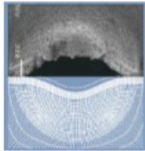




Universidad de
Oviedo



Máster interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Título del trabajo:

**Programación de una herramienta para el análisis
de la integridad estructural para el sector eólico onshore**

Alumno: Imanol García Pedrero
Tutor académico: Dra. Dña. María Cristina Rodríguez González
Tutor de la empresa: Tomás E. García Suárez
Departamento: Construcción e Ingeniería de Fabricación

Universidad de Oviedo

Julio 2018

ÍNDICE GENERAL

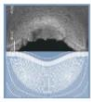


ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL.....	2
MEMORIA	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. PROBLEMÁTICA OBJETO DE ESTUDIO	9
1.2. OBJETIVOS.....	10
1.2.1. Objetivos secundarios	10
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	11
2. ANTECEDENTES.....	13
2.1. IMPORTANCIA DE LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL	13
2.2. PROCEDIMIENTOS DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN USO.....	15
2.2.1. BS 7910	15
2.2.2. FITNET.....	16
2.2.3. ASME BPVC XI	17
2.2.4. API 579	18
2.2.5. EDF Energy R5 y R6	19
3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ACEPTADA	20
3.1. PROGRAMA INFORMÁTICO.....	20
3.2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL UTILIZADO.....	20
3.3. LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	22
4. EL PROCEDIMIENTO BS7910:2013.....	23
4.1. INTRODUCCIÓN AL PROCEDIMIENTO BS7910	23
4.2. FRACTURA-COLAPSO PLÁSTICO	25
4.2.1. Acciones sobre la estructura	27
4.2.2. Efecto de la temperatura en las propiedades del material	28
4.2.3. Línea de fallo (FAL)	29
4.2.4. Relación de fractura, K_r	36
4.2.5. Relación de carga, L_r	39
4.2.6. Constraint (condición de confinamiento).....	40
5. HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DESARROLLADA.....	42
5.1. LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	42
5.2. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA.....	43
5.3. POSIBLES RESULTADOS	51
6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	55
6.1. CONCLUSIONES.....	55
6.2. TRABAJO FUTURO	56
7. PRESUPUESTO	57
7.1. LICENCIA DE PROGRAMAS INFORMÁTICOS Y BIENES DE EQUIPO.....	57
7.2. MANO DE OBRA.....	57



7.3. PRESUPUESTO PARCIAL.....	57
7.4. PRESUPUESTO GENERAL	57
ANEXOS	61
ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO.....	62
A.1. ASPECTOS GENERALES	62
A.2. INTERFAZ “INTRO”	63
A.3. INTERFAZ “MENU”	63
A.3.1. Panel “Input data”	65
A.3.2. Panel “Manual characterization”	65
A.3.3. Panel “Plot options”	66
A.3.4. Panel “Failure Analysis Diagram (FAD)”	67
A.3.5. Panel “Security factor in loads”	68
A.3.6. Panel “Additional data”	69
A.4. INTERFAZ “FAD_SELECTOR”	70
A.5. INTERFAZ “MATERIAL_SELECTOR”	73
A.5.1. Interfaz “LOAD_SELECTOR”	75
A.6. INTERFAZ “GEOMETRY_SELECTOR”	76
A.6.1. Interfaz “ELEMENT_TYPE”	79
A.6.2. Interfaz “PLATES”	79
A.6.3. Interfaz “CURVED_SHELLS”	81
A.6.4. Interfaz “SPHERES”	82
A.6.5. Interfaz “ROUND_BARS_AND_BOLTS”	83
A.6.6. Interfaz “WELD_JOINTS”	84
A.7. INTERFAZ “INTENSIFICATION_FACTORS”	85
A.8. CÁLCULO Y RESULTADOS.....	87
ANEXO B. MANUAL DEL PROGRAMADOR.....	89
B.1. DISTRIBUCIÓN DE CARPETAS.....	89
B.2. PRINCIPIOS DE DISEÑO DEL PROGRAMA	90
B.2.1. Distribución general del programa	90
B.2.2. Líneas de diseño del programa	91
B.3. FORMATO DE LOS OBJETOS	93
B.4. VARIABLES	95
B.4.1. Variables globales	95
B.5. EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS DE CÓDIGO COMPLEJAS	98
B.5.1. Código de interpolación de la Tabla M.2 del Anexo M (Parte principal del código).....	98
B.5.2. Código de ejecución de la Opción 1 de la BS 7910	100
B.5.3. Código de procesado asociado al pulsador “PLOT”	102



