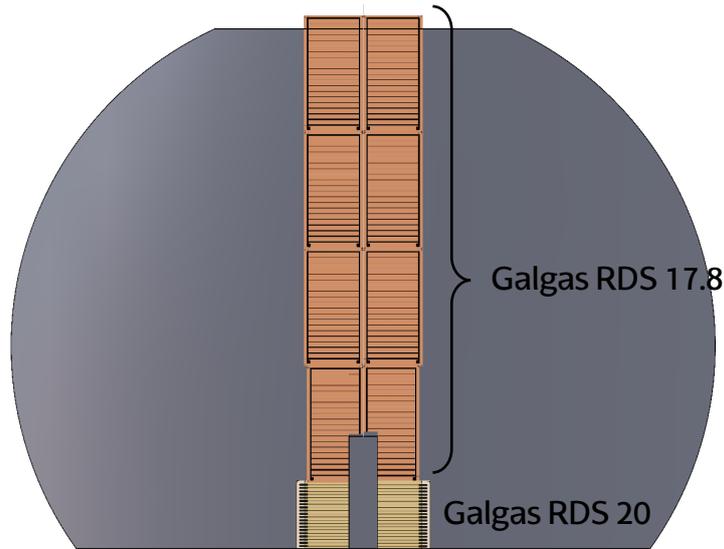


Ilustración 52. Colocación de las galgas de propagación

### 7.3.2.3 Carga aplicada

Aunque no sea estrictamente necesario el conocimiento de esta variable para los cálculos de predicción de vida a fatiga del gemelo digital, monitorizar en tiempo real la fuerza que el pistón del banco de ensayos ejerce sobre la placa de aplicación del demostrador podría resultar de ayuda en el análisis del funcionamiento del sistema.

Se ha conseguido configurar el propio controlador del banco de ensayos, de modo que entregue una señal de  $\pm 10V$  proporcional a la fuerza aplicada. Esta señal vendrá dada mediante un cable saliente del controlador dispuesto con un terminal BNC macho. Esta salida se conectará a una tarjeta de adquisición NI 9215 (Ilustración 53) el cual leerá este diferencial de tensión. Para la realización de dicha conexión, se empleará un segundo cable con un terminal BNC hembra en un extremo, y dos salidas (con el positivo y el negativo) en el otro que se conectarán a la tarjeta.



Ilustración 53. Tarjeta NI 9215

## 7.4 Desarrollo e implementación del gemelo digital

Una vez finalizado el apartado relativo al diseño del demostrador de la prensa, en este punto se pasa a exponer todo lo relacionado al desarrollo del gemelo digital que deberá calcular la vida a fatiga de dicha estructura, lo cual representa el principal objetivo de este proyecto. Para ello, se explicará la estructura del sistema desde un punto de vista más general, presentando los módulos principales que lo componen, así como las interacciones entre ellos para las distintas variantes propuestas. Posteriormente, se profundizará en los procesos que integran cada uno de dichos módulos.

En cuanto al código del sistema, el gemelo digital ha sido íntegramente programado en lenguaje Python.

### 7.4.1 Estructura

El gemelo digital consta de 3 módulos principales, Ilustración 54. Tal y como ya se ha comentado anteriormente, la predicción de vida a fatiga implica el cálculo de la vida hasta la iniciación de los defectos por un lado, y la vida de propagación de estos por otro. Ambas fases se rigen por físicas muy distintas; la primera, por el daño acumulado y la segunda, por la velocidad de propagación de grieta. En consecuencia, los dos módulos principales de los tres que componen el sistema, serán los de los cálculos de vida a iniciación y propagación.

No obstante, la variable de entrada fundamental en el cálculo de vida a fatiga son las tensiones. Sin embargo, el input del sistema son las deformaciones medidas mediante galgas extensiométricas, por lo que habrá un tercer módulo que consistirá en la aplicación de métodos de sensorización virtual (SV) para el cálculo de los estados tensionales de los puntos concretos que los otros dos módulos requieran para la predicción de vida de la estructura, partiendo de dichas mediciones de deformaciones.

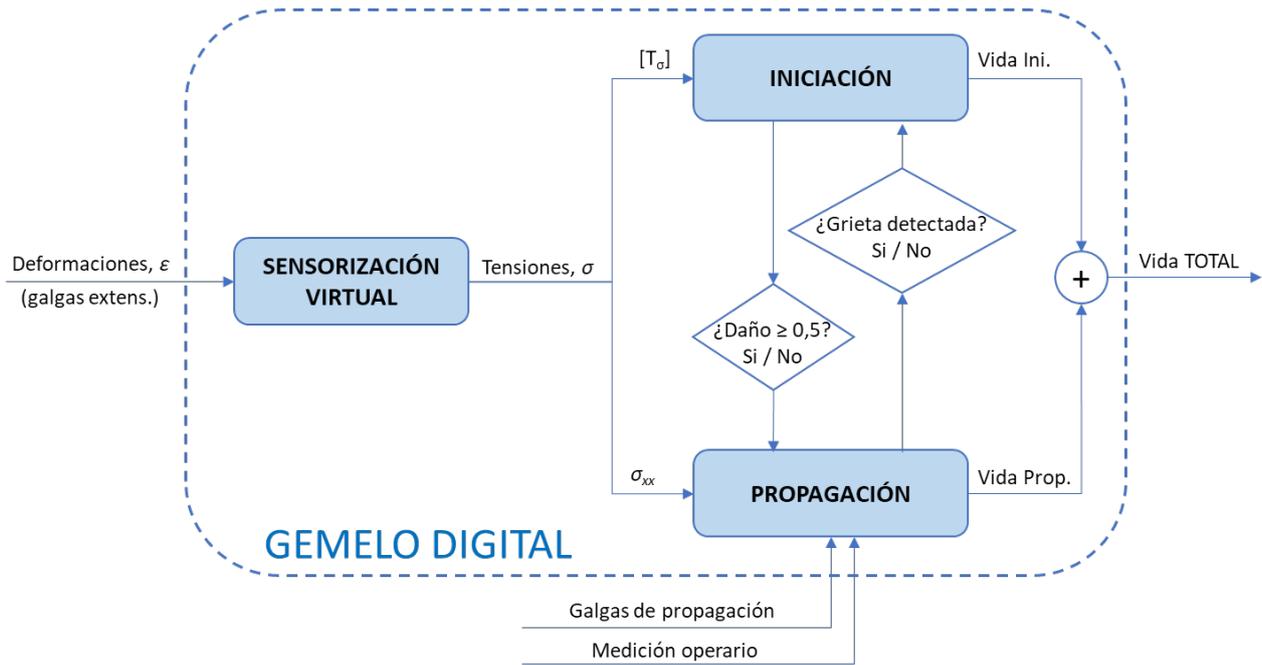


Ilustración 54. Estructura general del gemelo digital

En base a estas tensiones, el módulo de iniciación calcula el punto crítico de cada unión estructural previamente especificada, y para estos, predice el tiempo que transcurrirá hasta la aparición de una fisura. Al mismo tiempo, el módulo de propagación calcula cómo evolucionarán y se propagarán estas potenciales grietas desde los puntos críticos estructurales detectados, y en consecuencia, su vida hasta que según los criterios establecidos por la norma (véase 5.2.2 Propagación) consideren inadmisibles dichos fallos. Como se puede observar en la Ilustración 54, la suma de estas dos vidas será la vida a fatiga total del fallo en cuestión, y la menor de ellas, la vida a fatiga de la estructura.

Una vez transcurrido el tiempo calculado para la iniciación de grieta en los puntos críticos de la estructura, o bien cuando el/la operario/a lo detecte y así lo indique, el sistema considera que la fisura en cuestión ya se ha generado y pasa a considerar únicamente su vida de propagación, calculando independientemente la evolución de cada posible grieta por separado. Recuérdese que en esta fase del cálculo las dimensiones de grieta podrán ser actualizadas en cualquier momento por las mediciones realizadas por un/una operario/a, o en el caso de la variante del gemelo en la que se dispone del input de galgas de propagación, mediante ellas podrán deducirse el tamaño y la ubicación de dichas fisuras.

Por otra parte, basándonos en el profundo análisis relativo a la vida a fatiga de la estructura llevado a cabo en la fase de diseño, y con el fin de simplificar y agilizar el proceso de cálculo realizado por el gemelo, se ha decidido que este analice únicamente las dos uniones del travesaño central con los laterales de la bancada, ya que estas representan indubitablemente las zonas críticas de la estructura. Estas dos uniones están compuestas por 3 cordones de soldadura cada una, lo que se traduce en 12 pies de soldadura a analizar en total. Se muestran a continuación en la Ilustración 55: por un lado, la unión entre el travesaño central (2) y el lateral izquierdo de la bancada (1) está

compuesta por las soldaduras 1, 2 y 3, por otro lado, la unión entre el travesaño central (2) y el lateral derecho de la bancada (3) lo componen las soldaduras 4, 5 y 6.

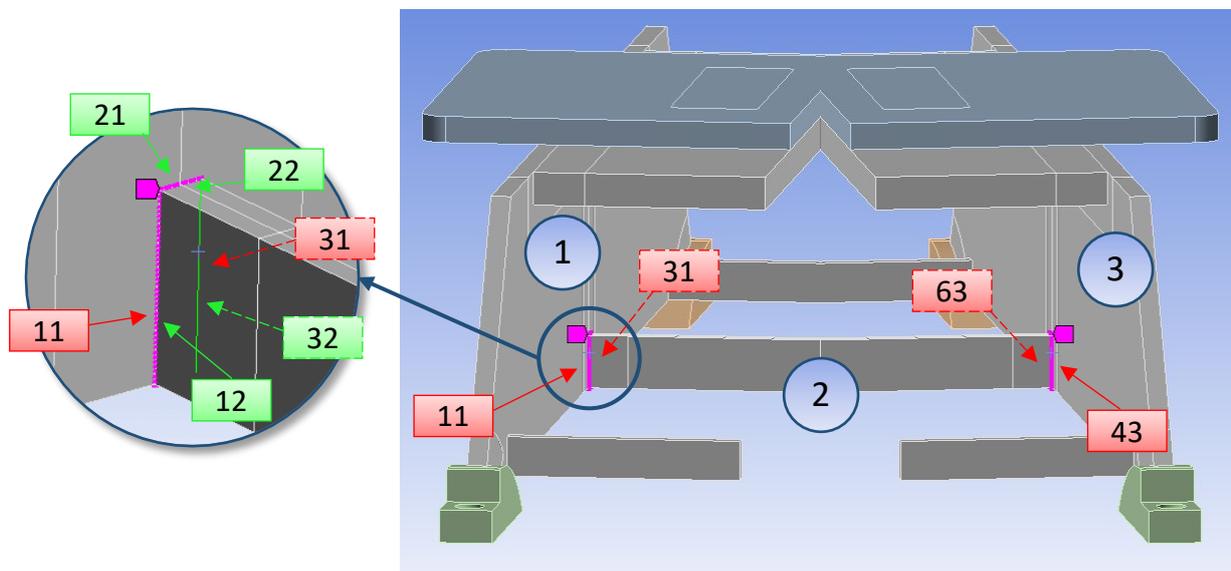


Ilustración 55. Pies críticos y no críticos de la estructura

Aun así, dentro de estos 12 pies son 4 los verdaderamente críticos en cuanto a la vida a fatiga, tal y como se logró en la fase de diseño de la estructura. Estos son el pie 11 (establecido por diseño), y los otros 3 pies en la misma situación debidos a la simetría de la estructura (31, 43 y 63), marcados en rojo en la Ilustración 55. Es sabido que la vida a fatiga de los otros 8 pies restantes, que se denominan no críticos (marcados en verde), es significativamente superior. Por lo tanto, no resulta necesario realizar el cálculo de propagación de grieta de estos últimos, ya que ninguna fisura iniciará de ninguno de ellos.

En conclusión, el gemelo digital calcula por una parte el punto crítico de cada uno de los 12 pies estudiados y la vida de iniciación de los mismos, y por otro, la vida de propagación de los 4 pies de soldadura críticos de la estructura.

#### 7.4.2 Descripción y funcionamiento de los módulos

En este punto se describirán más detalladamente los diferentes módulos que integran el gemelo digital, exponiendo los procesos internos de cada uno de ellos y diferenciando su funcionamiento para el caso de los pies críticos y los no críticos.

##### 7.4.2.1 Pies críticos

Para empezar, en la Ilustración 56 se muestra el diagrama del proceso de funcionamiento programado en el gemelo digital para el caso de los pies críticos de la estructura, es decir, incluyendo el cálculo de propagación de grieta en la vida a fatiga. Estos procesos en cualquiera de los casos se repiten indefinidamente en periodos de 10 minutos, debido a que este es el periodo de tiempo establecido en cada cual se recogen y almacenan en el sistema las señales de deformaciones captadas por las galgas. Por lo

tanto, el periodo de 10 minutos es el límite impuesto para el tiempo de computación total del procesamiento de estos bloques de datos y el consecuente cálculo de la vida remanente de la estructura. Es decir, el cálculo de vida a fatiga se realiza cada 10 minutos teniendo en cuenta el nuevo bloque de datos recibido, y los resultados obtenidos se actualizan.

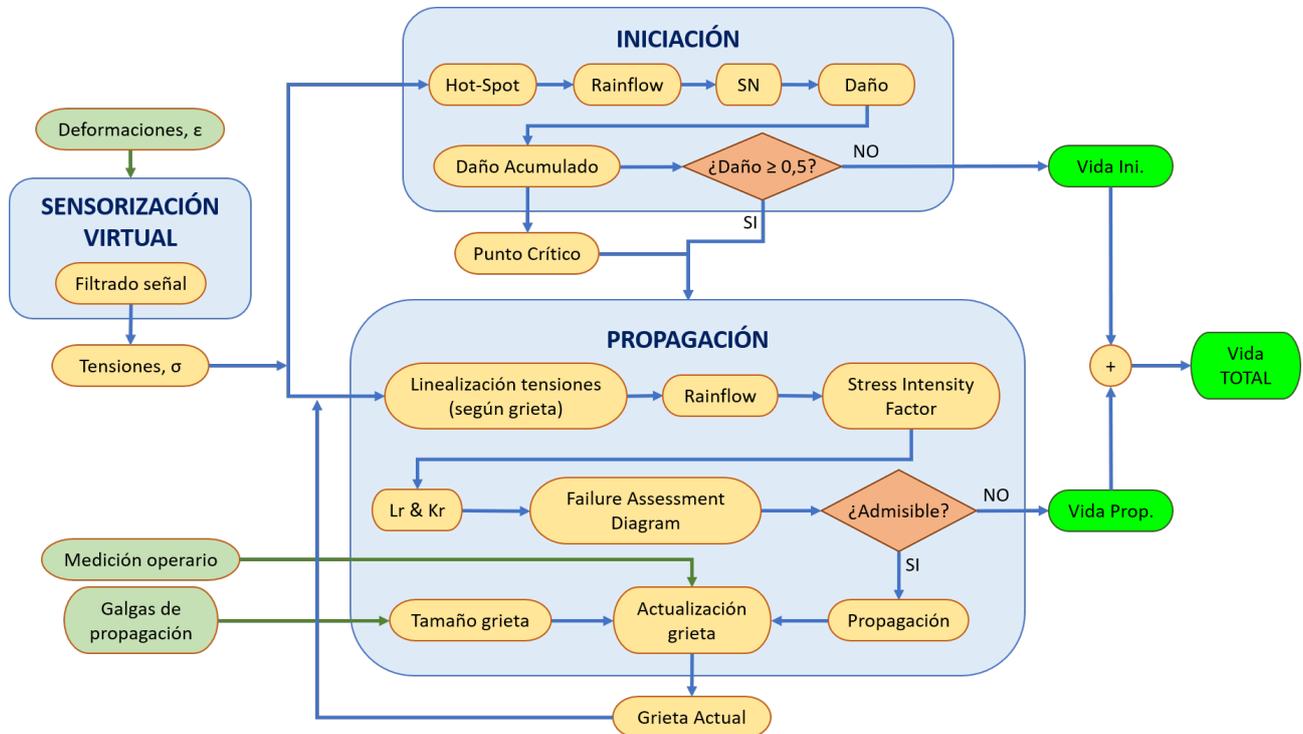
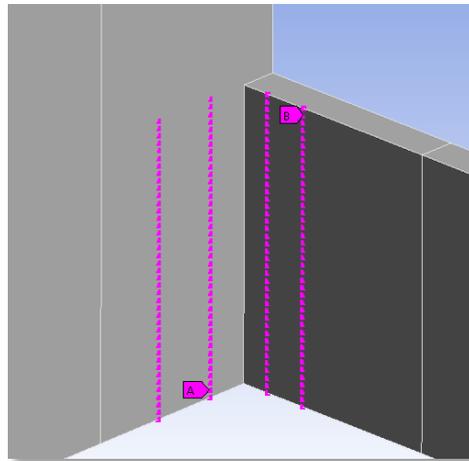


Ilustración 56. Diagrama del GD para pies críticos

Tal y como se ha venido mencionando, el primer paso parte del módulo de sensorización virtual, aplicando un filtro de paso bajo a la señal de 10 minutos de deformaciones que permite el paso de las frecuencias más bajas, representativas de la carga aplicada a 6 Hz, y atenuar las frecuencias más altas correspondientes al posible ruido percibido por los sensores. Con estas señales, se calculan las tensiones necesarias para el cálculo de vida en los otros dos módulos utilizando el método de la relación lineal con incertidumbre expuesto en el apartado 5.3.3 de este documento. Así, en base al modelo de elementos finitos de la estructura, se obtienen las relaciones entre las deformaciones de los puntos donde se sitúan las galgas extensiométricas y los puntos de interés. Además, se establece el nivel de influencia de cada galga para los sensores virtuales, en función de su posición relativa, al mismo tiempo que se le asocia un parámetro de incertidumbre ajustable a cada galga.

Una vez realizada la sensorización virtual, el siguiente paso es el cálculo de vida de iniciación. En este módulo se empezará calculando el punto crítico de cada uno de los pies de soldadura a analizar. Para ello se calcularán las tensiones de "hot-spot" mediante la extrapolación lineal. Por tanto, para este módulo las tensiones necesarias son las de, para cada pie de cordón, los puntos distanciados a 0,4 y 1 veces el grosor del elemento en que se encuentren para los "hot-spot" de tipo A, y, 5 mm y 15 mm para los "hot-spot" de tipo B. Por ejemplo, para obtener las tensiones de hot-spot de los dos pies de la soldadura número 1, ambas de tipo A, en la Ilustración 57 se muestran los puntos

de los cuales el módulo de sensorización virtual deberá calcular las tensiones. Para cada pie, el punto crítico será aquel que tenga la mayor tensión de "hot-spot", ya que el resto de variables para el cálculo de vida de iniciación no cambian.



*Ilustración 57. Tensiones necesarias para cálculo de iniciación de la soldadura 1*

Posteriormente, se les aplica el método de "rainflow" para el conteo de ciclos a las señales de tensiones de los puntos críticos de cada pie. Después, con los números de ciclos y rangos de tensiones obtenidos de este proceso, se calcula el daño que la carga aplicada en el bloque de 10 minutos analizado genera sobre la soldadura estudiada, en base a la correspondiente curva SN recogida en la norma (véase 5.2.1 Iniciación). El daño para cada pie se suma al ya existente por la aplicación de bloques de carga anteriores, obteniendo un daño acumulado del mismo.

Por último, suponiendo un daño máximo admisible de 0,5 tal y como indica la norma, así como una carga futura hipotética igual a la observada hasta el momento, se realiza una estimación de vida de iniciación remanente para cada pie.

Por otro lado, en lo que concierne al módulo de propagación, es necesario comenzar explicando las diferentes fases por las que pueden pasar las grietas generadas a partir de los puntos críticos de los pies de soldadura analizados. En el transcurso de la propagación de una potencial grieta, esta irá adoptando diversas geometrías según su ubicación inicial y la expansión que experimente en sus direcciones principales. Esta aclaración resulta relevante, debido a que las tensiones que han de ser utilizadas para su linealización y posterior cálculo de la propagación de la fisura, varían según el detalle concreto de la grieta en ese instante.

Dicha propagación, consta de dos fases principales. Dando por hecho la iniciación de la misma en un punto cualquiera de uno de los pies críticos, habrá una primera fase que abarca la zona hasta la altura de 40 mm del travesaño central, en la cual se ha de considerar la influencia de las tensiones residuales a causa de la presencia de la unión soldada. Y, una segunda, donde la grieta se extendería a lo largo del lateral de la bancada de forma ascendente hasta poder llegar a la altura de la mesa de la bancada (Ilustración 61).

A su vez, dentro de la primera fase pueden distinguirse hasta cuatro subfases o posibles geometrías que la grieta puede adoptar. El punto inicial será el punto crítico del pie que el módulo de iniciación haya calculado, y tendrá una forma de grieta superficial semielíptica (fase 1.1, Ilustración 58), a la que se le asignan unas dimensiones iniciales en base a las indicaciones de la norma. Lo más probable es que la grieta se expanda en la superficie hasta llegar a la parte inferior del lateral antes de que atravesase el espesor de dicho elemento, por lo que pasará a ser una grieta en esquina (fase 1.2, Ilustración 59). Posteriormente, cuando la grieta haya traspasado el grosor del lateral de la bancada se convierte en una grieta pasante de lado a lado en esquina (fase 1.3, Ilustración 60). No obstante, pudiera ocurrir que por diversas circunstancias la grieta iniciara en un punto situado en la zona superior del cordón de soldadura, y que, por lo tanto, esta lograra atravesar el elemento antes de llegar a la parte inferior. En ese caso, se trataría de una grieta pasante de lado a lado no en esquina (fase 1.4, Ilustración 62).

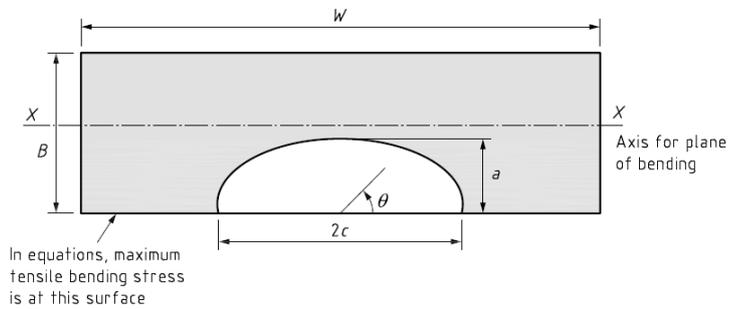
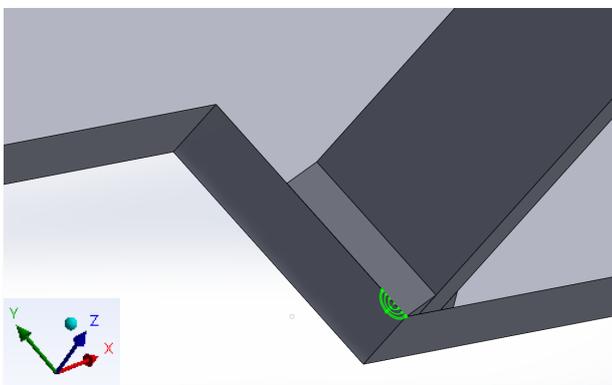


Ilustración 58. Fase de propagación 1.1: grieta semielíptica

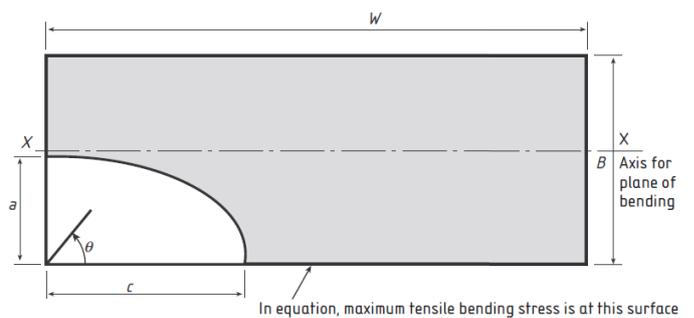
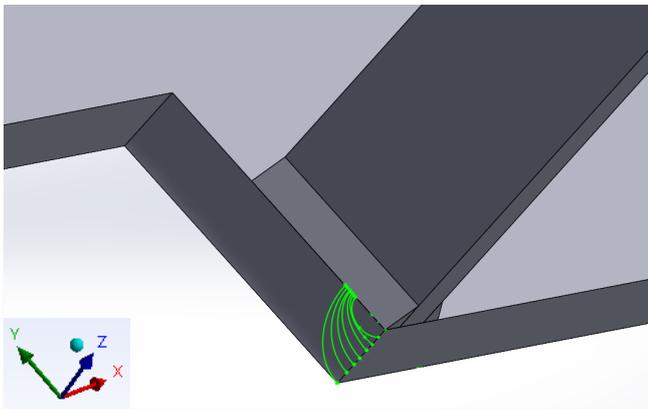


Ilustración 59. Fase de propagación 1.2: grieta en esquina

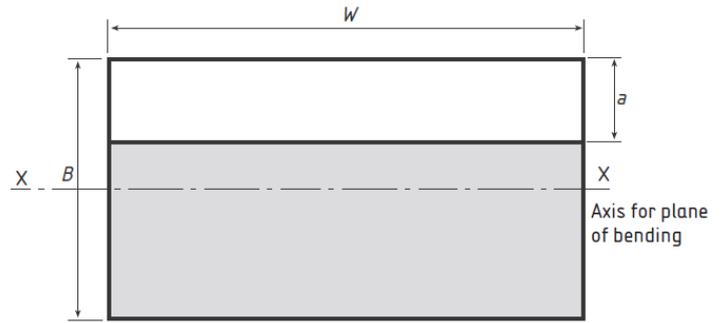
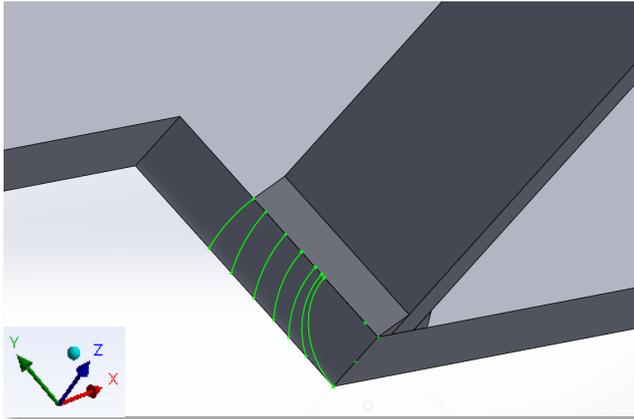


Ilustración 60. Fase de propagación 1.3: grieta de lado a lado en esquina

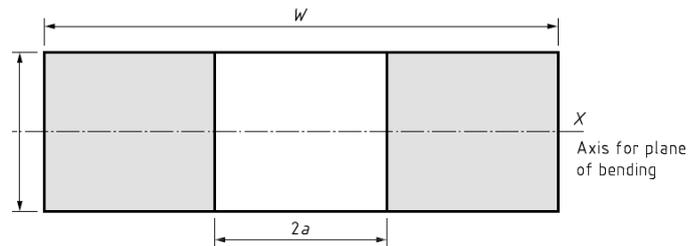
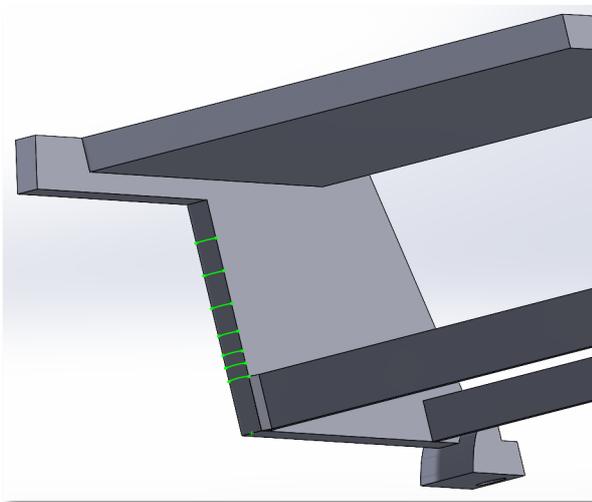


Ilustración 62. Fase de propagación 1.4: grieta de lado a lado no en esquina

Ilustración 61. Fase de propagación 2: grieta de lado a lado en esquina

Aclaradas las etapas en la propagación del fallo, el primer paso dentro del cálculo de propagación es el de linealizar el estado tensional existente en el plano de la grieta en ese instante. Para ello, tal y como ya se ha mencionado, la norma establece la selección de diferentes puntos de los cuales se deben obtener las tensiones, en función de la geometría concreta de la grieta (véase la Ilustración 21). Para las fases 1.1 y 1.4, grietas semielíptica y pasante no en esquina respectivamente, las tensiones se linealizan en el grosor de la sección (eje  $z$  en las ilustraciones), seleccionando las tensiones de la caras interna y externa a la altura del centro de la grieta. En el caso de la fase 1.2, grieta en esquina, la situación es similar, pero esta vez se cogerán las tensiones a cota 0 mm, es decir, las de la base del lateral. En cuanto a las fases 1.3 y 2 de la propagación, donde ya se tiene una grieta pasante de lado a lado ascendente desde la esquina inferior del lateral de la bancada, las tensiones del plano se deben linealizar en la dirección vertical (eje  $y$  en las ilustraciones). En consecuencia, el gemelo selecciona las tensiones de los puntos internos a la mitad del espesor del lateral, de la base (altura 0 mm) y el punto más alto previo a la mesa de la bancada (altura 185 mm). Por lo tanto, el módulo de sensorización virtual deberá proveer del estado tensional de todos estos puntos para el cálculo de propagación.

Una vez obtenidas las componentes de tensión necesarias para la geometría de grieta, se realiza un contaje de ciclos de la señal mediante el mencionado método de "rainflow". En concreto, se divide la señal completa de 10 minutos en tantos fragmentos como se desee (por ejemplo, en 360 partes para el cálculo de la propagación de la grieta actual) para obtener resultados de propagaciones más precisos. Luego, con las tensiones de cada fragmento y la geometría de grieta concreta en ese momento, se calculan los Factores de Intensidad de Tensiones (SIF) correspondientes a las tensiones primarias y secundarias máximas ( $K_I^p$ ,  $K_I^s$ ), y al rango de tensiones máximo del fragmento ( $\Delta K_I$ ). Con las primeras, se obtienen los valores de las ratios de fractura y de carga ( $K_r$  y  $L_r$ ) que ubican un punto en el diagrama FAD y establecen si la grieta es admisible o no. Con la segunda, en el caso de que la grieta sea admisible, se calcula la propagación de la misma de forma que se obtienen los incrementos de tamaño en sus dos direcciones principales.

Finalmente, con esos valores se actualiza la geometría de la grieta y se comienza el proceso de cálculo de propagación correspondiente al siguiente fragmento de la señal. Al mismo tiempo, el tamaño y la posición de cada grieta podrá ser actualizado por un/una operario/a o bien en función de las señales detectadas por las galgas de propagación. Este procedimiento se repetirá de forma iterativa hasta que el diagrama FAD establezca que el tamaño de la grieta no es admisible, lo cual establece la vida de propagación de la grieta en cuestión. En esta predicción de vida al igual que en el módulo de iniciación, una vez calculada la propagación correspondiente a la señal de los últimos 10 minutos transcurridos, el sistema supone que la carga futura a aplicar es idéntica a la detectada hasta ese instante, para lo cual el gemelo guarda un registro histórico de las señales de tensiones previas. De esta manera, se calculan de forma independiente las vidas de propagación de todas las potenciales grietas críticas de la estructura.

Para finalizar, la vida total de cada punto crítico se calcula como la suma de sus vidas de iniciación y propagación de grieta, siendo la más restrictiva la que establece la vida a fatiga total de la estructura.

### 7.4.2.2 Pies no críticos

La metodología establecida para el caso de los pies no críticos mostrado en la siguiente Ilustración 63, es exactamente igual que la de los críticos salvo que no se incluye la fase de propagación en el cálculo de vida a fatiga. Por lo tanto, una vez que el daño acumulado para estas uniones soldadas alcance el valor de 0,5 concluirá el cálculo de vida.

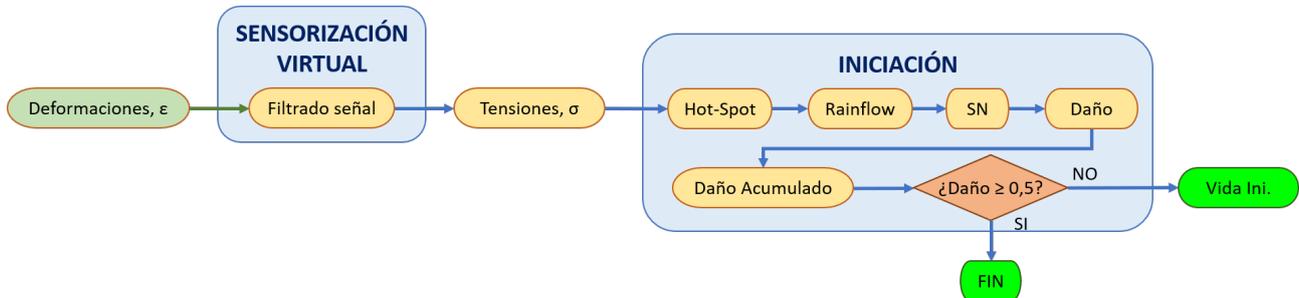


Ilustración 63. Diagrama del GD para pies no críticos

## 7.5 Demostración del gemelo digital

La metodología empleada para llevar a cabo la demostración del gemelo digital ha consistido en realizar varias simulaciones de ensayos de fatiga virtuales, equivalentes a los ensayos que pudieran realizarse en un banco de ensayos real, cambiando en cada una de ellas ciertas variables para observar su influencia sobre los resultados. Posteriormente, se analizan dichos resultados observando en qué medida se asemejan estos al comportamiento de la estructura esperado en la realidad.

Para efectuar estas simulaciones, se ha generado un script externo al gemelo digital programado también en Python, el cual genera señales de deformaciones de 10 minutos equivalentes a las que se obtendrían de las galgas extensiométricas reales, para el bloque de carga diseñado y basado en las deformaciones obtenidas del modelo de elementos finitos de la estructura. Para ello, se introduce a la señal un ruido o rizado aleatorio siguiendo una distribución normal (Gaussiana) mediante la variable de incertidumbre de cada galga, que en general se establece en un 15% del valor de la desviación estándar de la señal. En la Ilustración 64, se muestra la diferencia entre una señal ideal y una señal con ruido simulado, para una carga de 150 kN a 6 Hz y  $R = 0,05$ . En las simulaciones, también se reproduce la actualización de las geometrías de las grietas por parte de un/una operario/a.

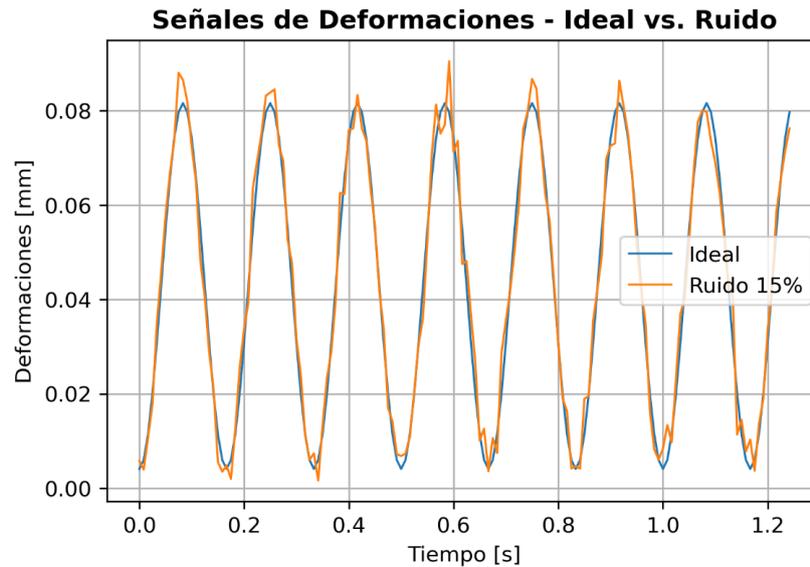


Ilustración 64. Señal de deformaciones ideal vs. con ruido (15%) de una galga a 150 kN de carga

A continuación, se describen los 4 escenarios en los que el gemelo digital ha sido simulado.

### 7.5.1 Escenario A

Se trata del caso más simple de todos. En este, se deja al gemelo desarrollar el cálculo sin ninguna variación más que las deformaciones obtenidas según el bloque de carga diseñado. No existe input externo de operario para la actualización de medida de las grietas, y la incertidumbre de las galgas se mantiene en 15%.

### 7.5.2 Escenario B

En este caso, se introduce una alteración importante en el desarrollo del cálculo de vida. Se simula la actualización del tamaño y la posición de las grietas de las soldaduras 3, 4 y 6 por parte de un/una operario/a, y se observa cómo reacciona el gemelo a un cambio repentino de geometría en las fisuras. Estas son las geometrías de grieta introducidas al sistema al cabo del tiempo/ciclos indicado desde el comienzo del ensayo simulado.

- Grieta 2 (soldadura 3):
  - 3 h 20 min / 72.000 ciclos → Grieta semielíptica de 2 mm de ancho a 3 mm de altura.
  - 20 h / 432.000 ciclos → Grieta en esquina de 8 mm de alto y 4 mm de profundidad.
  - 23 h 20 min / 504.000 ciclos → Grieta de lado a lado en esquina de 13 mm de altura.
  - 25 h 50 min / 558.000 ciclos → Grieta de lado a lado en esquina de 35 mm de altura.

- Grieta 3 (soldadura 4):
  - 4 h 10 min / 90.000 ciclos → Se detecta la iniciación de grieta semielíptica a 3 mm de altura. Tamaño inicial según norma: 0,364 mm de ancho y 0,1 mm de profundidad.
  - 6 h 40 min / 144.000 ciclos → Grieta en esquina de 12 mm de alto y 4 mm de profundidad.
  - 8 h 20 min / 180.000 ciclos → Grieta de lado a lado en esquina de 25 mm de altura.
  - 16 h 40 min / 360.000 ciclos → Grieta de lado a lado en esquina de 40 mm de altura.
  
- Grieta 4 (soldadura 6):
  - 13 h 20 min / 288.000 ciclos → Grieta de lado a lado no en esquina de 5 mm de ancho a 5 mm de altura.

### 7.5.3 Escenario C

En este escenario la variabilidad se enfoca a la incertidumbre en las lecturas de los sensores. En una primera parte, escenario C1, se ha aumentado dicho parámetro del 15% genérico establecido para todas las simulaciones a un 30%. En una segunda simulación, escenario C2, se ha aumentado de ese 15% a un 45%. En la Ilustración 65 se puede observar un ejemplo del efecto surtido en las señales de deformaciones generadas para las galgas extensiométricas, para el caso de una carga de 150 kN a 6 Hz y una ratio de 0,05.

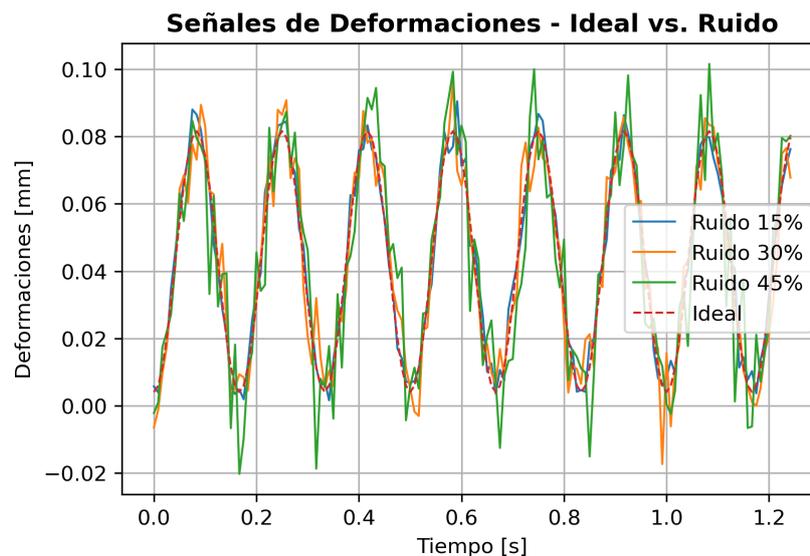


Ilustración 65. Señal de deformaciones ideal vs. con ruido (15%, 30 % y 45 %) de una galga a 150 kN de carga

## 7.6 Resultados

En este apartado se pasa a mostrar y analizar los resultados obtenidos del gemelo digital. Así, en una primera parte se expondrá una demo resumida del funcionamiento del gemelo. Posteriormente, se ha elaborado un análisis de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios simulados, demostrando la validez del sistema desarrollado.

### 7.6.1 Demo del gemelo digital

Se comienza explicando cómo está organizado el programa en sus directorios internos. En la Ilustración 66 se muestra una visión general de la carpeta que contiene todos los archivos del gemelo digital. Como se puede observar en el centro de la imagen, el directorio raíz del programa lo forman 4 carpetas principales más el código central del gemelo digital. Este último archivo contiene el código necesario para ejecutar el programa y poner en funcionamiento el sistema. Sin embargo, no todo el código del programa está contenido en él, en la carpeta funciones, existen archivos con partes del código que se repiten iterativamente para el cálculo de una parte concreta del proceso, a los cuales se les llama desde el código principal tantas veces como sean necesarias.

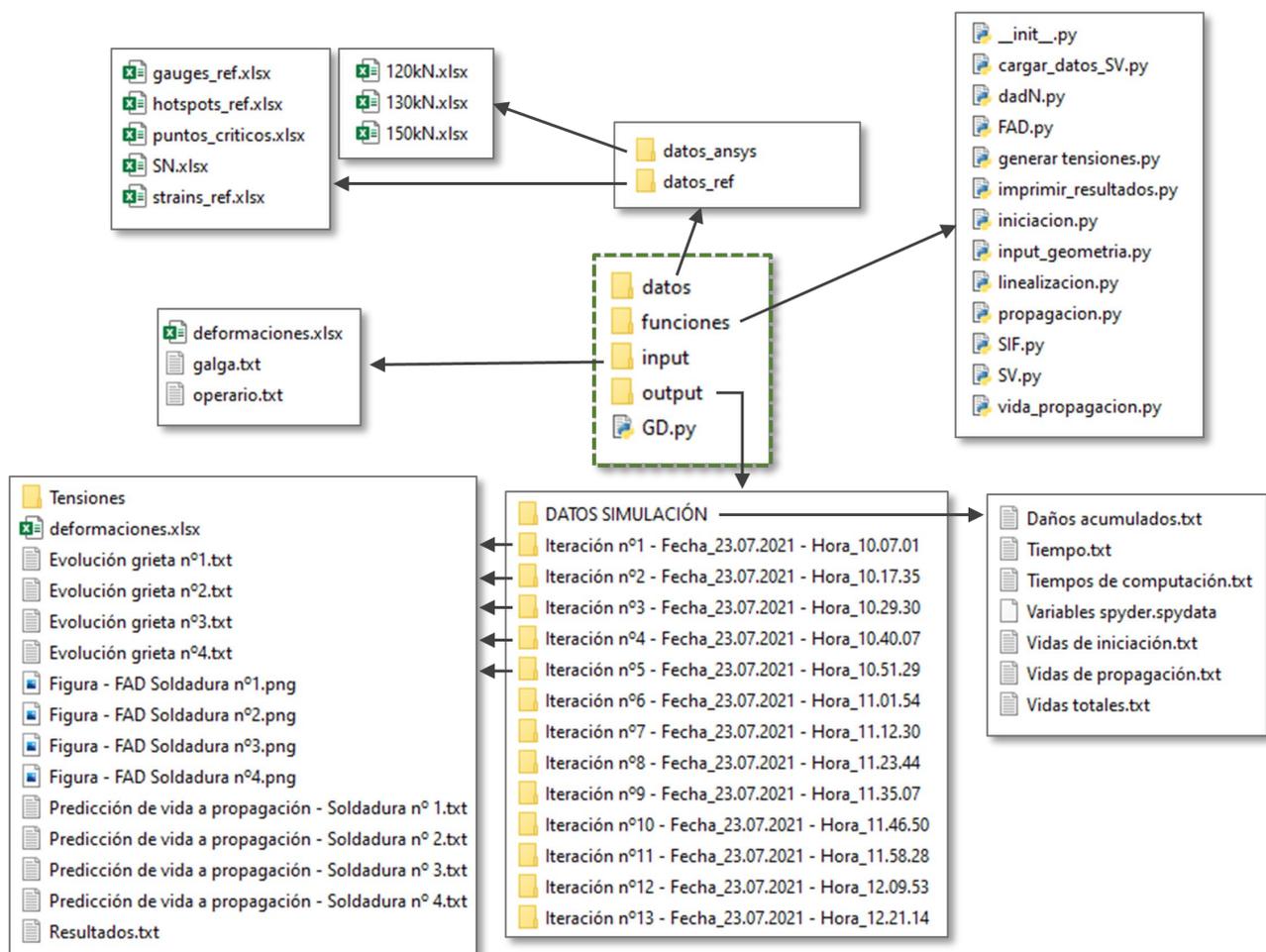


Ilustración 66. Estructura de directorios y archivos del gemelo digital

En la carpeta de datos, están ubicados los archivos de referencia que contienen la información del modelo de elementos finitos, de los parámetros de las galgas extensiométricas para la sensorización virtual, de las curvas SN proporcionadas por las normas etcétera, indispensables para el cálculo de la vida a fatiga según el procedimiento establecido.