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PRESUPUESTO DE LICENCIAS DE PROGRAMAS INFORMÁTICOS Y BIENES DE EQUIPO	57
TABLA 2. PRESUPUESTO DE LA MANO DE OBRA.....	57
TABLA 3. PRESUPUESTO PARCIAL	57
TABLA 4. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATO.....	58
TABLA B.1. PROPIEDADES DE LOS OBJETOS GRÁFICOS QUE S MODIFICARAN EN MATLAB GUI	93
TABLA A.2. LISTADO, TIPO Y DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES GLOBALES RELACIONADAS DIRECTAMENTE CON LA BS 7910	96
TABLA B.3. LISTADO, TIPO Y DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES GLOBALES NO RELACIONADAS DIRECTAMENTE CON LA BS 7910.....	98



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. COMPARACIÓN DE LÍNEAS DE FALLO: FITNET Y BS 7910.....	21
FIGURA 2. EJEMPLO DE EVALUACIÓN CRÍTICA DE INGENIERÍA (ECA).	24
FIGURA 3. LINEALIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN EVALUACIONES DE FRACTURA.	27
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA EVALUACIÓN A FRACTURA MEDIANTE LA OPCIÓN 1.....	30
FIGURA 5. DIAGRAMA DE FALLO SEGÚN LA OPCIÓN 1 DE LA BS 7910.	32
FIGURA 6. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA EVALUACIÓN A FRACTURA MEDIANTE LA OPCIÓN 2.....	33
FIGURA 7. FIGURA 7. DIAGRAMA DE FALLO SEGÚN LA OPCIÓN 2 DE LA BS 7910.....	34
FIGURA 8. CÁLCULO DE LOS FACTORES DE INTENSIFICACIÓN DE CARGAS PARA UNA PLACA CON DEFECTO EN EL BORDE.	38
FIGURA 9. MODIFICACIÓN DE LA OPCIÓN 1 PARA DISTINTOS PARÁMETROS A Y K DEL MATERIAL Y NIVELES B DE CONFINAMIENTO.	41
FIGURA 10. INTERFAZ GRÁFICA “INTRO” DEL PROGRAMA.	43
FIGURA 11. INTERFAZ GRÁFICA (“MENU”) DEL MENÚ PRINCIPAL DEL PROGRAMA.....	44
FIGURA 12. ESQUEMA GENERAL DE LAS POSIBILIDADES DE CÁLCULO QUE OFRECE EL PROGRAMA.....	45
FIGURA 13. INTERFAZ GRÁFICA (“FAD_SELECTOR”) DE SELECCIÓN DE LA OPCIÓN DE CÁLCULO.....	47
FIGURA 14. INTERFAZ GRÁFICA (“MATERIAL_SELECTOR”) PARA LA INTRODUCCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL.	47
FIGURA 15. INTERFAZ GRÁFICA (“LOADS_SELECTOR”) PARA LA INTRODUCCIÓN DE LAS CARGAS APLICADAS.	48
FIGURA 16. INTERFAZ GRÁFICA (“MATERIAL_SELECTOR”) PARA LA INTRODUCCIÓN DEL TIPO Y DATOS DE GEOMETRÍA.	48
FIGURA 17. ESQUEMA GENERAL DE LOS PASOS A SEGUIR PARA LA SELECCIÓN Y INTRODUCCIÓN DE DATOS DE LA GEOMETRÍA.	49