Por otro lado, están las carpetas con las que el gemelo interacciona: el input y el output. En la carpeta de input se almacena cualquier dato de entrada para el gemelo, ya sea el archivo con las lecturas de deformaciones de las galgas de los últimos 10 minutos, la geometría de una grieta detectada por un/una operario/a, o las señales adquiridas de las galgas de propagación de grietas. En un ensayo real, el sistema de adquisición de datos y la interfaz de usuario diseñadas deberían almacenar esta información en dicha carpeta. Al contrario, en el caso de las simulaciones de los ensayos, este será el directorio en el cual se generen las lecturas de sensores artificiales.

En cuanto a la carpeta de output, será aquí donde el gemelo digital almacene todos los resultados y datos intermedios calculados en base al input de lo ocurrido en los últimos 10 minutos. Como se puede observar en la Ilustración 66, todos los resultados de las predicciones se van almacenando independientemente en carpetas diferenciadas según vaya desarrollándose el ensayo o la simulación. A continuación, se enumeran los resultados que el gemelo digital genera en cada una de estas iteraciones:

- Una carpeta con las tensiones de los puntos de interés calculadas mediante sensorización virtual.
- Para cada posible grieta crítica, la evolución de la propagación calculada hasta el momento y la predicción a futuro de la misma.
- Para cada posible grieta crítica, el diagrama de evaluación de fallos (FAD) donde se representan los puntos respectivos a las situaciones pasadas de la grieta hasta el momento actual, más los puntos que se predicen en las sucesivas iteraciones hasta la inadmisibilidad de la grieta (Ilustración 67).
- Para cada posible grieta crítica, la predicción de la propagación futura y la vida correspondiente, iteración a iteración (Ilustración 68).
- Una tabla resumen de los resultados calculados en base al último input recibido, es decir, la actualización de los resultados cada 10 minutos (Ilustración 69). Contiene para cada pie de soldadura analizado, la información relativa al daño recibido en la última iteración, el daño acumulado, la geometría de cada grieta, su propagación, y las vidas remanentes de iniciación, propagación y la vida a fatiga remanente total.

Aparte de esto, el gemelo guarda en la carpeta “datos simulación” información sobre la evolución de diversas variables a lo largo de la simulación como el daño acumulado en iniciación, vidas a fatiga o tiempos de computación.

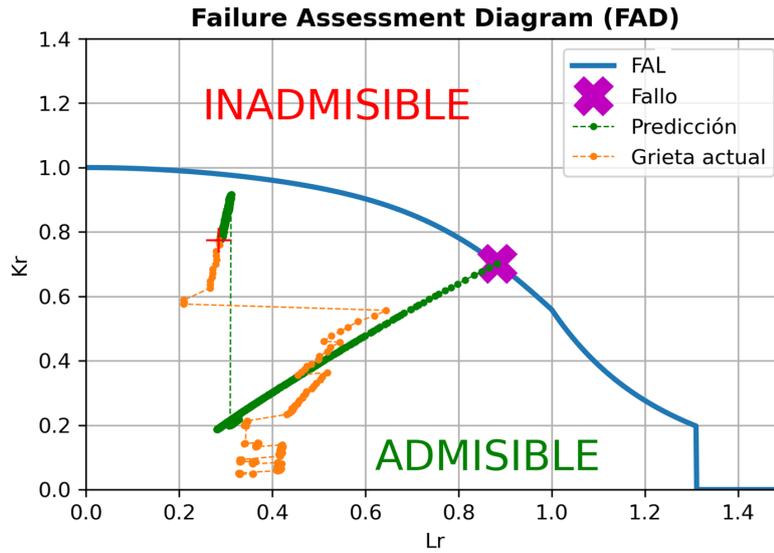


Ilustración 67. Ejemplo de diagrama de evaluación de fallos resultado

\*\*\*\*\* PREDICCIÓN DE VIDA DE PROPAGACIÓN \*\*\*\*\*  
Soldadura crítica nº1

Nº Iteración	Tamaño de grieta		Propagación		Tiempo [h]
	a [mm]	c [mm]	$\Delta a$ [mm]	$\Delta c$ [mm]	
Grieta inicial	0.10	0.18	-	-	-
1	0.12	0.19	0.017	0.010	0.17
2	0.13	0.20	0.016	0.011	0.33
3	0.15	0.22	0.016	0.012	0.50
4	0.17	0.23	0.016	0.013	0.67
5	0.18	0.24	0.016	0.014	0.83
6	0.20	0.26	0.016	0.015	1.00
7	0.22	0.27	0.017	0.015	1.17
8	0.23	0.29	0.017	0.016	1.33
9	0.25	0.31	0.017	0.017	1.50
10	0.27	0.32	0.017	0.017	1.67
11	0.28	0.34	0.018	0.018	1.83
12	0.30	0.36	0.018	0.019	2.00
13	0.32	0.38	0.019	0.019	2.17
14	0.34	0.40	0.019	0.020	2.33
15	0.36	0.42	0.019	0.021	2.50
16	0.38	0.44	0.020	0.021	2.67
17	0.40	0.46	0.020	0.022	2.83
18	0.42	0.49	0.021	0.022	3.00
19	0.44	0.51	0.021	0.023	3.17
20	0.46	0.53	0.021	0.024	3.33
...	...	...	...	...	...
120	37.80	0.00	1.121	0.000	20.00
121	38.98	0.00	1.176	0.000	20.17
¡ATENCIÓN! ¡La grieta ha superado la altura del travesaño!					
122	40.42	0.00	0.412	0.000	20.33
123	43.18	0.00	2.753	0.000	20.50
124	46.39	0.00	3.211	0.000	20.67
125	50.22	0.00	3.837	0.000	20.83
126	54.97	0.00	4.747	0.000	21.00
127	61.18	0.00	6.209	0.000	21.17
128	70.18	0.00	9.001	0.000	21.33
129	87.35	0.00	17.174	0.000	21.50
¡ATENCIÓN! La grieta actual NO es ADMISIBLE.					
***** RESULTADOS *****					
Nº iteraciones	Último tamaño de grieta		Vida		
129	a = 87.35 mm / c = 0.00 mm		21h 30min 0s		

Ilustración 68. Ejemplo de predicción de propagación

***** RESULTADOS *****														
Iteración nº113														
SOLDADURA	INICIACIÓN			PROPAGACIÓN									VIDA TOTAL REMANENTE	
	Daño i [%]	Daño total [%]	Vida remanente	Geometría	Inicial a [mm]	Inicial c [mm]	Centro [mm]	:	Geometría	Final a [mm]	Final c [mm]	Centro [mm]		Vida remanente
11	0.47	80.39	0h 0min 0s	Semi-elíptica	0.840	0.957	3.00	:	Semi-elíptica	0.857	0.977	3.00	: 19h 10min 0s	19h 10min 0s
31	0.47	80.59	0h 0min 0s	Pasante esquina	27.657	0.000	4.00	:	Pasante esquina	28.131	0.000	4.00	: 3h 40min 0s	3h 40min 0s
43	0.47	80.44	0h 0min 0s	Pasante esquina	105.421	0.000	0.00	:	Pasante esquina	105.421	0.000	0.00	: 0h 0min 0s	0h 0min 0s
63	0.47	80.64	0h 0min 0s	Pasante esquina	16.718	0.000	7.50	:	Pasante esquina	16.986	0.000	7.50	: 8h 0min 0s	8h 0min 0s
12	0.01	1.74	522h 33min 5s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	522h 33min 5s
21	0.17	29.77	12h 47min 37s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	12h 47min 37s
22	0.04	6.12	135h 3min 58s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	135h 3min 58s
32	0.01	1.63	560h 18min 19s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	560h 18min 19s
42	0.01	1.74	523h 10min 15s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	523h 10min 15s
53	0.17	29.78	12h 47min 12s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	12h 47min 12s
52	0.04	6.09	135h 46min 25s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	135h 46min 25s
62	0.01	1.62	563h 45min 14s	-	-	-	-	:	-	-	-	-	: 0h 0min 0s	563h 45min 14s

¡ATENCIÓN!

> ¡La grieta nº2 (soldadura 43) actualmente no es admisible! --> El cálculo continuará para el resto de grietas.

----- LA DURACIÓN TOTAL DEL CÁLCULO HA SIDO 0h 6min 32s -----

*Ilustración 69. Ejemplo de tabla resumen de los resultados en cada iteración*

Por lo tanto, el funcionamiento del gemelo digital es el siguiente. Se ejecuta el código del archivo "GD.py" y a continuación se comienza con el ensayo, o en este caso, con la simulación. En ese instante el gemelo digital queda a la espera de detectar algún archivo en la carpeta input. Al cabo de 10 minutos de ensayo, el sistema de adquisición de datos debería generar un archivo con las señales de deformaciones observadas en las galgas. En el caso de la simulación, el script desarrollado para dicho fin genera este archivo nada más ejecutarlo. Tan pronto como esto suceda, el gemelo digital moverá el archivo al directorio de salida (output) correspondiente y comenzará con el proceso de cálculo de vida a fatiga. Cuando este acabe, en menos de 10 minutos, en la carpeta de salida correspondiente a la primera iteración estarán todos los resultados calculados a lo largo del proceso, y el gemelo quedará a la espera de nuevos datos de entrada.

De esta manera, el proceso que se acaba de describir se repite una y otra vez hasta que todas las grietas críticas se propaguen hasta tal punto que bajo los criterios establecidos por norma se consideren inadmisibles.

Por supuesto, si en cualquier momento (fuera del proceso de cálculo) el gemelo detectara la presencia de un archivo correspondiente a un input por parte de un/una operario/a o galga de propagación, se actualizarían las geometrías de las grietas pertinentes y se proseguiría con el proceso.

Una vez aclarado el funcionamiento general del gemelo digital, en el próximo punto se pasa a analizar los resultados obtenidos de las simulaciones de ensayos realizadas.

### **7.6.2 Análisis de los resultados**

En este apartado se analiza e interpreta el output obtenido del gemelo digital en los diferentes escenarios de simulación. Para ello, partiendo de estos datos se elaboran numerosas gráficas estudiando la propagación de las grietas, el daño causado, la vida a fatiga etcétera. Se pretende hacer un análisis crítico de los resultados y demostrar la validez del gemelo digital desarrollado, confrontando los resultados obtenidos con el comportamiento y las tendencias esperadas por parte de la estructura en la realidad.

Antes de comenzar con el análisis, resulta oportuno recordar el diseño del bloque de carga que se aplica a la estructura, ya que posee una relevancia considerable.

- 72.000 ciclos a 150 kN y 6 Hz
- 36.000 ciclos a 130 kN y 6 Hz
- 36.000 ciclos a 120 kN y 6 Hz

Por lo tanto, en conjunto el bloque de carga tiene una duración de 144.000 ciclos (6 h 40 min), mientras que cada iteración de cálculo del gemelo, que corresponde al procesamiento de datos de los últimos 10 minutos, representa 3.600 ciclos (a 6 Hz).

#### **7.6.2.1 Escenario A**

Esta primera simulación, al no verse afectada por ninguna intervención externa (galgas de propagación, operario/a, ...), resulta idónea para un estudio focalizado en el propio proceso de cálculo del gemelo, donde se observan las fases de iniciación y propagación de grieta únicamente predichas por medio de la metodología establecida.

Al mismo tiempo, por la doble simetría de la estructura, las cuatro grietas críticas de la misma (cuyas propagaciones son las que calcula el gemelo digital) sufren una evolución idéntica, a excepción de la aleatoriedad en el ruido de la señal generada. En la realidad, es asumible que una sola grieta iniciará de una de las soldaduras críticas antes que las demás por multitud de motivos, tales como la no homogeneidad del material, imperfecciones en las soldaduras, imperfecciones en la aplicación de la carga como el descentramiento, etc. En ese caso la estructura verá alterada su distribución tensional, por lo que puede que el comportamiento de las grietas difiera.

Debido a esta condición de simetría, en el caso del escenario A de simulación, de entre las grietas críticas únicamente se analizarán los resultados de la grieta 11, los cuales son aplicables al resto.

Se comienza por lo más importante, la predicción de la vida a fatiga de la estructura. En la simulación, la grieta ha iniciado tras 248.400 ciclos (11 h 30 min), y la vida total hasta la inadmisibilidad de la misma ha sido de 824.400 (38 h 10 min). Esto supone que la vida total de la estructura se divide en un 30,13% vida de iniciación y un 69,87% vida de propagación. Este dato de vida a iniciación efectivamente se corresponde con la vida de diseño. Recuérdese que la vida de diseño de las soldaduras críticas se estableció en 1,01 días (24 h) para un daño acumulado de valor la unidad. Sin embargo, la norma de la IIW en la cual se basan los cálculos del gemelo [2], establece la vida de las uniones soldadas en un daño acumulado de 0,5 (véase 5.2.1.1 Soldaduras). Por lo tanto, la vida de diseño para esta unión soldada es aproximadamente la mitad, 12 h.

En la Ilustración 70 se muestra la evolución de la predicción de vida de la grieta 11 de dos formas distintas, aunque representan lo mismo. Por un lado, se pueden observar las evoluciones de las predicciones de vida remanente de iniciación, propagación y total de la grieta en cada instante. Por otro lado, se muestra la evolución de la vida total, es decir, la suma de los ciclos transcurridos hasta el momento y los ciclos de vida que el gemelo estima que le quedan a la grieta.

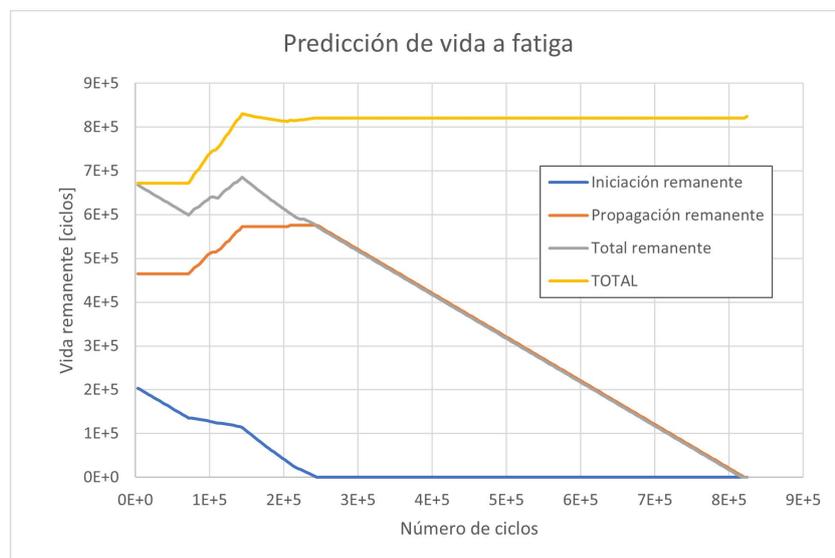


Ilustración 70. Escenario A. Predicciones de vida remanente y vida total a fatiga

En el gráfico, en todas las líneas se observan dos cambios de pendiente evidentes. Esto es debido a que el gemelo digital predice lo que va a ocurrir en base a lo que ya ha ocurrido hasta el momento. Es decir, al principio de la simulación y durante 72.000 ciclos, el sistema solo ha recibido el input de una carga de 150 kN, y, por lo tanto, ha supuesto que siempre se aplicará esta misma carga. Pasados los 72.000 ciclos, la carga varía a 130 kN durante 36.000 ciclos y luego a 120 kN 36.000 ciclos más. Es en ese preciso instante cuando las líneas cambian su tendencia y pasan a hacer una estimación

de vida superior, lo cual es lógico ya que desciende la carga aplicada. También se puede apreciar, aunque de forma más sutil, la diferencia entre las cargas de 130 y 120 kN.

La vida remanente de iniciación es obviamente siempre descendente, ya que según pasan los ciclos cada vez quedan menos para que la grieta se produzca. El cambio reside en la reducción de la pendiente negativa, esto es, en que la vida de iniciación pasa a disminuir a menor ritmo. Transcurridos otros 72.000 ciclos, se vuelve a aplicar la carga de 150 kN, lo que se traduce en el siguiente cambio de tendencia.

Para el caso de la vida remanente de propagación, se mantiene constante en el primer tramo. Esto es debido a que la carga no varía y a que como la grieta no ha comenzado todavía, no puede reducirse su tiempo de propagación. Cuando la carga disminuye tras 72.000 ciclos, la predicción empieza a aumentar a cada ciclo que pasa, lo cual tiene sentido teniendo en cuenta que la grieta se inicia tras casi 250.000 ciclos de carga. Una vez pasados 144.000 ciclos, el gemelo ya ha podido detectar todo el bloque de carga, con lo cual, realiza los cálculos de propagación conociendo la variabilidad completa de la carga. En consecuencia, la predicción de vida a propagación se vuelve a estabilizar.

Una vez que la grieta inicia, el gemelo empieza a calcular la propagación de la grieta. Se puede observar que la predicción de vida se reduce al mismo ritmo que el paso del tiempo, lo que significa que la predicción de la vida total no varía. Del mismo modo, es esto mismo lo que expresa la línea de la vida total (no remanente). Durante los primeros 72.000 ciclos, al ser la carga constante, también lo es la predicción de vida total. Cuando la carga disminuye, lógicamente la vida a fatiga aumenta. Finalmente, cuando el gemelo ya ha recibido el input de todo el bloque de carga, la predicción se estabiliza y no varía más durante toda la simulación. Esto significa, que una vez que se aplica el bloque de carga completo por primera vez, el gemelo ya puede prácticamente predecir la vida a fatiga definitiva sin variaciones.

Por otra parte, se encuentran los resultados detallados de la fase de propagación de las grietas. En este sentido, resultan interesantes las evoluciones de dos variables: el tamaño de grieta y la velocidad de propagación de esta. Para su análisis, se realiza una pequeña modificación en cuanto a la nomenclatura propuesta por la norma BS 7910:2013 [3] relativa a las dimensiones de las grietas (Ilustración 58, Ilustración 59, Ilustración 60 e Ilustración 62). Para una mayor claridad de los gráficos, se denomina  $c$  a la dimensión de la grieta en el eje vertical, independientemente de su geometría (según la norma;  $2c$  para una grieta semielíptica,  $c$  para una en córner,  $2a$  para una pasante no en esquina y  $a$  para una pasante en esquina), y  $a$ , a la profundidad de la grieta en el grosor de la placa lateral, Ilustración 71. En definitiva, se adopta la nomenclatura de una grieta en esquina para todas las posibles geometrías.

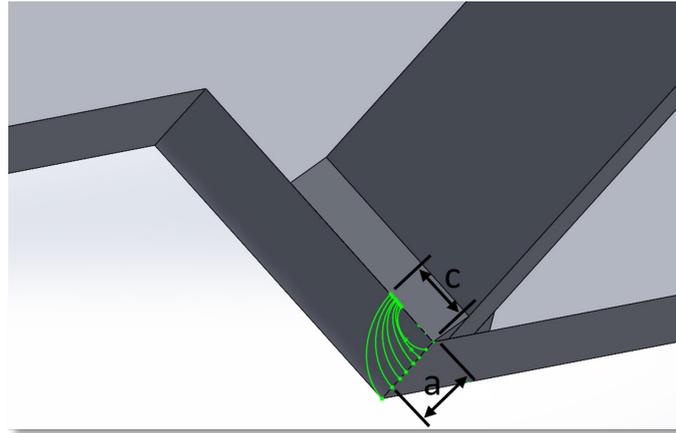


Ilustración 71. Escenario A. Nomenclatura de dimensiones de grieta para el análisis de resultados

Así, en la Ilustración 72 se muestra la velocidad de propagación, y, en la Ilustración 73 el tamaño de grieta, en función de los ciclos de la fase de propagación, ambas predichas en la primera iteración. Estas primeras predicciones, al igual que sucede en las estimaciones de vida, se basan en que la carga aplicada futura será siempre de 150 kN, con lo que no se percibe ninguna variabilidad en ese aspecto. Por ello, resultan especialmente adecuadas para detectar las diferentes fases en la propagación de la grieta.

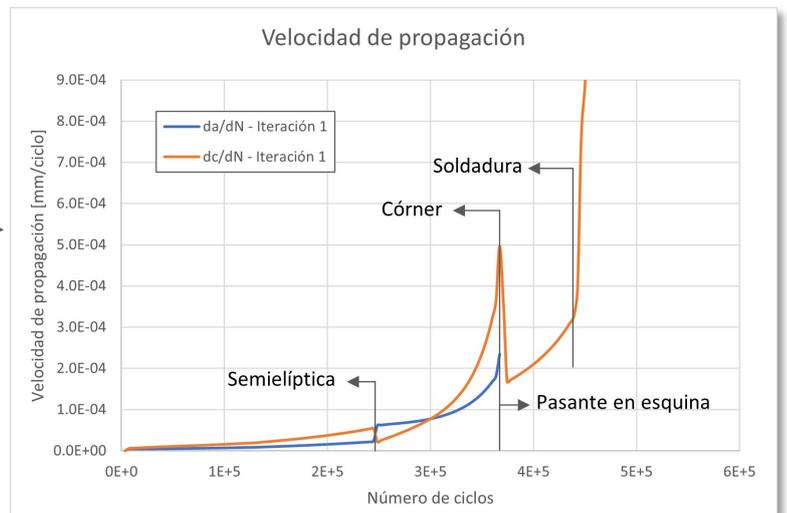
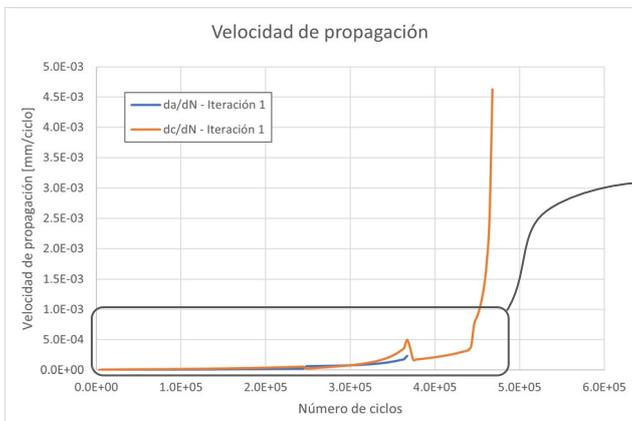


Ilustración 72. Escenario A. Velocidad de propagación de la grieta 11, Iteración 1

En la Ilustración 72 se pueden diferenciar claramente dos tramos. El primero, hasta el ciclo 442.800 de la fase de propagación (95,35% de la propagación), que representa la expansión de la grieta hasta la altura del travesaño de 40 mm, en el cual se tiene en consideración la influencia de la soldadura en el cálculo. Y, el segundo, donde la velocidad de propagación se dispara y solamente dura 21.600 ciclos más (4,65% de la propagación).

Asimismo, dentro del primer tramo se evidencian las tres geometrías de grieta. Lo más destacable es el hecho de que las velocidades aumentan de forma más

pronunciada en los ciclos previos a los cambios de geometría, lo cual es esperable. Por ejemplo, resulta lógico que la grieta en córner (Ilustración 71) avance más rápido cuanto menos le quede para atravesar el grosor del lateral, y no cuando la superficie no fracturada del plano sea mucho mayor en comparación al tamaño de la grieta, debido a que la resistencia que oponga la sección en ese caso será superior.

En coherencia con la velocidad de propagación, está la evolución de las dimensiones de la grieta. En ambos casos, se puede observar que en los primeros ciclos de la fase de expansión de la grieta, la velocidad de propagación es muy baja (por debajo de  $5 \times 10^{-5}$  mm/ciclo en los primeros 200.000 ciclos), y que con el transcurso del tiempo su evolución aumenta exponencialmente. Cabe mencionar que el parámetro  $a$  aumenta hasta llegar a 15 mm, que es el grosor del lateral. Una vez que la grieta se convierte en pasante, esta solo se propagará verticalmente, o sea, solo aumentará la dimensión  $c$ .

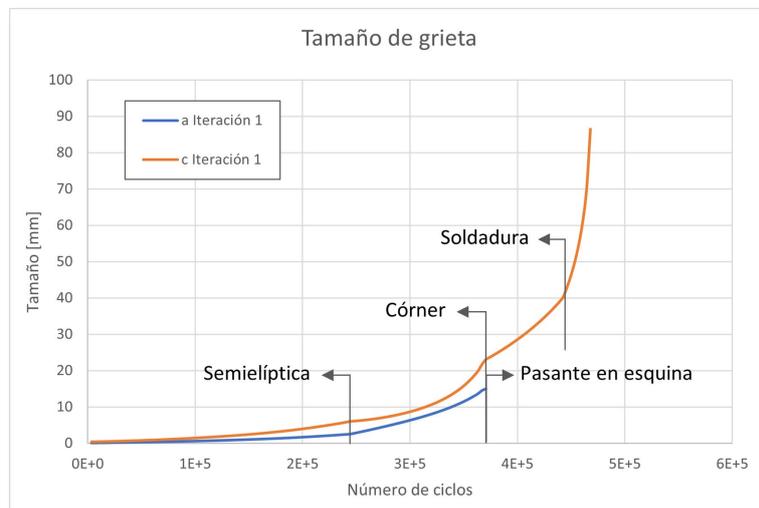


Ilustración 73. Escenario A. Tamaño de grieta 11, Iteración 1

Una vez analizado el proceso de propagación estimado en la primera iteración, se comparan estos resultados con la predicción hecha después de 144.000 ciclos, es decir, cuando el gemelo digital ya ha percibido todo el bloque de carga (Iteración 40) por un lado, y con los resultados finales obtenidos de la simulación completa por otro. En las ilustraciones 74-79 se muestran las evoluciones de las velocidades de propagación y las dimensiones de la grieta, tanto de  $a$  como de  $c$ , en función de los ciclos de la fase de propagación.

A primera vista, se perciben dos diferencias sustanciales. La primera es la variabilidad de la carga, sobre todo en las gráficas de velocidad de propagación (Ilustración 74, Ilustración 75, Ilustración 76 e Ilustración 77). En todas ellas, y especialmente en la Ilustración 76, se pueden diferenciar los tres componentes del bloque de carga, donde como es lógico las velocidades de propagación disminuyen en consonancia a dicha carga. Asimismo, se puede ver que en los resultados finales la tendencia de la velocidad es muy similar a la predicción realizada en la iteración 40, salvo que se aprecia un desfase entre ellas. Los resultados finales están retrasados con respecto a la predicción de la iteración 40, indicativo de que la grieta ha iniciado antes

de lo esperado en ese momento. Esto, concuerda con la tendencia de las predicciones de vida a iniciación mostradas en la Ilustración 70. Aun así, como se puede observar en la Ilustración 78 y la Ilustración 79, la propagación y la vida estimadas pasadas solamente las 6 h 40 min que dura el bloque de carga completo, son muy cercanas a los resultados finales obtenidos a la conclusión de la simulación.

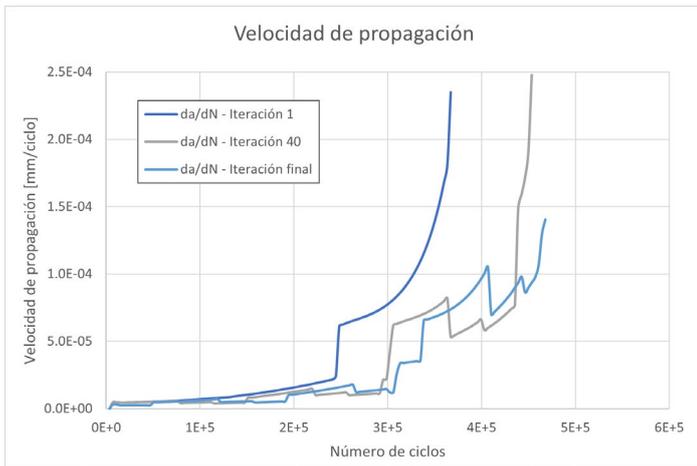


Ilustración 74. Escenario A. Velocidad de propagación de a

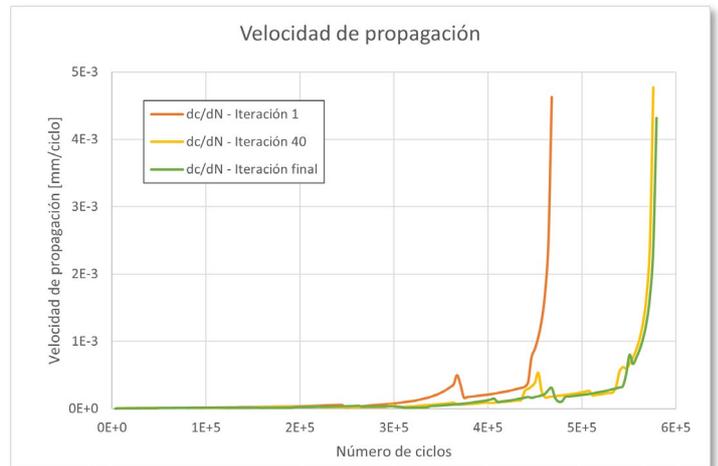


Ilustración 75. Escenario A. Velocidad de propagación de c

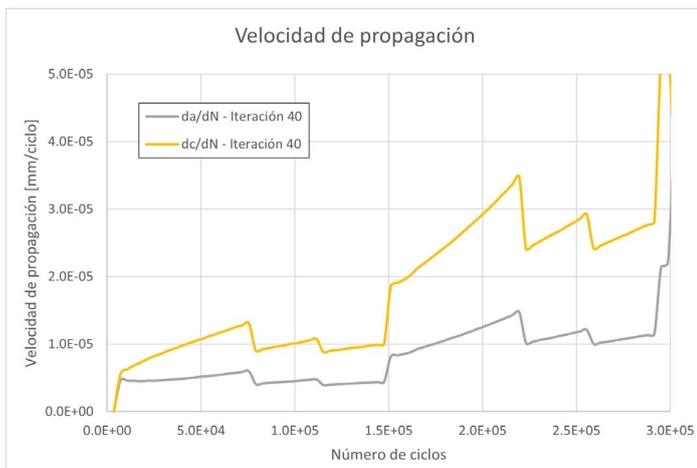


Ilustración 76. Escenario A. Velocidad de propagación de c. Ciclos iniciales

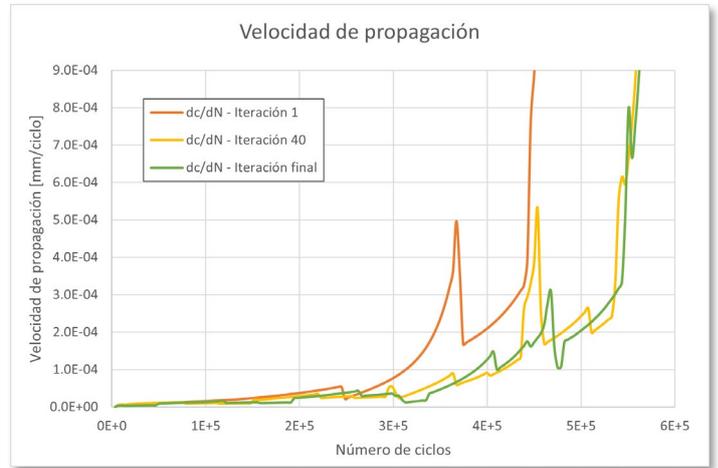


Ilustración 77. Escenario A. Velocidad de propagación de c

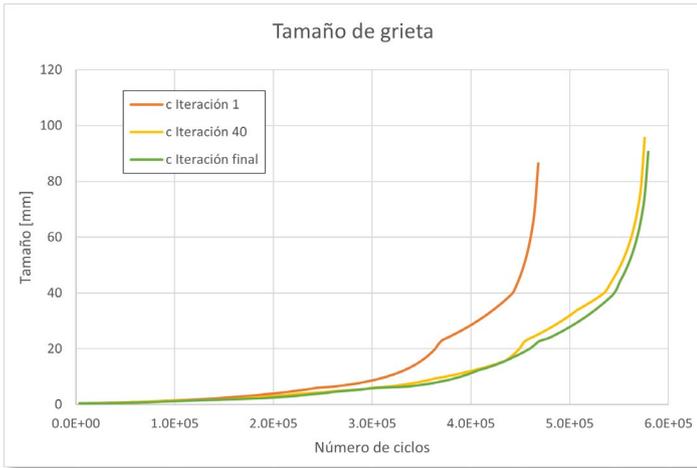


Ilustración 78. Escenario A. Tamaño de grieta, c

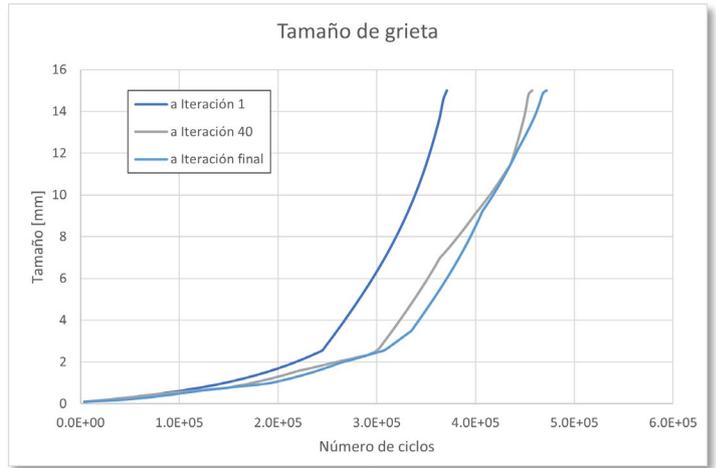


Ilustración 79. Escenario A. Tamaño de grieta, a

De estos datos, también se puede concluir que la predicción de la fase de propagación se ve directamente afectada por la estimación de vida a iniciación, ya que marca el punto del bloque de carga en el que inicia el cálculo de la propagación, pudiéndose dar el caso en que, a una menor vida de iniciación se le estime una mayor vida de propagación, y, en consecuencia, una vida total superior.

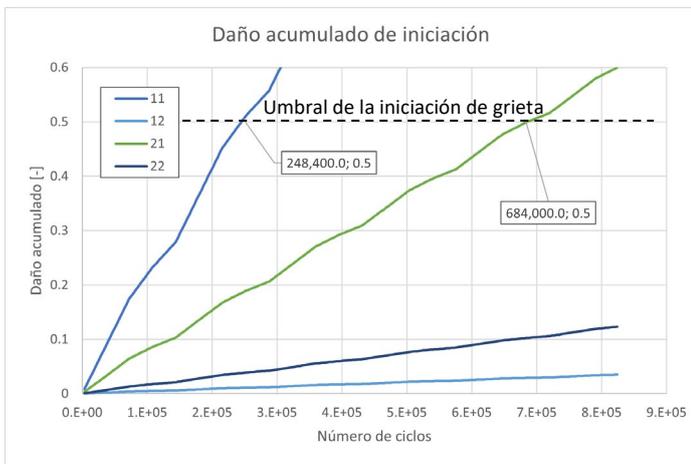


Ilustración 80. Escenario A. Daño de iniciación acumulado

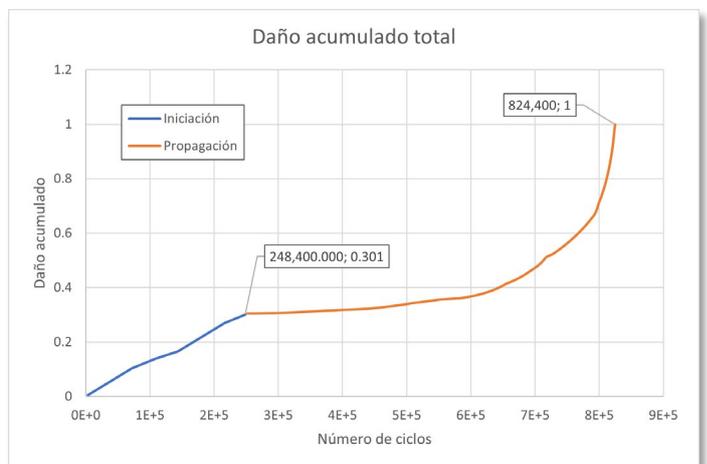


Ilustración 81. Escenario A. Daño acumulado total

En la misma línea, en la Ilustración 80 se muestra la evolución del daño acumulado de iniciación para los cordones de soldadura 11, 12, 21 y 22. Estos resultados también son idénticos de los obtenidos de los pies simétricos para el Escenario A.

Se puede observar, que efectivamente la vida de iniciación de los pies de soldadura críticos de la estructura es muy inferior al resto. De hecho, el próximo pie más crítico es el 21, y su vida de iniciación es casi el triple que el de los cordones críticos. El resto de los pies apenas logra acumular un daño de 0,1 en el momento de finalizar la

simulación. Esto valida la decisión adoptada de la no necesidad de calcular la propagación de los cordones no críticos, ya que a menos que la estructura tenga errores graves de fabricación, es prácticamente imposible que una grieta inicie en alguno de ellos. A su vez, también en esta gráfica se puede apreciar una pequeña ondulación en la evolución del daño debida a la carga cambiante, donde en los periodos de aplicación de la fuerza máxima, el daño producido es mayor y viceversa.

Asimismo, en la Ilustración 81 se muestra el daño acumulado total de la simulación, donde se incluyen las fases de iniciación y propagación. Para su elaboración, se ha considerado como parámetro representativo del daño producido en propagación, a la proporción entre el valor de la dimensión  $c$  de la grieta en cada instante, y su valor último admisible. Asignando a cada fase los ciclos de vida correspondientes, se obtiene la distribución mostrada.

En ella, se diferencian claramente las proporciones de vida a fatiga de cada fase (30% iniciación y 70% propagación), además de la tendencia lineal de la fase de iniciación frente a la exponencial de la fase de propagación. Así, llama la atención que la mitad del daño total acumulado se produzca solo en el último 15% de vida.

Respecto al Diagrama de Evaluación de Fallos, al igual que a lo largo del análisis, en la Ilustración 82, Ilustración 83 e Ilustración 85 se muestran los resultados obtenidos para la grieta 11 en las iteraciones primera, cuarentésima y última respectivamente. En las imágenes se representan en color naranja los puntos correspondientes a escenarios de grieta previos, y en verde aquellos representativos de las predicciones de propagación realizadas.

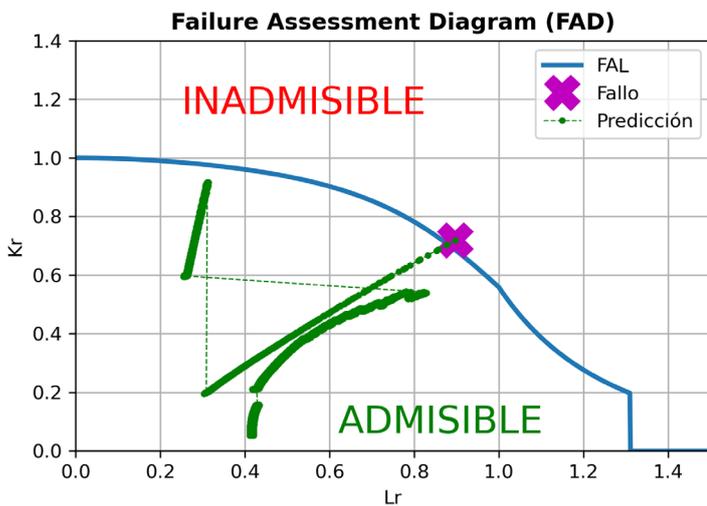


Ilustración 82. Escenario A. FAD Iteración 1

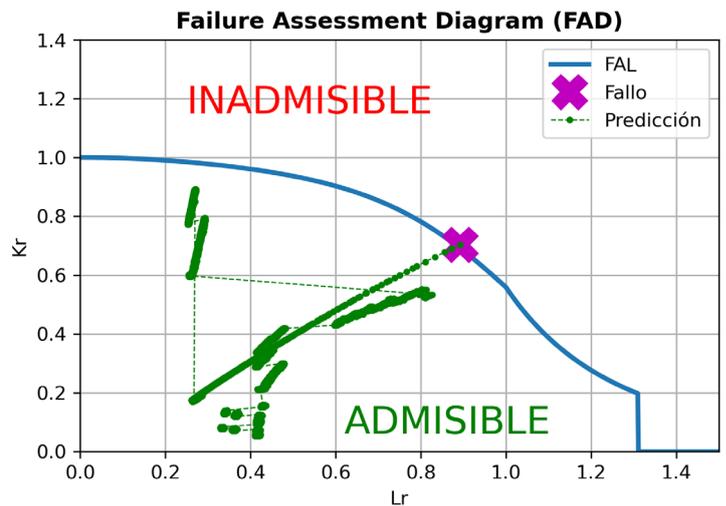


Ilustración 83. Escenario A. FAD Iteración 40

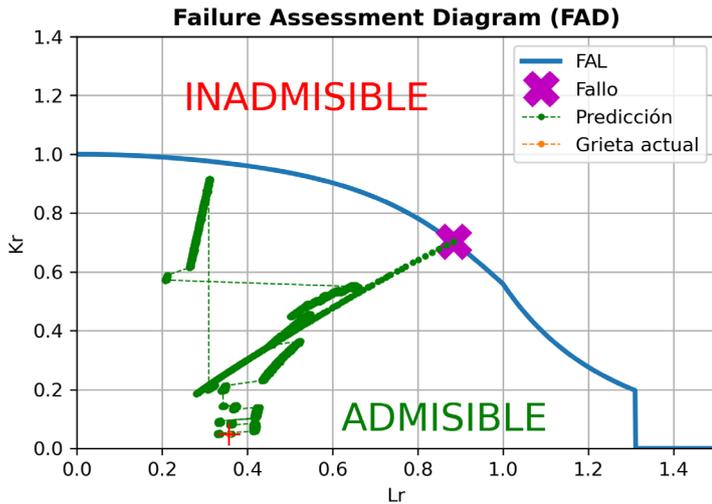


Ilustración 84. Escenario A. FAD Iteración 69

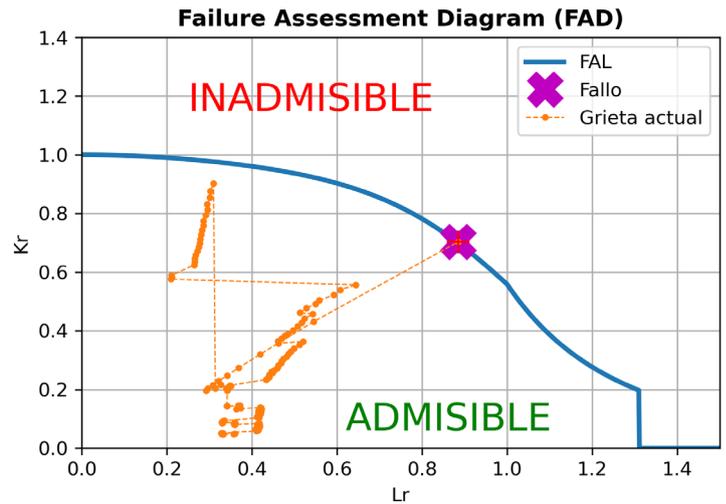


Ilustración 85. Escenario A. FAD Iteración final

En coherencia a los resultados previos, en la predicción inicial se detectan cuatro tramos diferenciados representativos de las diferentes geometrías y estados de carga que la fisura va adoptando en su expansión. Como es lógico, en todas ellas, según aumenta el tamaño de grieta iteración a iteración, los puntos se acercan más al límite de la inadmisibilidad establecido por la norma. El primer y segundo tramo corresponden a grietas semielípticas y en córner, manteniendo una tendencia curva similar. Cuando la grieta atraviesa el grosor del espesor y se convierte en pasante, cambia radicalmente de geometría, trasladándose el punto correspondiente lejos del anterior. El último tramo corresponde también a una grieta pasante, pero ya sin la influencia de las cargas secundarias debidas a la presencia de la unión soldada, por lo que la ratio de fractura,  $K_r$ , disminuye de forma contundente, manteniendo sin embargo su tendencia lineal.