FIGURA 18. INTERFAZ GRÁFICA (“CURVED_SHELLS”) PARA LA SELECCIÓN DE UNA CONFIGURACIÓN GEOMETRÍA-DEFECTO PARA CHAPAS CURVAS.	50
FIGURA 19. INTERFAZ GRÁFICA (“CONSTRAINT”) PARA LA INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE RESTRICCIÓN EN EL FRENTE DEL DEFECTO.	50
FIGURA 20. EJEMPLO DE DIAGRAMA FAD PARA UN DETERMINADO MATERIAL, GEOMETRÍA Y ESTADO DE CARGA, CALCULADO MEDIANTE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA. SE PUEDE OBSERVAR LA LÍNEA DE FALLO Y EL PUNTO DE ANÁLISIS.....	52
FIGURA 21. EJEMPLO DE DIAGRAMA FAD PARA UN DETERMINADO MATERIAL, GEOMETRÍA Y ESTADO DE CARGA, CALCULADO MEDIANTE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA, VARIANDO LA CONDICIÓN DE CONFINAMIENTO EN EL FRENTE DE GRIETA ($b < 0$).	52
FIGURA 22. EJEMPLO DE SUPERPOSICIÓN DE LOS PUNTOS DE ANÁLISIS PARA UNA DETERMINADA GEOMETRÍA, ESTADO DE CARGA Y MATERIAL, DONDE SE VA VARIANDO EL TAMAÑO DE GRIETA HASTA LLEGAR A LÍMITE.	53
FIGURA 23. REPRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA FAD Y LA CURVA $K_R = M L R$	53
FIGURA 24. REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS QUE GENERAN LA LÍNEA FE FALLO.	54
FIGURA A.1. INTERFAZ GRÁFICA “INTRO”. APARECE AL INICIAR EL PROGRAMA.....	63
FIGURA A.2. INTERFAZ GRÁFICA “MENU”. ES EL MENÚ PRINCIPAL DEL PROGRAMA.....	64
FIGURA A.3. SUPERPOSICIÓN DE LAS OPCIONES 1 Y 2 DE LA BS 7910 PARA DOS ANÁLISIS DISTINTOS.....	66
FIGURA A.4. EJEMPLO DE DIAGRAMA DE FAD CON LA VISUALIZACIÓN DE LA RECTA OAB DE PENDIENTE M.	68
FIGURA A.5. COMPARACIÓN ENTRE USAR MÁS O MENOS PUNTOS DE DEFINICIÓN DEL FAD.....	68
FIGURA A.6. INTERFAZ GRÁFICA “FAD_SELECTOR”. EN ELLA SE SELECCIONA LA OPCIÓN DE ANÁLISIS Y PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN DEL CÁLCULO.	70
FIGURA A.7. EJEMPLO DE DIAGRAMA DE FALLO EMPLEANDO LA OPCIÓN 1 PARA UN MATERIAL CON ESCALÓN DE CEDENCIA.....	71
FIGURA A.8. EJEMPLO DE DIAGRAMA DE FALLO EMPLEANDO LA OPCIÓN 2 PARA UN MATERIAL SIN ESCALÓN DE CEDENCIA.	72
FIGURA A.9. INTERFAZ GRÁFICA “MATERIAL_SELECTOR”. EN ELLA SE INTRODUCEN LOS DATOS DEL MATERIAL.	73
FIGURA A.10. INTERFAZ GRÁFICA “MATERIAL_SELECTOR” TRAS HABER ESCOGIDO LA OPCIÓN 2 DE ANÁLISIS.	74

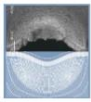
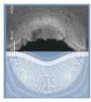