Fijándose en la FAD obtenida en la iteración número 40, se observa que la grieta todavía no se ha generado y se basa completamente de una predicción. Pero a diferencia del caso anterior, esta vez se tiene en consideración la variabilidad del bloque de carga aplicado. Como es esperable, para los momentos de menor fuerza aplicada, los puntos se alejan de la zona de inadmisibilidad del diagrama. Comparando este gráfico con el del final de la simulación, se observa una vez más que la predicción realizada es muy cercana al resultado final, a diferencia del ya mencionado desfase por variación del momento de iniciación del fallo. Sin embargo, si se observa el FAD de la iteración 69 (Ilustración 84), en el cual se da la iniciación de la grieta, se ve ya que la predicción realizada es prácticamente igual al resultado final de la simulación.

### 7.6.2.2 Escenario B

En este caso, la variable protagonista de la simulación es la geometría de grieta. Recuérdese que se simulan cambios repentinos introducidos por un/una operario/a tanto de dimensión y geometría, como de ubicación en las grietas 31, 43 y 63. La grieta 11 permanece en las mismas condiciones que en el escenario A, es decir, sin alteraciones externas.

Para realizar el análisis de esta simulación, se pondrá el acento en aquellas grietas cuyas predicciones han sido actualizadas externamente, por lo que se deja de lado la

grieta 11. Los resultados para esta han sido prácticamente idénticos a los del escenario anterior, al ser la única diferencia la posible distorsión introducida por la aleatoriedad del rizado de las señales de entrada. En primer lugar, se analiza el cálculo realizado sobre la grieta número 2 (pie 31), y luego, el de la grieta número 3 (pie 43).

Así, en línea con el apartado anterior, se comienza por las predicciones de vida a fatiga. En la Ilustración 86 se muestra la evolución de las predicciones de vida total (no remanente) para las grietas 1, 2 y 3. En ella, pueden compararse los resultados del desarrollo del cálculo con cambios de geometría de grieta por parte del operario y sin ellos (grieta 1, equivalente al escenario A). En el caso de los primeros, se pueden ver de forma clara subidas y bajadas repentinas en los momentos exactos donde se realizan las actualizaciones de los tamaños de grieta.

Para la grieta número dos, se observa una caída sustancial en el ciclo 72.000, ya que el operario detecta la presencia de la grieta cuando según los cálculos del gemelo, todavía no se ha alcanzado la vida de iniciación esperada. Por lo que la vida de iniciación se establece en 0 repentinamente. Más adelante en la simulación, se observa al igual que para la grieta número uno, que una vez más, cuando el gemelo ya ha detectado el bloque de carga al completo en el ciclo 144.000, las predicciones se mantienen constantes en el tiempo. Claro está, a excepción de los cambios de geometría, estos son, dos aumentos de vida al introducir por parte del/de la operario/a dimensiones de grieta menores a las contempladas por el gemelo en ese instante, y, una bajada posterior en el ciclo 558.000 por el motivo contrario.

En el caso de la grieta número tres, se percibe por lo general el mismo comportamiento. Sin embargo, es destacable un aumento lineal en la predicción de vida en el transcurso del tiempo antes de los 360.000 ciclos. Esto se debe a que, para entonces, el gemelo ya había calculado que la extensión de la fisura no se hallaba en los márgenes de admisibilidad establecidos, por lo que había finalizado su cálculo de propagación. Pero después, se impone un tamaño de grieta inferior, lo que reanuda su proceso de cálculo explicando ese tramo de aumento de vida.

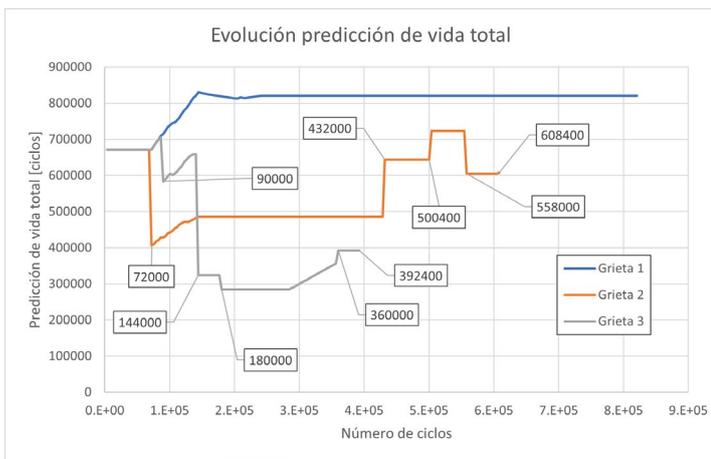


Ilustración 86. Escenario B. Predicción de vida total

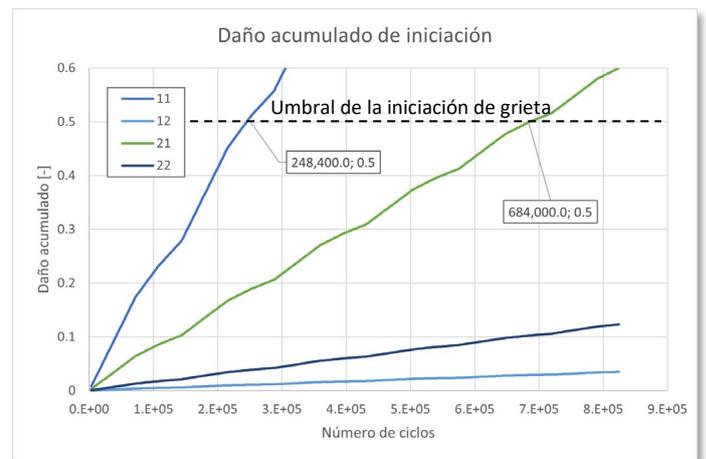


Ilustración 87. Escenario B. Daño de iniciación acumulado

Por otro lado, tal y cómo puede deducirse de la Ilustración 87, las predicciones de vida de iniciación no varían ni un ápice del caso del escenario A, ya que la carga aplicada

es la misma en ambos casos. La diferencia reside en que, en esta simulación, las grietas comienzan su fase de expansión antes de que el daño sufrido en iniciación llegue al 0,5 marcado por la norma, lo cual altera las predicciones de vida totales, pero no en cambio, las de vida de iniciación.

Fijándose ya en el tamaño de grieta y su velocidad de propagación, para la grieta número 2 se muestra su evolución en las siguientes gráficas. Los momentos correspondientes a las actualizaciones de geometría de grieta, se muestran mediante marcadores negros, a partir de los cuales, se grafican las predicciones realizadas a partir de ese evento. En estas figuras, además de confirmar los fenómenos descritos en el caso de la simulación del escenario A, se ve la respuesta esperada a los cambios de geometría para un correcto funcionamiento de gemelo. Es decir, se puede observar como las líneas de las sucesivas iteraciones siguen las tendencias predichas para ellas, a diferencia de que se encuentran desplazadas en el tiempo, debido a que, en un momento dado, cuando se imponen cambios de tamaño de grieta repentinos, dan un salto en el tiempo, ya que el tamaño de grieta considerado por el gemelo en ese instante difiere del impuesto por parte del usuario/a. De todas formas, una vez alterada su dimensión, las nuevas predicciones de la propagación de la grieta se adaptan rápidamente a la nueva situación.

Al igual que en el escenario A, las predicciones realizadas antes de llegar a la cuadragésima iteración, no se corresponden del todo con su tendencia futura. Pero, una vez aplicado el bloque de carga al completo, las predicciones representan fielmente la realidad futura.

En la Ilustración 92, se representa bajo los mismos criterios que en el apartado anterior el daño total acumulado para el pie 31 y la grieta número 2 que se genera a partir de él. En esta gráfica se puede ver de forma muy representativa la influencia de los cambios en las grietas. Se ve cómo en este caso la fase de iniciación ocupa solamente el 12% del daño total, ya que en el ciclo 72.000 se impone el fin de esta fase y el comienzo de la propagación. Asimismo, en el ciclo 432.000 (Iteración 140), disminuye el daño radicalmente en un 20% al detectarse una grieta más pequeña que la calculada, aumentando considerablemente el peso de la fase de propagación en la vida total del fallo en cuestión. Así, la vida total de la grieta es de 608.400 ciclos, 28 h 10 min, de los cuales solo 3 h y 20 min corresponden a la iniciación del fallo.

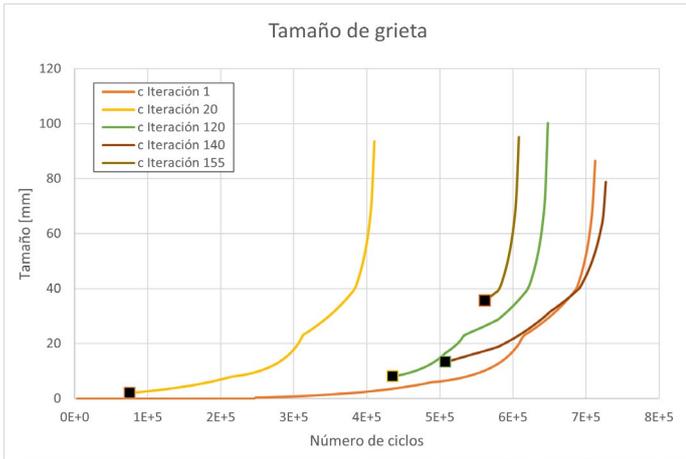


Ilustración 88. Escenario B. Grieta 2. Tamaño de grieta, c



Ilustración 89. Escenario B. Grieta 2. Tamaño grieta, a

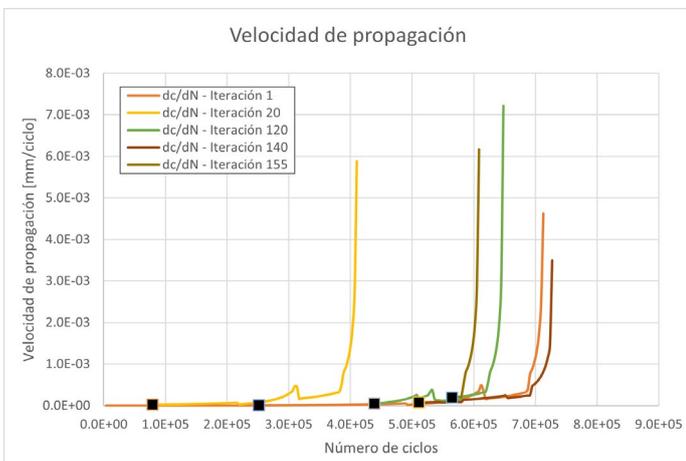


Ilustración 90. Escenario B. Grieta 2. Velocidad de propagación, c

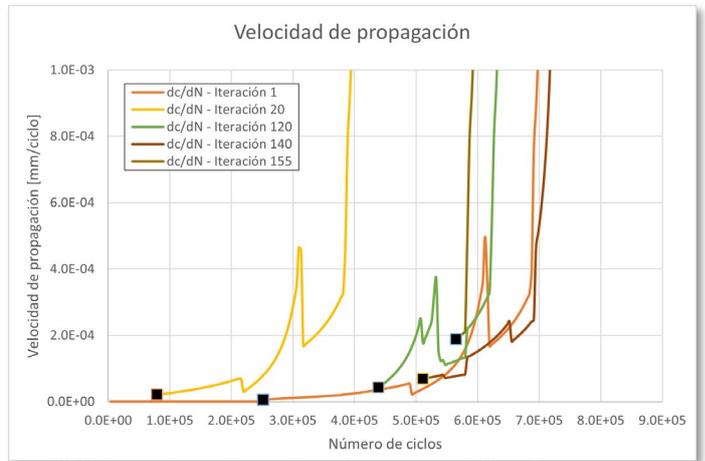


Ilustración 91. Escenario B. Grieta 2. Velocidad de propagación, c

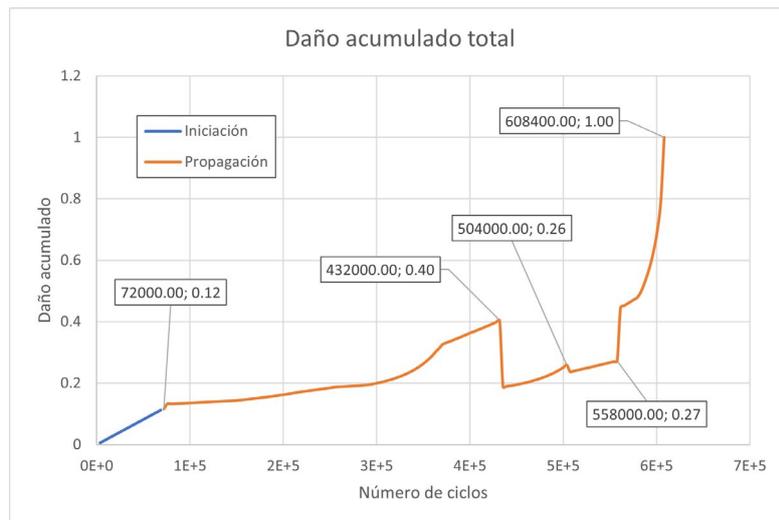


Ilustración 92. Escenario B. Grieta 2. Daño total acumulado

En lo referente a los diagramas de evaluación de fallos, los resultados muestran un comportamiento en consonancia con lo visto hasta el momento. El gráfico obtenido

tras el cálculo inicial de la primera iteración (Ilustración 93) muestra una evolución de la situación de la grieta uniforme sin apreciación alguna a las variaciones de carga o geometría de grieta, igual que en el escenario A. En el gráfico de la Ilustración 94, correspondiente al segundo cambio de geometría impuesto externamente, se puede apreciar ya en las predicciones una variabilidad en la carga aplicada, así como el propio cambio en la grieta. El punto anterior se encontraba en la zona del gráfico correspondiente a una grieta de lado a lado en esquina, y se puede observar cómo tan pronto como se cambia la geometría a una grieta en córner, las predicciones se actualizan calculando la propagación para las nuevas dimensiones de la fisura. Asimismo, en la Ilustración 95 puede verse un cambio únicamente en las dimensiones de la grieta y no en su geometría. Simplemente se establece que la grieta pasante en esquina actual tiene un tamaño mayor al presente, lo que se traduce en un salto en el diagrama, actualizándose una vez más la predicción inmediatamente.

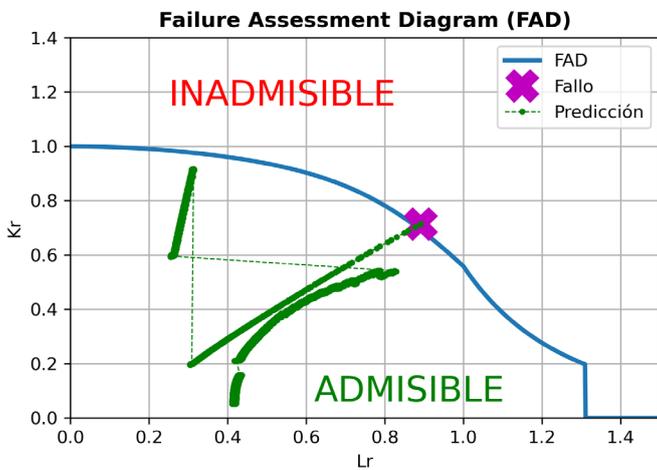


Ilustración 93. Escenario B. Grieta 2, FAD iteración 1

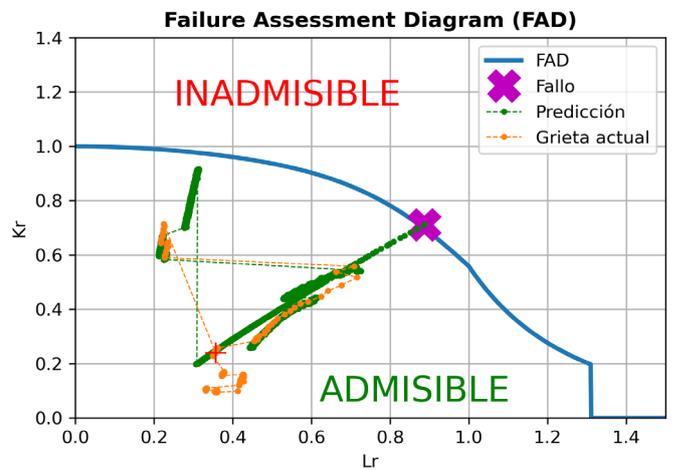


Ilustración 94. Escenario B. Grieta 2, FAD ciclo 432.000, iteración 120

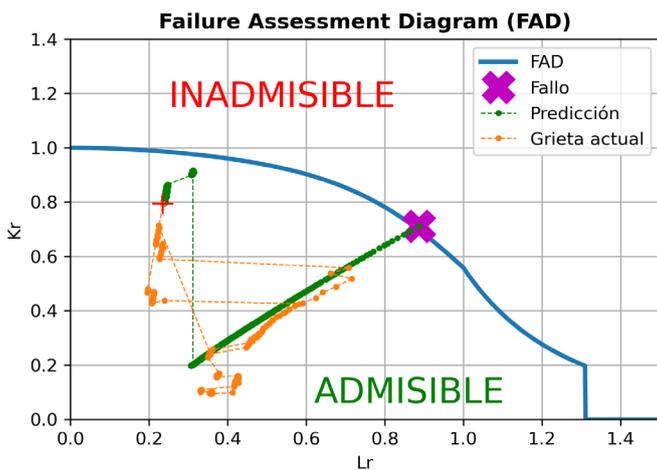


Ilustración 95. Escenario B. Grieta 2, FAD ciclo 558.000, iteración 155

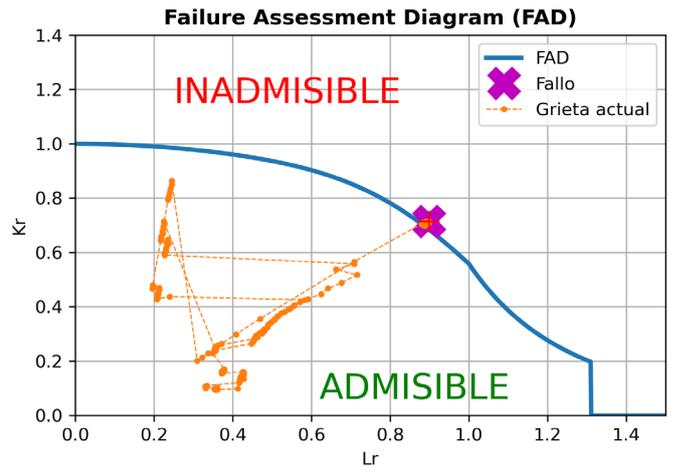


Ilustración 96. Escenario B. Grieta 2, FAD iteración final

De la Ilustración 96, correspondiente al FAD final resultante de la simulación, puede concluirse que las predicciones realizadas tan pronto como se imponen nuevas

dimensiones y geometrías de grieta (Ilustración 95), se corresponden perfectamente con el comportamiento futuro de las mismas.

Respecto a la grieta número tres, en coherencia con lo visto en la Ilustración 86 sobre las predicciones de vida total para esta fisura, la táctica empleada ha sido la contraria a la de la grieta número 2. Una vez establecida la iniciación del fallo, se han ido introduciendo dimensiones de grieta mayores que las calculadas, acortando su vida. A excepción claro de la última actualización, donde se establece una grieta menor con el fin de reanudar el cálculo de su propagación cuando este ya había terminado por considerarse las dimensiones de la grieta inadmisibles. Es este comportamiento precisamente el que puede verse reflejado en los resultados recogidos en las siguientes imágenes.

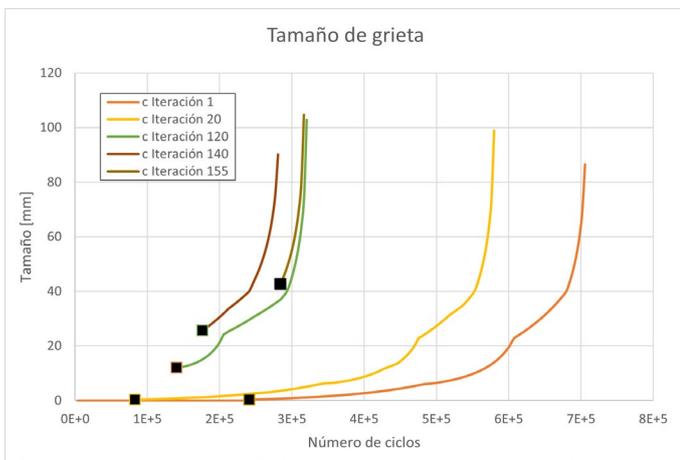


Ilustración 97. Escenario B. Grieta 3. Tamaño de grieta, c



Ilustración 98. Escenario B. Grieta 3. Tamaño de grieta, a

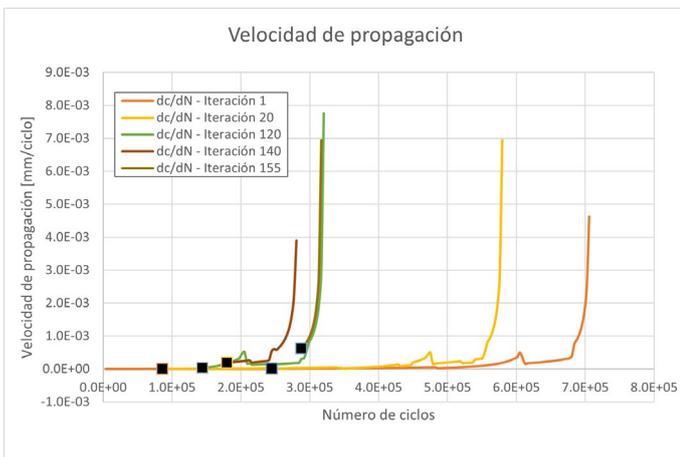


Ilustración 99. Escenario B. Grieta 3. Velocidad de propagación, c

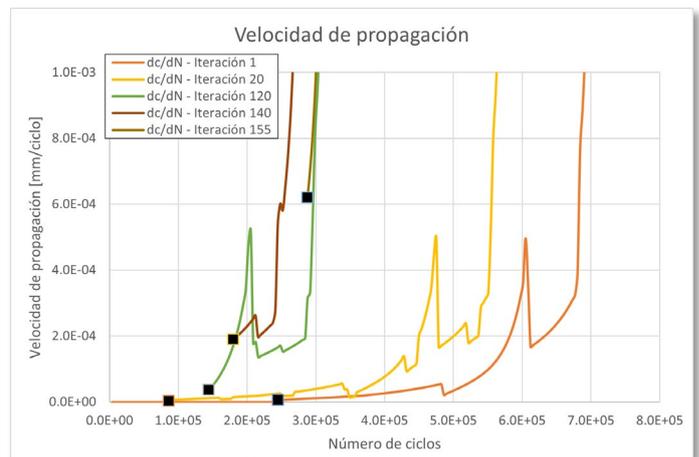


Ilustración 100. Escenario B. Grieta 3. Velocidad de propagación, a

En cuanto a la evolución de las dimensiones de la grieta como de su velocidad de propagación, se puede ver de forma manifiesta que las predicciones de la iteración 40 y en adelante reflejan una vida total muy inferior a las predicciones iniciales, donde no se había impuesto todavía el primer aumento del tamaño de la grieta. Las líneas

correspondientes a predicciones más tardías en la simulación, se sitúan mucho más a la izquierda en los gráficos, evidenciando esta misma reducción de vida.

Por otro lado, al igual que en el caso de la grieta número dos, se puede apreciar que las predicciones de las iteraciones más recientes siguen estrechamente las tendencias marcadas por las predicciones previas a ellas, a excepción, claro, de las imposiciones de cambios radicales de geometría de grieta. Aun así, también para la grieta tres, las predicciones se actualizan de manera inmediata y acertada, ya que el comportamiento futuro de la expansión de la fisura cumple dichas estimaciones. Como ya se ha mencionado, es asimismo destacable tanto en el tamaño de grieta (Ilustración 97), como en la velocidad de propagación (Ilustración 99 e Ilustración 100), la capacidad de adaptación del gemelo digital frente a la reanudación del proceso de cálculo que se daba por finalizado para una grieta ya inadmisibile (iteración 100).

Esto mismo, se ve reflejado en la representación gráfica del daño total acumulado en la Ilustración 101. En este caso, la iniciación se establece tras los 90.000 ciclos de aplicación de carga, cuando ya se ha acumulado un daño del 27%. Posteriormente, se evidencian los cambios de geometría en los ciclos 144.000 y 180.000 correspondientes a las iteraciones 40 y 50 de la simulación, donde la grieta aumenta de tamaño de forma destacada. Asimismo, puede observarse el momento en que la grieta que ya se estimaba inaceptable vuelve a estar dentro de los límites establecidos, reanudando su cálculo. Sin embargo, puede verse que este hecho se registra en el ciclo 288.000 cuando en realidad sucede en el ciclo 360.000, lo que implica efectivamente que en ese intervalo de tiempo el gemelo ha estado inactivo con respecto a esta fisura, pudiendo llevar a equívoco.

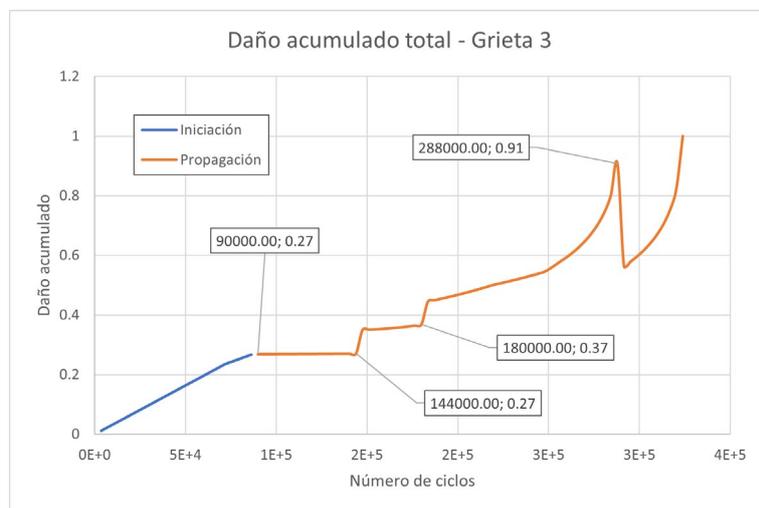


Ilustración 101. Escenario B. Grieta 3. Daño total acumulado

Por otro lado, en los siguientes Diagramas de Evaluación de Fallo obtenidos en diferentes momentos de la simulación, se confirman las conclusiones extraídas del análisis realizado para la grieta número 2, donde se observa una correcta adaptación de las estimaciones del gemelo digital a las diversas variaciones de dimensión y geometría de grieta.

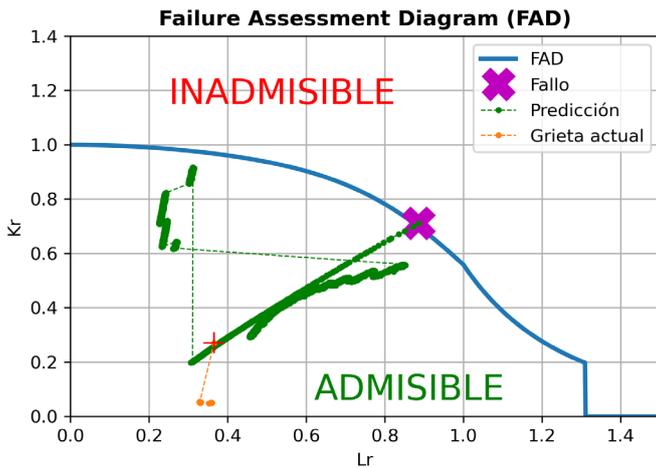


Ilustración 102. Escenario B. Grieta 3, FAD ciclo 144.000, iteración 40

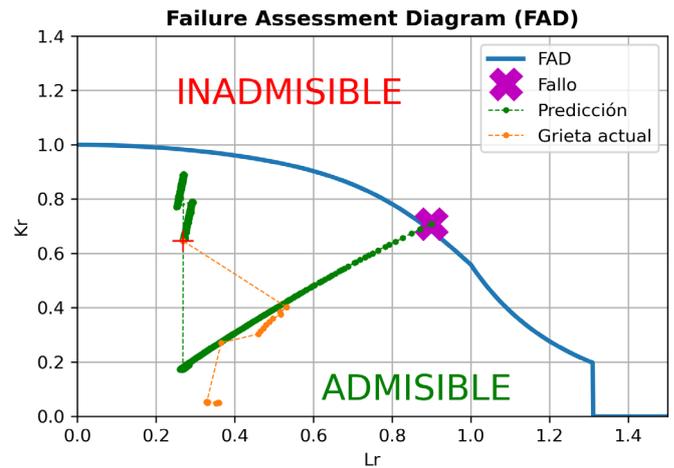


Ilustración 103. Escenario B. Grieta 3, FAD ciclo 180.000, iteración 50

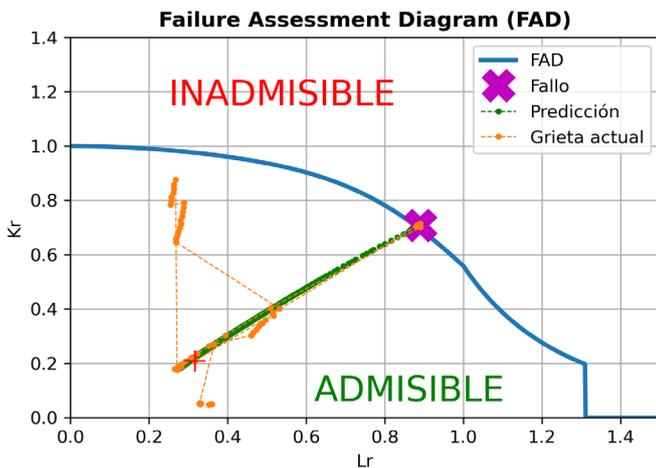


Ilustración 104. Escenario B. Grieta 3, FAD ciclo 360.000, iteración 100

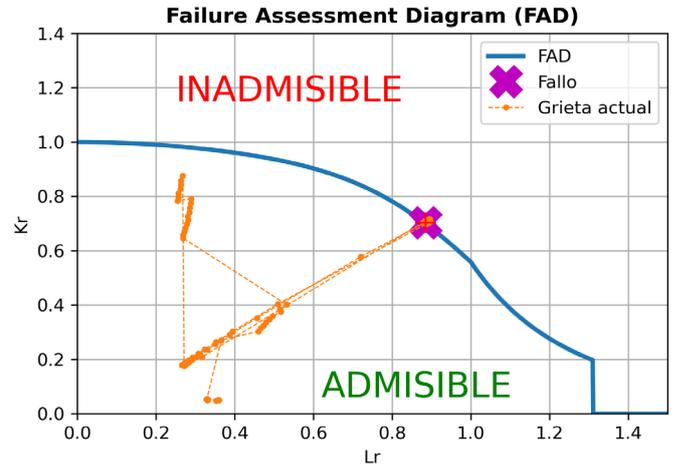


Ilustración 105. Escenario B. Grieta 3, FAD iteración final

Llegados a este punto, en este análisis no se muestran los resultados de la grieta número 4, ya que no lo enriquecen, siendo estos equivalentes a los ya expuestos para el resto de las grietas en este escenario B de simulación.

### 7.6.2.3 Escenario C

En este escenario se estudia la influencia de la variable de la incertidumbre en las lecturas de las galgas extensiométricas. Para ello, se recuerda que el valor predeterminado es de un 15%, y que en este escenario se analizan valores del 30%, escenario C1, y del 45%, escenario C2.

Al igual que ocurre en el escenario A, el comportamiento de las cuatro grietas críticas de la estructura es idéntica debido a la doble simetría de la misma, con lo que únicamente se analizan los resultados de la grieta número 1 (pie 11) en los diferentes escenarios.

Tal y cómo cabía esperar, la evolución de la grieta en ambos escenarios, C1 y C2, ha sido muy similar, como también lo ha sido con respecto al escenario A. La única diferencia que se percibe en estas simulaciones, reside en que al introducir un ruido mayor a las lecturas de las galgas, las señales resultantes de su filtrado infravaloran la magnitud de las medidas reales, disminuyendo mínimamente las velocidades de propagación de las grietas y en última instancia alargando un poco la vida de la estructura.

En las siguientes gráficas se muestran las evoluciones de las dimensiones de las grietas y sus velocidades de propagación para los escenarios A, C1 y C2. Estas reflejan de forma clara el fenómeno descrito. Cuanto mayor sea la incertidumbre de las galgas, más se infravaloran las señales de deformaciones, menores son las tensiones calculadas para cada punto de la estructura, más moderada es la propagación de la grieta y mayor es la vida. En la Ilustración 106 e Ilustración 107, se puede ver que ambas dimensiones de las grietas siguen la misma evolución en todos los casos a diferencia de un pequeño desfase temporal, en consonancia con las velocidades de propagación de las mismas, Ilustración 108 e Ilustración 109, donde se observa el mismo comportamiento.

En consecuencia, la vida a fatiga en cada caso es ligeramente desigual. Las tres grietas, aunque no en el mismo instante inician en la misma iteración, con lo que la fase de propagación empieza en los tres casos en el mismo ciclo, el 248.400. Por lo tanto, la diferencia reside en la vida de propagación. En el escenario A, ha sido de 576.000 ciclos, en el escenario C1, de 579.600 ciclos, y en el escenario C2, de 583.200. Es decir, en cada caso la grieta ha propagado durante una iteración más del proceso de cálculo del gemelo.



Ilustración 106. Escenario C. Tamaño de grieta, c

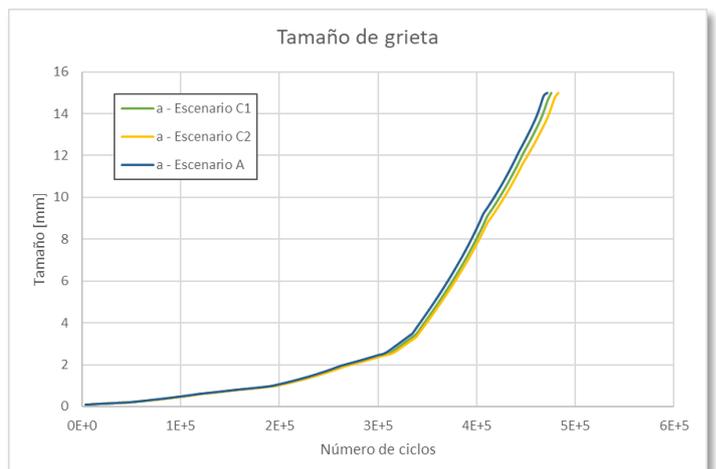


Ilustración 107. Escenario C. Tamaño de grieta, a

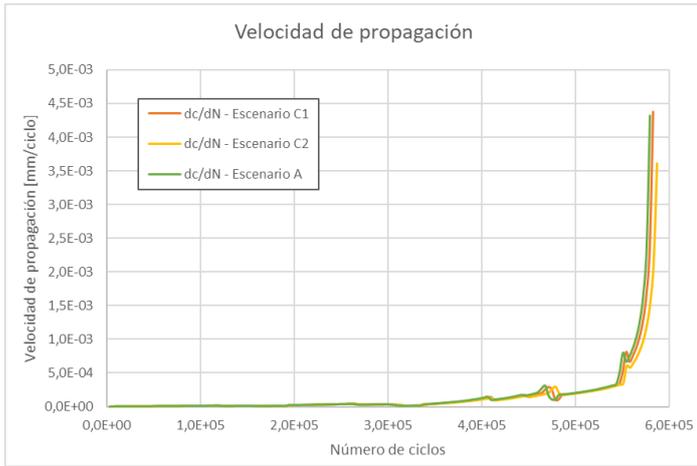


Ilustración 108. Escenario C. Velocidad de propagación, c

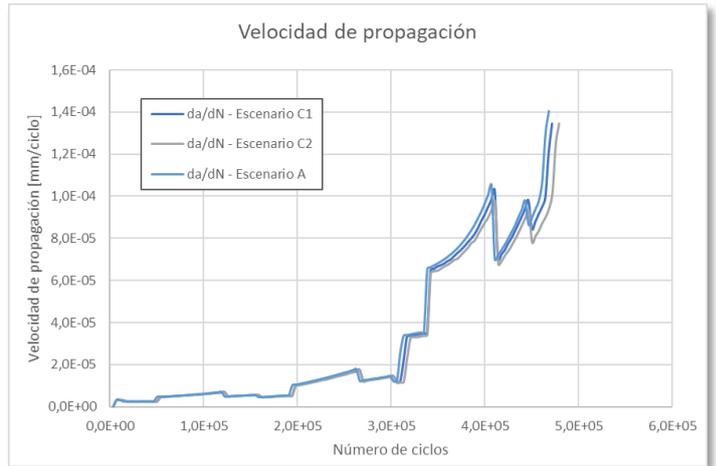


Ilustración 109. Escenario C. Velocidad de propagación, a

## 8. MEMORIA ECONÓMICA

En este apartado se muestra el análisis económico de este Trabajo de Fin de Máster. Tiene como objetivo mostrar el descargo de gastos de todas las actividades realizadas y recursos empleados en la elaboración de este proyecto.

Este presupuesto se organiza en cinco partes. En primer lugar, se contabilizan los gastos directos del proyecto, formados por los recursos humanos, las amortizaciones, los recursos materiales y las subcontrataciones. Después, se citan los gastos indirectos derivados del desarrollo del trabajo. Finalmente, se recogen todos los anteriores en un presupuesto total del proyecto.

### 8.1 Recursos Humanos

Está compuesto por el gasto del personal, teniéndose en cuenta todos los trabajadores involucrados directamente en el desarrollo de este proyecto. Para su cálculo se cuantifica la dedicación en horas de cada participante con su correspondiente tasa horaria.

Tabla 18. Gastos del personal.

Nombre	Concepto	Dedicación [h]	Tasa [€/h]	Coste [€]
Iñaki Amilleta Urkiri	Autor del TFM. Ingeniero técnico.	932	6,2	5.778,4
Mikel Escalero	Jefe de proyecto. Investigador PhD.	104	36	3.744
Bartomeu Mora	Módulo de SV. Doctorando.	205	16	3.280
Jon Basurko	Supervisor módulo de SV. Investigador PhD.	25	45	1.125
Mireia Olave	Responsable de departamento. Investigadora PhD.	10	53	530
<b>Coste TOTAL [€]</b>				<b>14.457,4</b>

### 8.2 Amortizaciones

A continuación, se enumeran las amortizaciones a considerar en este proyecto. Estos costes se deben principalmente a licencias de softwares informáticos empleados en el desarrollo del proyecto, así como al propio ordenador. En realidad, los precios de

las licencias son mayores en sus versiones corporativas, sin embargo, para este trabajo se han utilizado licencias para estudiantes.

Tabla 19. Amortizaciones.

Amortización	Coste total [€]	Vida útil [h]	Uso [h]	Coste [€]
Ordenador	1.200	10.000	932	111,84
Licencias software:				
Ansys	3.000	8.760	400	136,99
MatLab	1.000	8.760	100	11,42
SolidWorks	2.000	8.760	40	9,13
Microsoft Office 365	99	8.760	300	3,39
<b>Coste TOTAL [€]</b>				<b>272,77</b>

### 8.3 Recursos materiales

En la siguiente tabla se recogen los costes relativos a los bienes materiales empleados para llevar a cabo el proyecto.

Tabla 20. Recursos materiales.

Concepto	Unidades	Precio unitario [€]	Coste [€]
Material de oficina	-	-	100
Fabricación del demostrador de la prensa, Angova Mecánicas	2	795	1.590
Pack de galgas de propagación de grietas RDS 20, HBK Ibérica	2	229	458
Pack de galgas de propagación de grietas RDS 17.8, HBK Ibérica	7	169,56	1.186,92
Galgas extensiométricas uniaxiales FLA-2-23-5LT, Tokyo Measuring Instruments Lab. (TML)	10	13,2	132
<b>Coste TOTAL [€]</b>			<b>3.466,92</b>

### 8.4 Subcontrataciones

En este proyecto no ha habido subcontrataciones de ningún tipo.

## 8.5 Gastos indirectos

Los gastos indirectos derivados de este proyecto se cuantifican en un 15% de los gastos directos del mismo, es decir, 2.729,56€.

## 8.6 Presupuesto total

Finalmente, en la tabla siguiente se muestra el presupuesto total del proyecto.

*Tabla 21. Presupuesto total.*

Concepto	Coste [€]
Recursos humanos	14.457,4
Amortizaciones	272,77
Recursos materiales	3.466,92
Subcontrataciones	0
Gastos directos	18.197,09
Gastos indirectos	2.729,56
<b>Coste TOTAL</b>	<b>20.926,65</b>

## 9. CONCLUSIONES

---

En términos generales, se concluye que el resultado final de este Trabajo Fin de Máster es satisfactorio, ya que su objetivo principal de desarrollar y demostrar la validez de un gemelo digital para la predicción de la vida útil remanente de una estructura análoga a la bancada de una prensa cuyo modo de fallo es la iniciación y la propagación de grietas en fatiga, se ha cumplido ampliamente. En las siguientes líneas, se abordarán punto a punto las conclusiones del desarrollo de este proyecto.

Para empezar, en cuanto al diseño del demostrador, se ha cumplido el objetivo propuesto al comienzo del proyecto. Por un lado, gracias al proceso de optimización de diseño se ha conseguido que la estructura sea representativa de la bancada de la prensa real. En ambos casos, el fallo viene dado por una grieta que comienza en la unión soldada entre el lateral de la bancada y el travesaño central que une ambos laterales. Además, dicha optimización también ha permitido reducir la vida de iniciación de grieta a un tiempo aproximado de medio día, que puede ser viable considerando la disponibilidad del banco de ensayos y la probable subestimación de la vida predicha por hipótesis conservadoras. Por otro lado, se ha elaborado con éxito una propuesta para la sensorización y monitorización de la estructura con los medios disponibles.