FIGURA A.11. FORMA DE INTRODUCIR LOS DATOS A TRAVÉS DE EXCEL EN EL PROGRAMA.	75
FIGURA A.12. INTERFAZ GRÁFICA “LOADS_SELECTOR” PARA LA INTRODUCCIÓN DE LAS CARGAS.	75
FIGURA A.13. INTERFAZ GRÁFICA “GEOMETRY_SELECTOR” PARA LA SELECCIÓN E INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DE LA GEOMETRÍA Y EL DEFECTO.	76
FIGURA A.14. EJEMPLO DE LA VENTANA DE ERROR DEL PROGRAMA.	78
FIGURA A.15. INTERFAZ GRÁFICA “ELEMENT_TYPE”. PASO INTERMEDIO PARA LA SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA.	79
FIGURA A.16. INTERFAZ GRÁFICA “PLATES” DE SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS TIPO CHAPA.	80
FIGURA A.17. INTERFAZ GRÁFICA “CURVED_SHELLS” DE SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS TIPO CHAPA CURVADA.	81
FIGURA A.18. INTERFAZ GRÁFICA “SPHERES” PARA LA SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS TIPO ESFERAS DE PARED DELGADA.	82
FIGURE A.19. INTERFAZ GRÁFICA “ROUND_BARS_AND_BOLTS” PARA LA SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS TIPO REDONDOS Y TORNILLOS.	83
FIGURA A.20. INTERFAZ GRÁFICA “WELD_JOINTS” PARA LA SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS SOLDADAS.	84
FIGURA A.21. INTERFAZ GRÁFICA “WELDING_DATA” PARA LA INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS ESPECÍFICOS DE LOS CONJUNTOS SOLDADOS.	85
FIGURA A.22. INTERFAZ GRÁFICA “MANUAL” PARA LA SELECCIÓN MANUAL DE LOS FACTORES DE INTENSIFICACIÓN.	86
FIGURA A.23. EJEMPLO DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE EL PROGRAMA.	87
FIGURA A.24. MODOS DE VISUALIZACIÓN ACTIVADOS POR LOS CHECKBOXES “PLOT POINT LINE” Y “DOT PLOT”.	88
FIGURA B.1. INTERFAZ GRÁFICA DEL MENÚ PRINCIPAL “MENU”.	90
FIGURA B.2. PARTE DEL CÓDIGO DE INTERPOLACIÓN DE LA TABLA M.2 DEL ANEXO M DE LA BS7910.	100
FIGURA B.3. PARTE DEL CÓDIGO QUE EJECUTA EL CÁLCULO DE LOS PUNTOS QUE GENERAN LA LÍNEA DE FALLO.	101
FIGURA B.4. PARTE DE LA FUNCIÓN DEL PULSADOR “PLOT” QUE SE ENCUENTRA DENTRO DEL CÓDIGO DE LA INTERFAZ “MENU”.	104

MEMORIA



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática objeto de estudio

Nos encontramos en un mundo cambiante, en el que el desarrollo de la sociedad va de la mano de los avances técnicos, los cuáles, han permitido a los ingenieros tener mayor libertad a la hora de diseñar estructuras, productos y componentes más complejos.

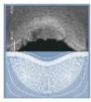
Sin embargo, esta complejidad en los diseños somete a situaciones y condiciones más adversas a los materiales, componentes y estructuras, que cada vez están sometidos a mayores solicitaciones, ambientes más agresivos o a situaciones de trabajo desconocidas. Por lo tanto, en una sociedad en la que prima la seguridad y, sobre todo, lo económico, es necesario asegurar la integridad estructural de estos.

En el caso específico de la industria onshore, potenciada por el desarrollo de las energías renovables, cada vez se construyen aerogeneradores de mayor tamaño con el objetivo de aumentar la producción eléctrica. Aerogeneradores más grandes y complejos suponen un aumento considerable de las solicitaciones aplicadas, mayor número de componentes y mayores riesgos y responsabilidades económicas y de seguridad.

En el pasado, al no existir normativas específicas que indicasen cómo evaluar la integridad estructural, se comprobaba por separado que el elemento no fallase a fractura o a colapso plástico. Esta metodología resultaba inapropiada, puesto que no se contemplaba la iteración de ambos mecanismos de fallo.

Para evitar la situación anterior se desarrollaron los procedimientos de evaluación de la integridad estructural, que sirven de guía a la hora de estudiar la aptitud para el servicio de componentes y estructuras, e incorporan métodos específicos donde ya se tiene en cuenta la iteración entre la fractura y el colapso plástico. Estos procedimientos se aplican en los siguientes casos [1]:

- Diseño de nuevas construcciones o componentes, para garantizar su integridad a lo largo de la vida útil de las mismas.



- Evaluación de integridad de estructuras operativas, aplicable a programas de supervisión y control.

Existen gran variedad de procedimientos, de carácter normativo o no, desarrollados por distintas empresas, entidades u instituciones. No todos contemplan los cuatro mecanismos principales de fallo, estando especializados en función de las aplicaciones o trabajos que realizan las entidades desarrolladoras. Su relativa reciente aparición, ha hecho que no muchos técnicos se encuentren familiarizados con ellos, por lo que facilitar el uso de estos procedimientos, por ejemplo, mediante el desarrollo de una herramienta informática, sería un impulso fundamental para el desarrollo y expansión de esta rama de la ingeniería que cobra cada vez más importancia.

1.2. Objetivos

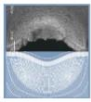
El principal objetivo de este trabajo de fin de máster es la creación de una herramienta informática (aplicación) capaz de asistir al usuario en la realización de la evaluación de la integridad estructural a fractura de un material, componente o estructura (como un aerogenerador), según el procedimiento BS 7910:2013. Se pretende que, mediante una introducción y selección de los datos y condiciones de entrada, el programa aplique el procedimiento para obtener los correspondientes diagramas de fallo (FAD) y la situación, desde el punto de vista de la aptitud para el servicio, en la que se encuentre el componente evaluado.

Para poder alcanzar este objetivo se ha decidido utilizar el programa *MATLAB*, cuyo lenguaje de programación es propio (lenguaje M).

1.2.1. Objetivos secundarios

También se han planteado una serie de objetivos secundarios, entre los que destacan los siguientes:

- Generar una interfaz gráfica intuitiva y fácilmente manejable, en la que todos los pasos a realizar sean fácilmente interpretables. Para ello el presente documento incluye un



manual de usuario que define paso a paso todas las operaciones a realizar en función del tipo de análisis que el usuario desee.

- Permitir que el programa sirva de ayuda para el aprendizaje o la iniciación de los usuarios en la rama de la integridad estructural.
- Dejar abierta la puerta a una futura mejora del programa como, por ejemplo, la implementación de otros mecanismos de fallo (fatiga, fluencia, corrosión...).

1.3. Estructura del trabajo

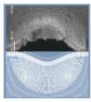
En el Capítulo 1 se ha analizado brevemente la problemática objeto de estudio, así como los objetivos, principales y secundarios, que permiten resolver los problemas identificados.

En el Capítulo 2 se describen las bases y precedentes que nos han llevado hasta este punto. Por ello se analiza el origen, en qué consisten, y las aplicaciones de los procedimientos de evaluación de la integridad estructural. Seguidamente, se describen brevemente los procedimientos existentes más utilizados, en función de su origen, contenido y principales campos de aplicación.

En el Capítulo 3 se lleva a cabo la justificación de la solución adoptada, desarrollada para cumplir los objetivos previamente establecidos. Se justifica la elección de un programa informático, la decisión de utilizar la BS 7910 como procedimiento de referencia y el entorno de programación utilizado.

El Capítulo 4 se centra en describir de forma más detallada el procedimiento BS 7910, sobre todo, los apartados que tienen que ver con el mecanismo de fallo asociado a la fractura y colapso plástico. Se indican los datos de entrada necesarios para el cálculo, las opciones y métodos de análisis, los resultados a obtener y otros datos y características, como la geometría, que influyen en la evaluación.

En el Capítulo 5 se analiza brevemente el tipo de lenguaje utilizado, y se describe de forma general el esquema y elementos que forman la interfaz gráfica del programa. Por

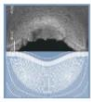


último, se mencionan los posibles resultados que el usuario puede obtener mediante la herramienta informática.

Como colofón al trabajo, el Capítulo 6 expone las conclusiones más relevantes sobre el contenido del mismo, así como las posibles mejoras que en un futuro se podrían incorporar al programa.

En el Capítulo 7 se presenta el presupuesto (general y discretizado en sus respectivas partes). Por último, en el Capítulo 8 se indica la bibliografía utilizada en el desarrollo del trabajo.