En segundo lugar, la fase de desarrollo e implementación del gemelo digital se ha llevado a cabo con éxito. Por una parte, tras un amplio análisis de numerosas normas y estándares internacionales sobre fallos a fatiga en estructuras metálicas, se ha definido una metodología clara de cálculo para las fases de iniciación y propagación de grieta, con el fin de realizar una predicción de vida de la estructura lo más precisa posible. Por otra parte, se ha conseguido elaborar un sistema de sensorización virtual, mediante el cual se deducen los estados tensionales de cualquier punto de la estructura partiendo de las medidas de únicamente cuatro galgas extensiométricas uniaxiales debidamente colocadas. Asimismo, se ha conseguido implementar el gemelo digital en un entorno Python y cumple con las directrices de normas como "DNVGL-ST-0361" [1], "BS 7910:2013+A1:2015" [3] y "IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components" [2]. Considerando únicamente las uniones críticas conocidas de antemano, el gemelo digital establece la vida total de la estructura como el tiempo que necesitaría una grieta para iniciarse en el punto más crítico y crecer en la sección de la pieza en el plano de grieta.

Pese a cumplir con los estándares internacionales, ha sido necesario realizar simplificaciones de cálculo que introducen conservadurismo a las estimaciones. Entre otros se destacan:

- 1) El cálculo de daño en base a curvas S-N genéricas para el acero, y con una fiabilidad del 97%.
- 2) La sobreestimación del estado tensional en los puntos del plano de la grieta, debido al proceso de linealización realizado y la consideración de cargas secundarias debidas a la presencia de uniones soldadas.

A propósito de la última fase del proyecto relativa a la demostración del gemelo digital, se ha estudiado el funcionamiento del sistema pudiendo emular diversos escenarios donde poder analizar los resultados obtenidos por el gemelo. Así, diversos comportamientos mostrados indican el correcto funcionamiento del gemelo digital, ya que dichas tendencias tienen sentido:

- 1) El GD prevé un crecimiento de grieta donde esta comienza como un defecto superficial en la zona crítica, propaga hasta convertirse en una grieta de lado a lado, y se extiende a lo largo del lateral hasta llegar a su inadmisibilidad.
- 2) El GD estima una velocidad de propagación exponencialmente ascendente que provoca la rotura cuando la grieta es de aproximadamente el 45% de la sección.
- 3) Dentro de una misma geometría de grieta, la velocidad de propagación aumenta exponencialmente cuanto mayor sea la dimensión de la grieta con respecto al área no fracturada de la sección del plano de la grieta.
- 4) La grieta se actualiza correctamente de acuerdo con el input de usuario/a.
- 5) La vida resultante de actualizaciones de tamaño de grieta se reduce o aumenta dependiendo de si la grieta experimental es mayor o menor, respectivamente, que la estimada en ese momento.
- 6) Las predicciones de vida disminuyen y las velocidades de propagación aumentan en coherencia a una mayor magnitud de la carga aplicada, y viceversa.
- 7) Las predicciones se mantienen constantes una vez observado el bloque de carga al completo.

De igual modo, se han demostrado las capacidades del gemelo en cuanto a su adaptabilidad frente a variaciones repentinas de dimensiones de las grietas, o a la alta incertidumbre de las señales medidas por las galgas.

En consecuencia, se concluye que, a falta de contrastar los resultados obtenidos con ensayos de fatiga reales, las predicciones realizadas por el gemelo, así como su funcionamiento son válidos.

Finalmente, se exponen posibles líneas de trabajo futuras con el objeto de completar este proyecto. El aspecto más relevante en este sentido es la realización de los mencionados ensayos de fatiga en un banco de pruebas real. Este sería el último paso en la demostración de la validez del gemelo digital desarrollado. Para ello, se sugiere trabajar en el diseño y desarrollo de una interfaz de usuario gráfica para el control de dichas pruebas, la visualización de los resultados obtenidos, así como la interacción informativa con un/una operario/a para la introducción del input de mediciones de grietas. Asimismo, debe elaborarse un sistema de adquisición de datos encargado de la transformación de las señales obtenidas de la sensorización a ficheros legibles para el gemelo digital. En una perspectiva a medio y largo plazo, también podrían añadirse más métodos de sensorización virtual para la obtención de tensiones,

ampliando las fuentes del principal input del sistema. Por último, si se siguiera desarrollando el gemelo digital, podría acabar implementándose en otras estructuras.

En este sentido, la empresa donde se han realizado las prácticas externas que culminan en este Trabajo Fin de Máster, IKERLAN, S. Coop., ha mostrado su intención de continuar con el proyecto.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] DNV GL, “DNVGL-ST-0361 Machinery for wind turbines,” 2016. [Online]. Available: <http://www.dnvgl.com>
- [2] A. F. Hobbacher, “IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components,” 2016. doi: 10.1007/978-3-319-23757-2.
- [3] The British Standards Institution, *BS 7910:2013+A1:2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. BSI Standards Publication, 2015.
- [4] Jaime Domínguez Abascal, “La fatiga de los materiales y su tolerancia al daño,” *El Mundo*, Jan. 22, 2018. Accessed: Aug. 31, 2021. [Online]. Available: <https://www.elmundo.es/economia/2018/01/16/5a5de0e4e5fdeaad3c8b45e5.html>
- [5] Ikerlan, “Conoce Ikerlan.” <https://www.ikerlan.es/conoce-ikerlan> (accessed Jul. 20, 2021).
- [6] “Imágenes de ejemplos de prensas industriales.” <https://www.faccin.com/product/pps/> (accessed Sep. 16, 2021).
- [7] Ikerlan, “El proyecto MIRAGED desarrollará gemelos digitales para la mejora de la industria 4.0,” 2020. <https://www.ikerlan.es/notas-de-prensa/notas-de-prensa/el-proyecto-miraged-desarrollara-gemelos-digitales-para-la-mejora-de-la-industria-40> (accessed Jul. 20, 2021).
- [8] Ministerio de Ciencia e Innovación, “Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial.” <https://www.cdti.es/> (accessed Jul. 20, 2021).
- [9] J. Brnic, G. Turkalj, J. Niu, M. Canadija, and D. Lanc, “Analysis of experimental data on the behavior of steel S275JR - Reliability of modern design,” *Materials and Design*, vol. 47, pp. 497–504, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.037.
- [10] M. D’Addario, *Gestión del mantenimiento preventivo - correctivo*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015.
- [11] I. Antoniadou, N. Dervilis, E. Papatheou, A. E. Maguire, and K. Worden, “Aspects of structural health and condition monitoring of offshore wind turbines,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 373, no. 2035, Feb. 2015, doi: 10.1098/rsta.2014.0075.
- [12] S. Lundman and P. Paréus, “Virtual Sensing for Fatigue Assessment of the Rautasjokk Bridge,” Stockholm, 2018.
- [13] K. Tatsis, E. Chatzi, and E. Lourens, “Reliability prediction of fatigue damage accumulation on wind turbine support structures,” in *UNCECOMP 2017 - Proceedings of the 2nd International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering*, 2017, vol. 2017-January, pp. 76–89. doi: 10.7712/120217.5353.17130.
- [14] D. Hajjalizadeh, E. J. O’Brien, and A. J. O’Connor, “Virtual structural health monitoring and remaining life prediction of steel bridges,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 264–273, 2017, doi: 10.1139/cjce-2016-0286.
- [15] K. Maes, G. de Roeck, A. Iliopoulos, W. Weijtjens, C. Devriendt, and G. Lombaert, “Kalman filter based strain estimation for fatigue assessment of an offshore monopile wind turbine,” 2016.

- [16] D. C. Papadioti, D. Giagopoulos, C. Papadimitriou, and H. S. Atamturktur, "Model Validation and Uncertainty Quantification," *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 3, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04552-8\_4.
- [17] V. Giurgiutiu, "Smart sensors for monitoring crack growth under fatigue loading conditions," *Smart Structures and Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 101–113, 2006.
- [18] S. Tewolde, R. Höffer, H. Haardt, and J. Krieger, "Structural Health Monitoring results as an input for asset management of offshore wind turbine support structures."
- [19] European Committee for Standardisation, "EN 1993-1-9: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue," 2005.
- [20] W. Fricke, "IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue," 2013.
- [21] C.-P. Fritzen, P. Kraemer, and M. Klinkov, "An Integrated SHM Approach for Offshore Wind Energy Plants," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, vol. 3, no. 1, pp. 727–740, 2011.
- [22] Lichuan Liu, S. M. Kuo, and M. Zhou, "Virtual sensing techniques and their applications," Mar. 2009. doi: 10.1109/ICNSC.2009.4919241.
- [23] C. Papadimitriou, C. P. Fritzen, P. Kraemer, and E. Ntotsios, "Fatigue predictions in entire body of metallic structures from a limited number of vibration sensors using Kalman filtering," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 18, no. 5, pp. 554–573, Aug. 2011, doi: 10.1002/stc.395.
- [24] B. R. J. K. H. K. and S. B. J. B. Lin, "A systematic approach for soft sensor development," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 31, no. 5–6, pp. 419–425, 2007.
- [25] J. Kullaa, "COMBINED EMPIRICAL AND ANALYTICAL VIRTUAL SENSING INSTRUCTURAL DYNAMICS FOR UNCERTAINTY REDUCTION," pp. 443–466, 2015.
- [26] T. Woodbury and A. N. Srivastava, "Analysis of virtual sensors for predicting aircraft fuel consumption," *AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit 2012*, pp. 1–15, 2012, doi: 10.2514/6.2012-2449.
- [27] T. N. J. Geelen, "Time Domain Force Identification for Noise and Vibration Prediction in Vehicles," TU Delft, 2019.



# ANEXO I

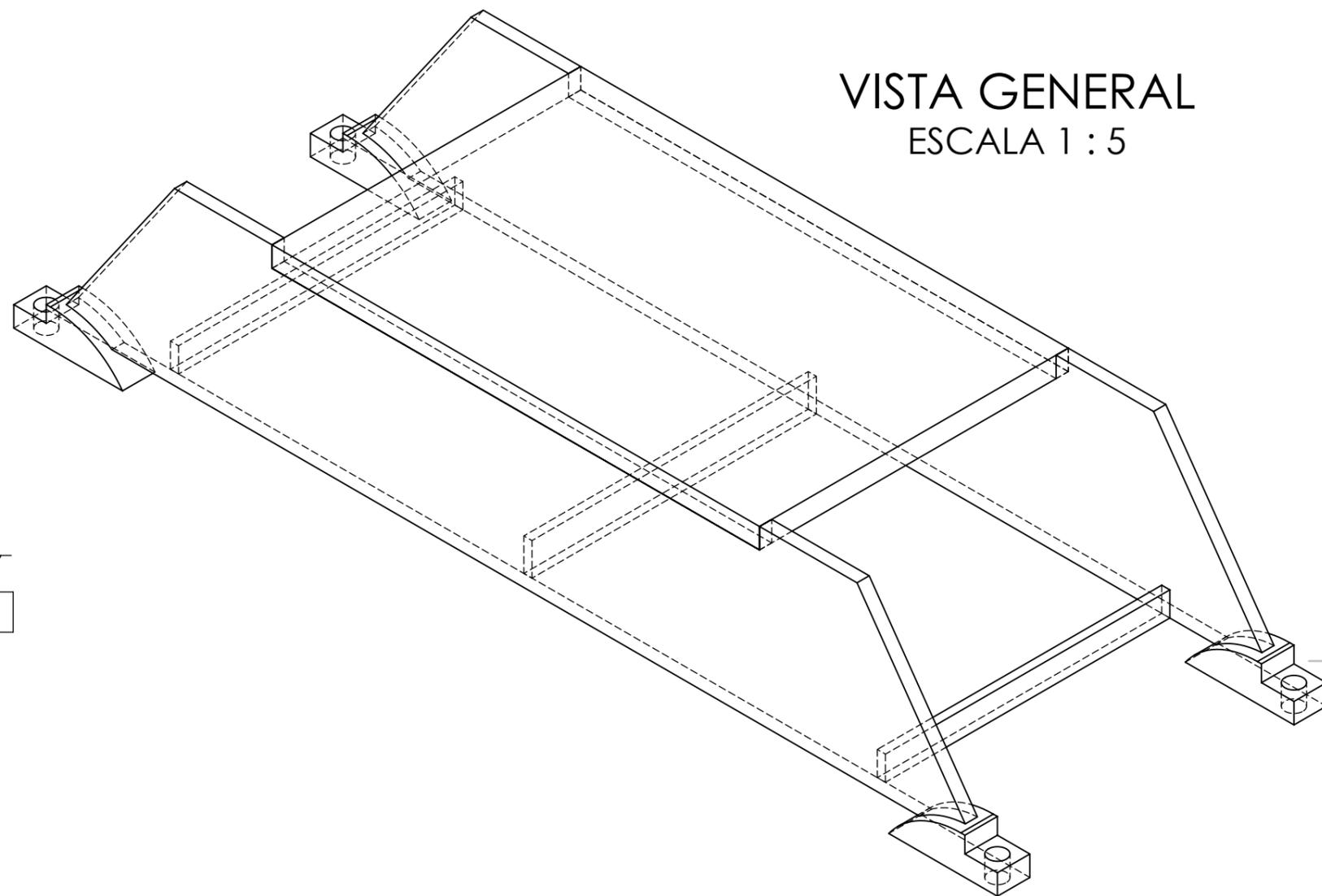
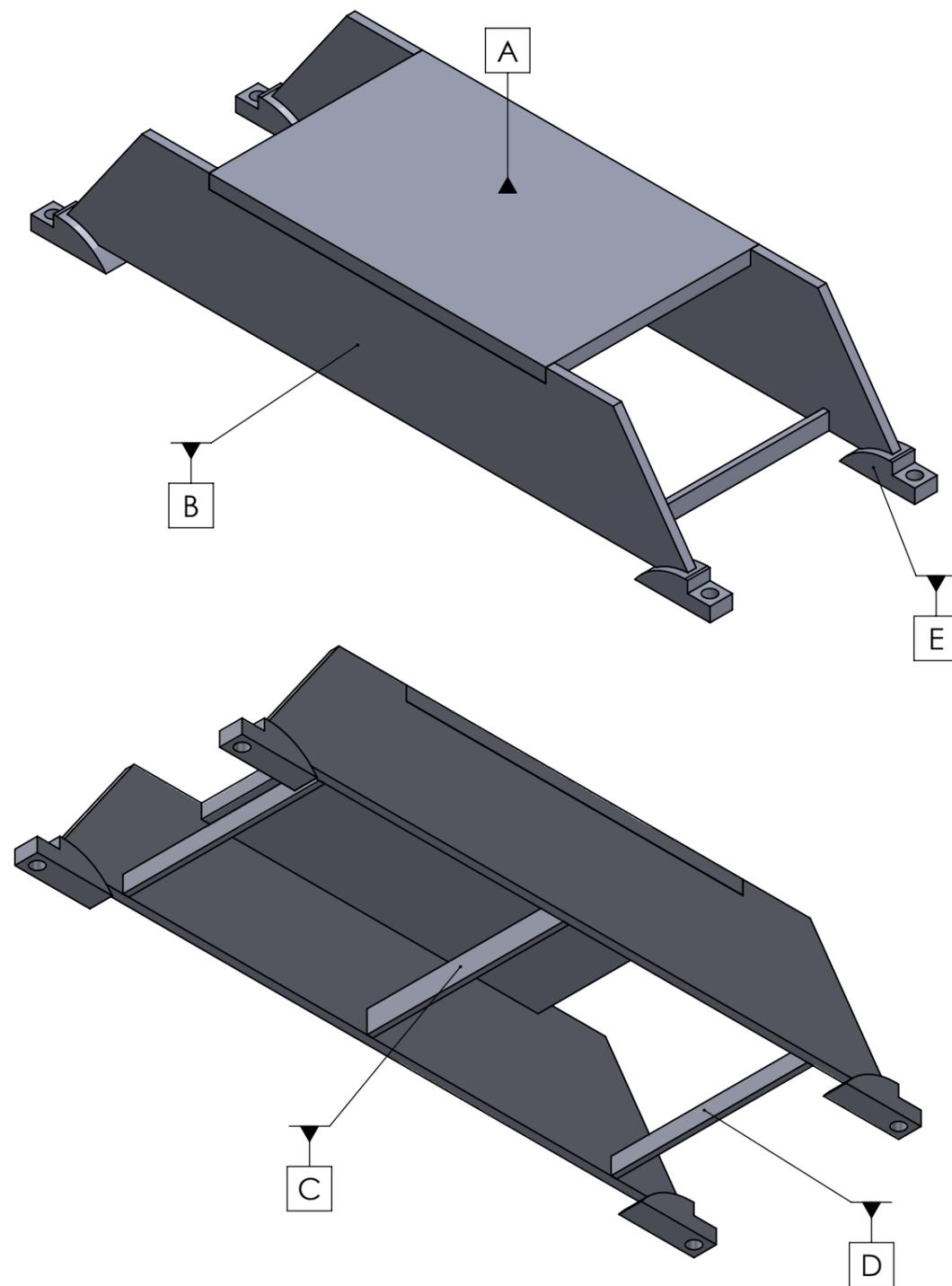
## PLANOS DEL DEMOSTRADOR

---

## Gemelo digital de una estructura análoga a la bancada de una prensa para la predicción de su vida útil remanente a fatiga

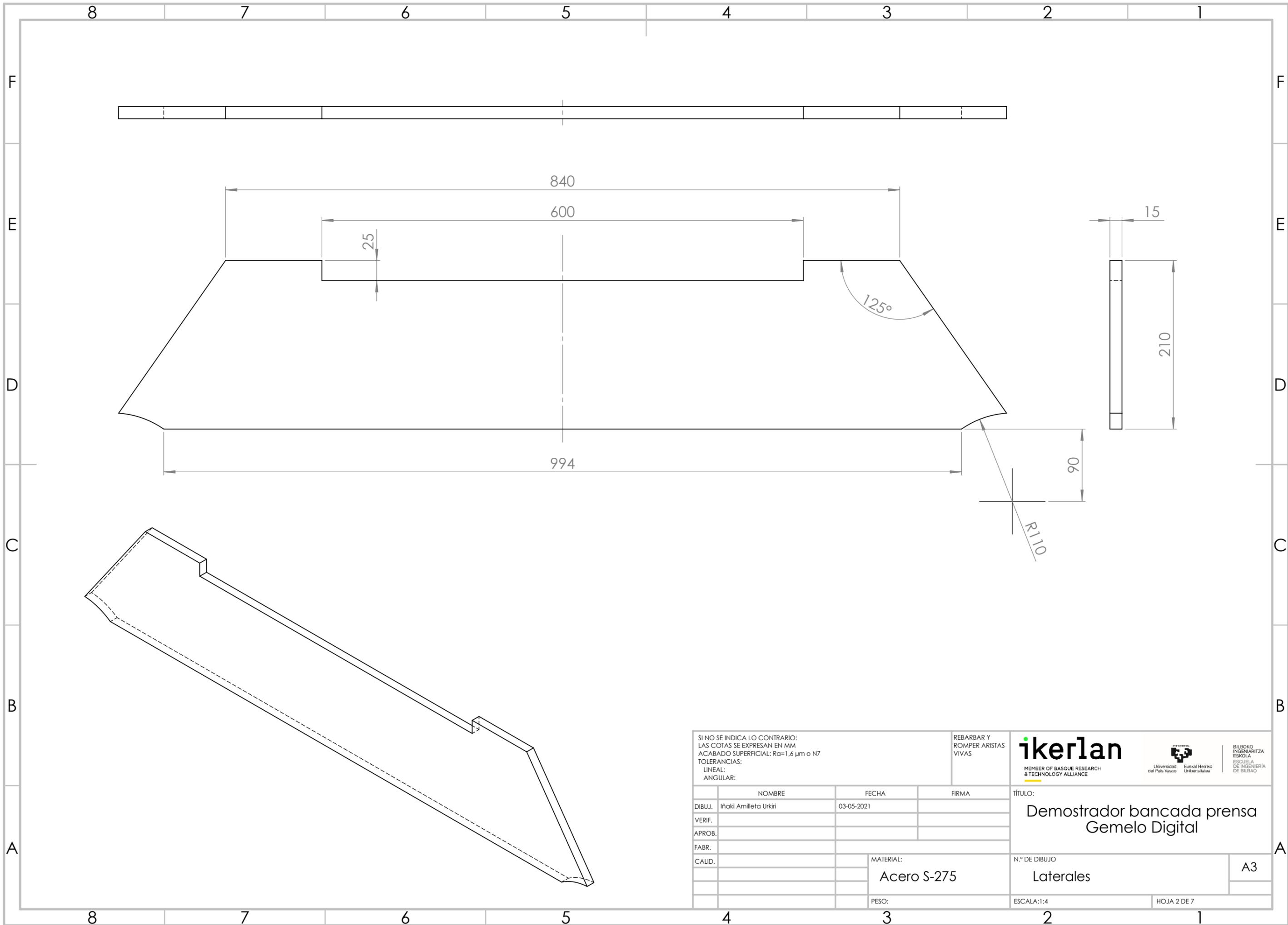
# VISTA GENERAL

## ESCALA 1 : 5

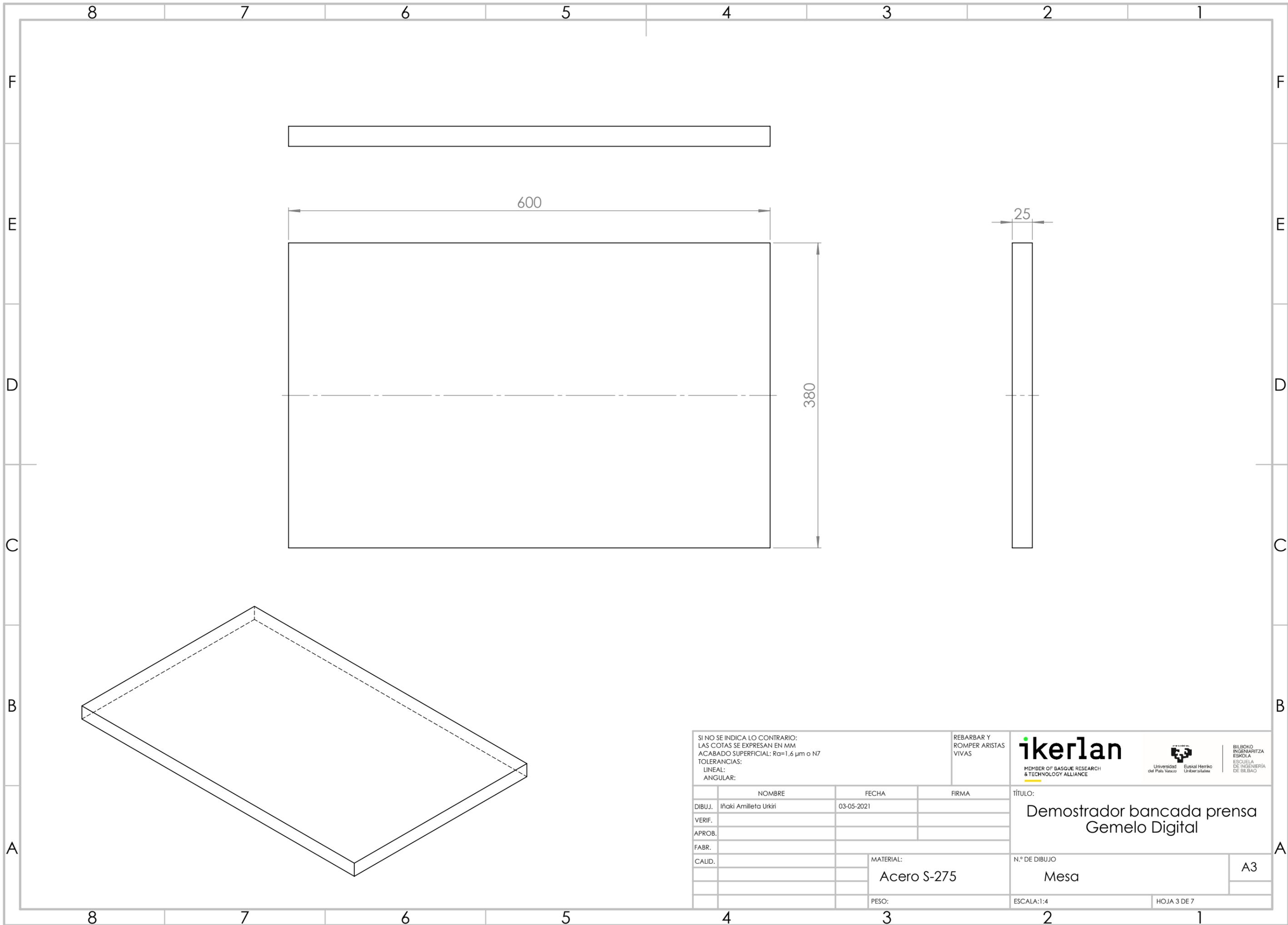


Ref.	Elemento	Cantidad
A	Mesa	1
B	Laterales	2
C	Travesaño central	1
D	Travesaños laterales	2
E	Apoyos	4

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: Ra=1,6 µm o N7 TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	<b>ikerlan</b> MEMBER OF BASQUE RESEARCH & TECHNOLOGY ALLIANCE		BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA ESKOLA DE INGENIERIA DE BILBAO
DIBUJ. Iñaki Amilleta Urkiri		FECHA 03-05-2021	FIRMA	TÍTULO: Demostrador bancada prensa Gemelo Digital	
VERIF.		MATERIAL: Acero S-275		N.º DE DIBUJO Vista general	A3
APROB.		PESO:		ESCALA: 1:8	HOJA 1 DE 7
FABR.					
CALID.					



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: Ra=1,6 µm o N7 TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	 MEMBER OF BASQUE RESEARCH & TECHNOLOGY ALLIANCE	 Euskal Herriko Unibertsitatea	 ESKOLA DE INGENIERIA DE BILBAO
DIBUJ.	Iñaki Amilleto Urkiri	FECHA	03-05-2021	FIRMA	TÍTULO: Demostrador bancada prensa Gemelo Digital	
VERIF.					N.º DE DIBUJO Laterales	
APROB.					A3	
FABR.					MATERIAL: Acero S-275	
CALID.					PESO:	
					ESCALA: 1:4	
					HOJA 2 DE 7	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL: Ra=1,6 µm o N7  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

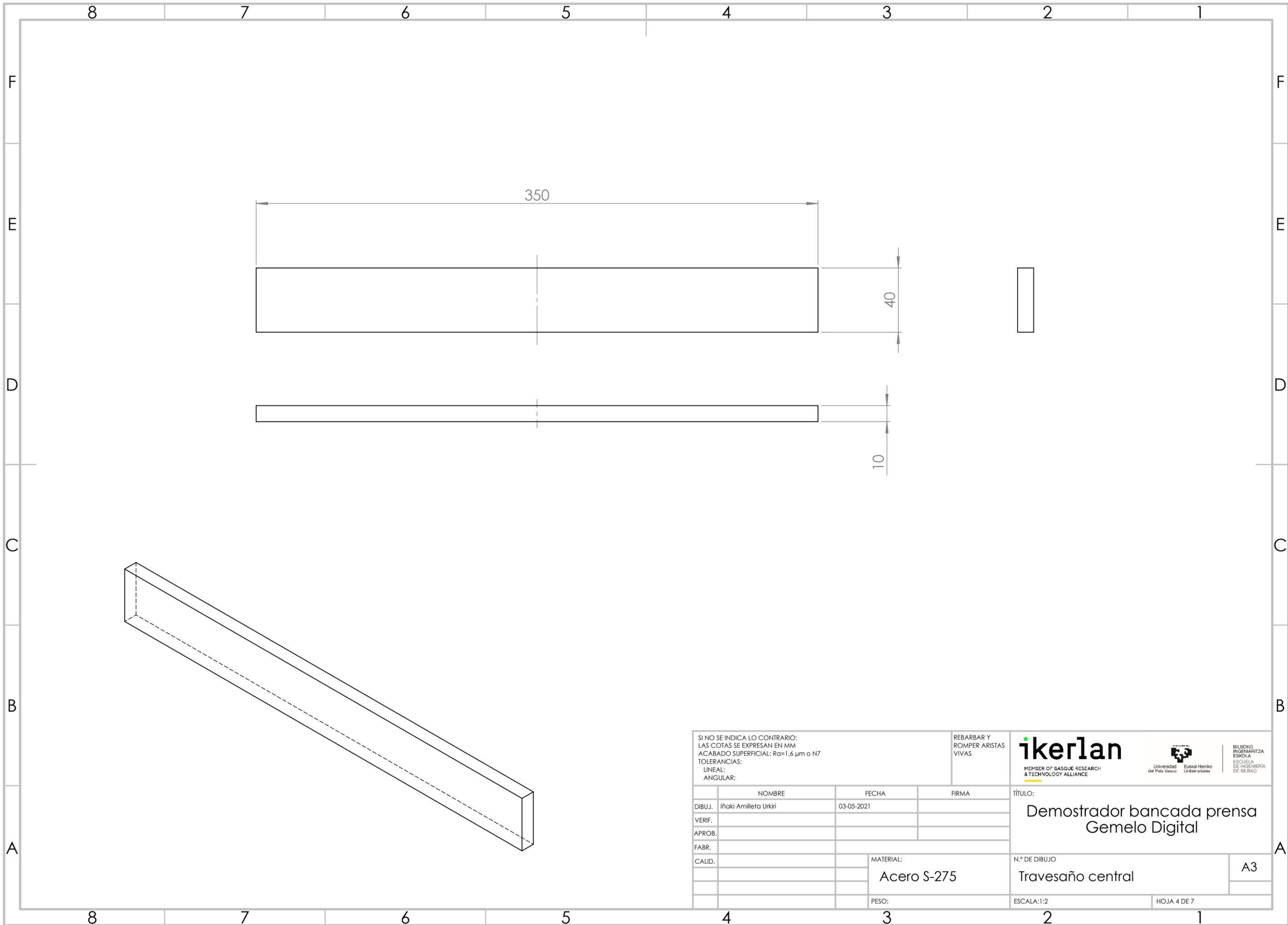
REBARBAR Y  
 ROMPER ARISTAS  
 VIVAS



BILBOKO  
 INGENIARITZA  
 ESKOLA  
 ESCUELA  
 DE INGENIERÍA  
 DE BILBAO

	NOMBRE	FECHA	FIRMA
DIBUJ.	Iñaki Amilleto Urkiri	03-05-2021	
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			
		MATERIAL:	
		Acero S-275	
		PESO:	

TÍTULO:	Demostrador bancada prensa Gemelo Digital
N.º DE DIBUJO	Mesa
ESCALA: 1:4	HOJA 3 DE 7
	A3



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL: Ra=1,6 µm o N7  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

REBARBAR Y  
 ROMPER ARISTAS  
 VIVAS



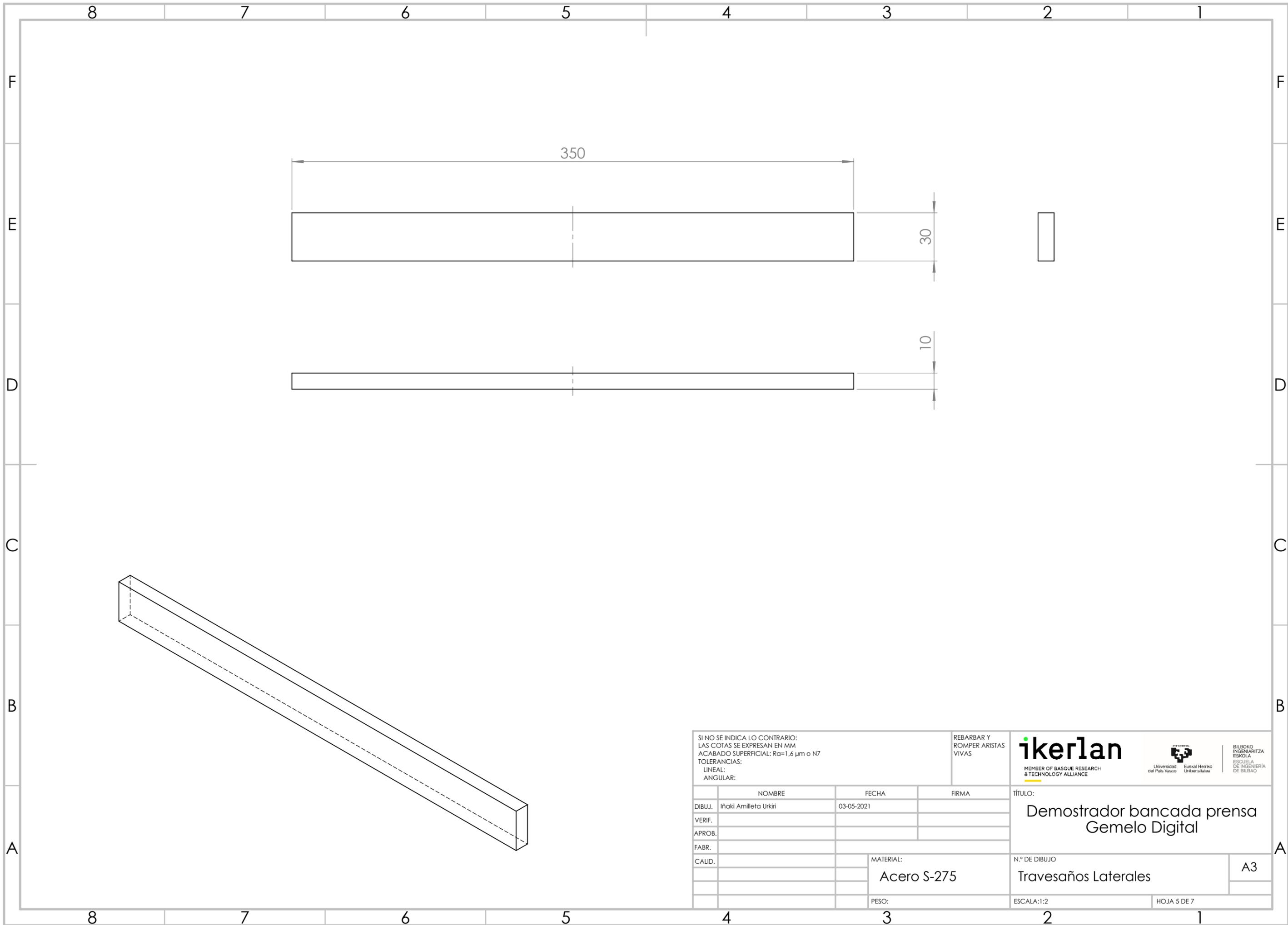
BILBOKO  
 INGENIARITZA  
 ESKOLA  
 ESCUELA  
 DE INGENIERIA  
 DE BILBAO

	NOMBRE	FECHA	FIRMA
DIBUJ.	Iñaki Amilleto Urkiri	03-05-2021	
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:	
Demostrador bancada prensa Gemelo Digital	
N.º DE DIBUJO	A3
Travesaño central	
ESCALA: 1:2	HOJA 4 DE 7

MATERIAL:  
 Acero S-275

PESO:



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL: Ra=1,6 µm o N7  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

REBARBAR Y  
 ROMPER ARISTAS  
 VIVAS

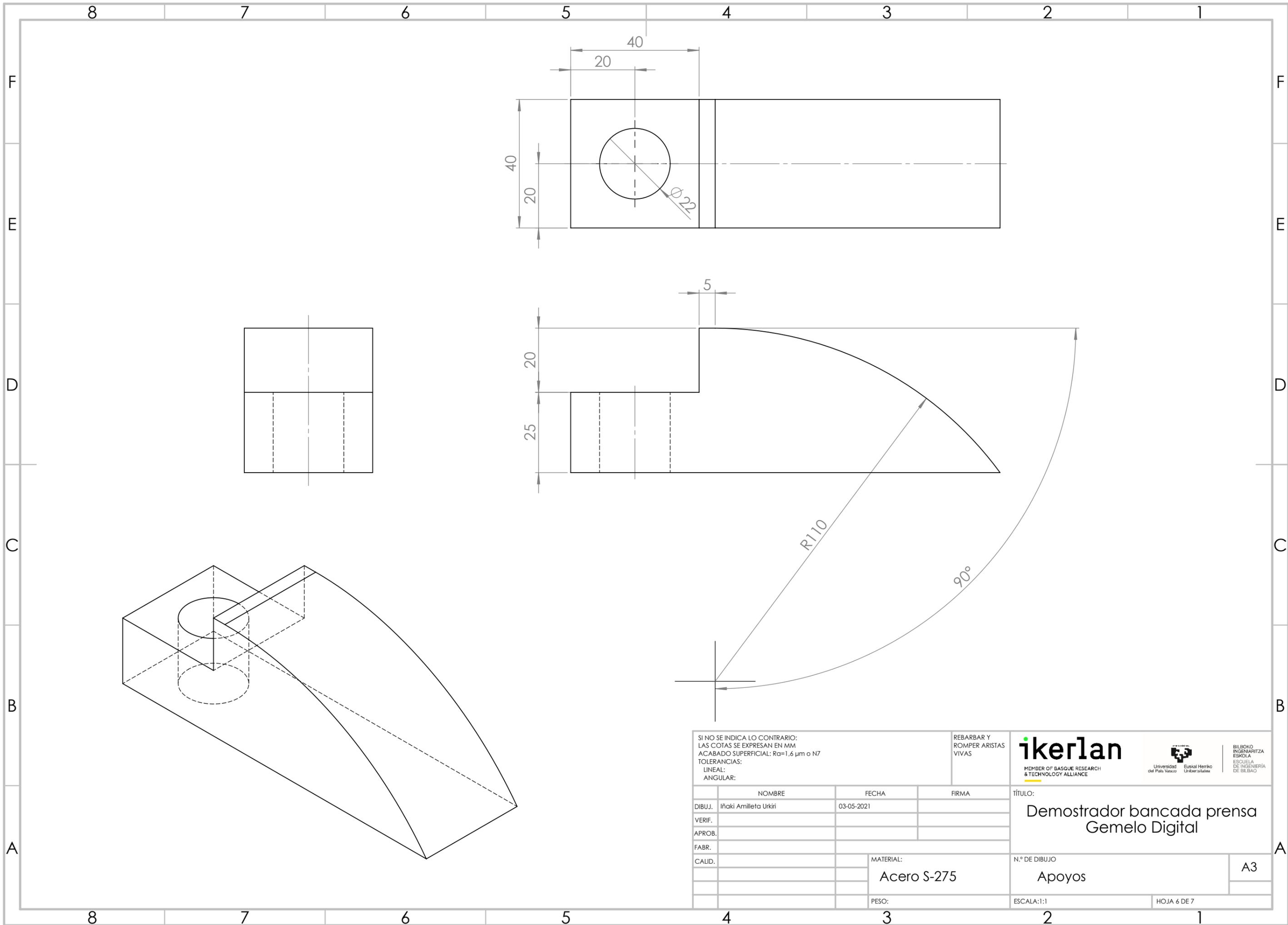
**ikerlan**  
 MEMBER OF BASQUE RESEARCH  
 & TECHNOLOGY ALLIANCE



BILBOKO  
 INGENIARITZA  
 ESKOLA  
 ESCUELA  
 DE INGENIERIA  
 DE BILBAO

	NOMBRE	FECHA	FIRMA
DIBUJ.	Iñaki Amilleto Urkiri	03-05-2021	
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			
		MATERIAL:	
		Acero S-275	
		PESO:	

TÍTULO:	Demostrador bancada prensa Gemelo Digital
N.º DE DIBUJO	Travesaños Laterales
ESCALA: 1:2	HOJA 5 DE 7
	A3



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL: Ra=1,6 µm o N7  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

	NOMBRE	FECHA	FIRMA
DIBUJ.	Iñaki Amilleto Urkiri	03-05-2021	
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

MATERIAL:  
**Acero S-275**

PESO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

**ikerlan**  
 MEMBER OF BASQUE RESEARCH & TECHNOLOGY ALLIANCE

Universidad del País Vasco  
 Euskal Herriko Unibertsitatea

BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA  
 ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

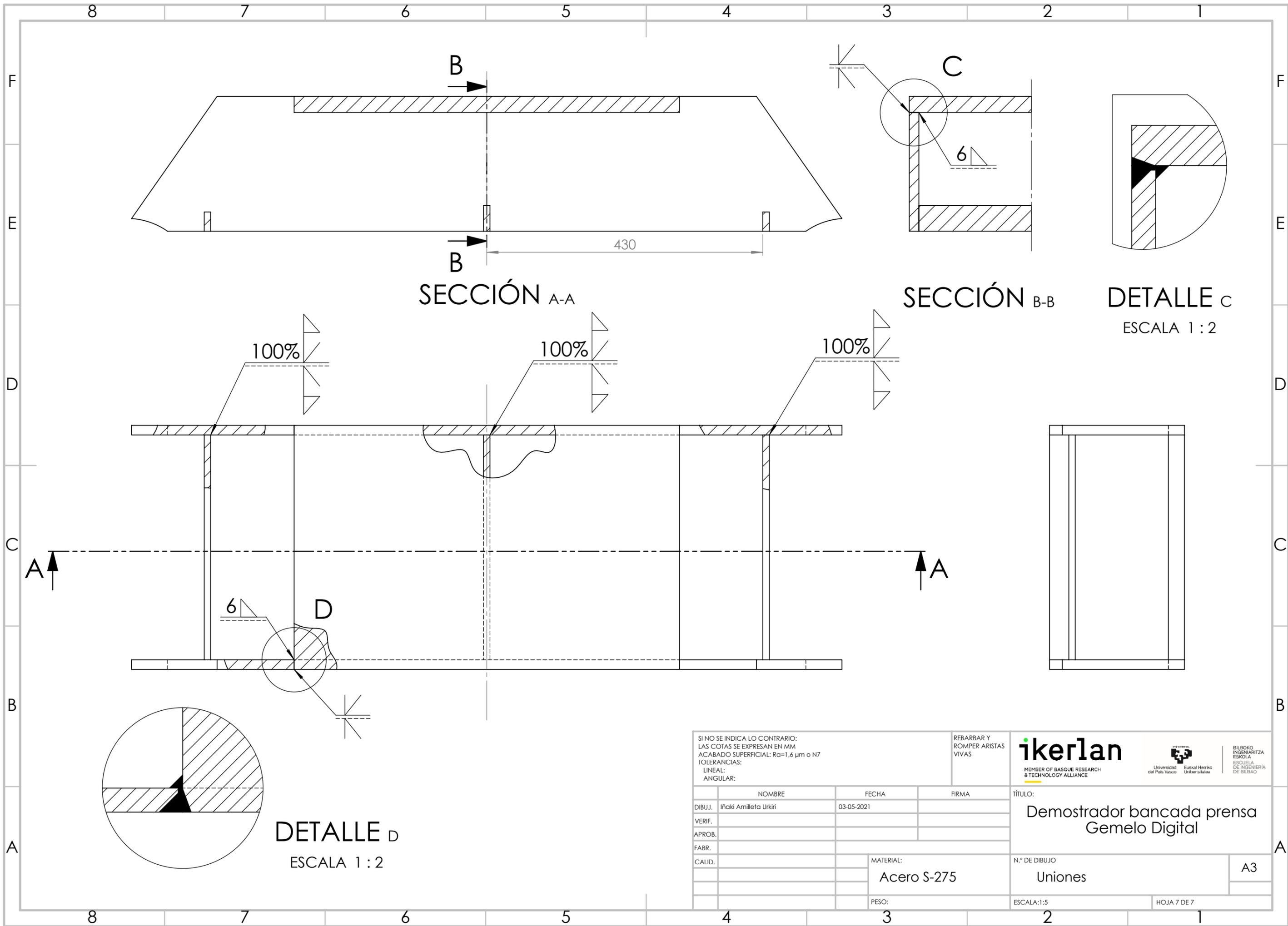
TÍTULO:  
**Demostrador bancada prensa Gemelo Digital**

N.º DE DIBUJO  
**Apoyos**

ESCALA: 1:1

HOJA 6 DE 7

A3



# ANEXO II

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA CURVA S-N SINTÉTICA

---