El documento también cuenta con dos anexos, el A y el B, que contienen el manual de usuario y el manual del programador, respectivamente. El manual de usuario contiene todos los pasos que el usuario debe seguir para realizar una correcta evaluación estructural utilizando la herramienta informática. El manual del programador describe en detalle la programación que forma el esqueleto del programa, con el objetivo de que sirva de guía a un futuro programador para mejorarlo y ampliarlo.



2. ANTECEDENTES

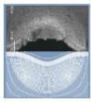
En el siguiente capítulo se analizará en qué consisten, como surgieron y que importancia tienen los procedimientos de evaluación de la integridad estructural. También se abordarán los distintos tipos de normativas o procedimiento más utilizados desde el punto de vista de su rango de aplicación en la industria y las principales características y diferencias entre ellos.

2.1. Importancia de los Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural

A lo largo de la historia, la sociedad se ha ido desarrollando a la par que lo hacían los avances técnicos que facilitaban y potenciaban dicho desarrollo. Dichos avances facilitaron la evolución de la sociedad, pero trajeron consigo problemas y fallos asociados a las nuevas técnicas que cada vez tenían una mayor aplicación e influencia sobre la vida de las personas.

En un principio, estos fallos no venían provocados por una rotura del material, sino más bien estaban relacionados con cuestiones de la estática y el equilibrio como, por ejemplo, el colapso de un edificio [2]. Sin embargo, el surgimiento de la primera revolución industrial asociada a la aparición de la máquina de vapor y el empleo del acero, sometieron a las estructuras, componentes y materiales a modos de carga y condiciones (fatiga, presión interna, sometimiento a altas y bajas temperaturas...) poco comunes anteriormente y, por lo tanto, prácticamente desconocidas.

Algunos de los primeros fallos tienen relación con los elementos empleados en las distintas máquinas de vapor, calderas a presión y puentes metálicos de ferrocarril sometidos a cargas repetitivas. El poco nivel de transmisión de las noticias hizo que se quedaran en hechos locales. No fue hasta principios y mediados del siglo XX cuando tres catástrofes, principalmente, impulsaron una rama de la ingeniería (integridad estructural) dedicada al análisis, investigación y solución de los fallos causantes de estos y más accidentes. Estas tres catástrofes son: la explosión de la fábrica de zapatos *Grover* (1920), los problemas de los



aviones *Comet* (1953) y el hundimiento de los barcos *Liberty* durante la segunda guerra mundial (1940-1945).

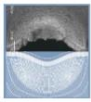
A partir de la rama ingenieril de la Mecánica de la Fractura desarrollada durante el siglo XX, que prevé distintos modos de aplicación de cargas, condiciones y el agrietamiento y propagación de defectos (entre otras cosas), así como la creación de procedimientos, normas y otros avances técnicos y disciplinas, han conseguido que hoy en día se pueda estimar de forma más o menos precisa la evolución de defectos y el tiempo de vida de un material, componente o estructura.

Podría definirse la integridad estructural como un conjunto de técnicas dedicadas a estudiar la aptitud para el servicio de estructuras y componentes con defectos... teniendo en cuenta que toda estructura o componente tiene defectos [2].

Los denominados Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural han facilitado y optimizado los procesos de cálculo. Estos se definen como una guía (con rango de norma o no), editada por una empresa, institución, agrupación empresarial o consorcio, con instrucciones directas para evaluar la aptitud para el servicio de componentes estructurales en presencia de defectos [2].

Su objetivo principal es la valoración de forma rápida y fiable del margen hasta fallo de un elemento con defecto. El procedimiento se estructura en de la siguiente forma:

- **Datos esenciales:** datos necesarios para realizar los cálculos contemplados por el procedimiento. Principalmente estos tienen que ver con la geometría (tanto del componente como del tipo y posicionamiento del defecto), las cargas aplicadas y el material. La forma de tomar la mayoría de estos datos está indicada en los procedimientos.
- **Evaluación:** identificación del modo de fallo y selección de la ruta de análisis a seguir para el cálculo.
- **Observación y análisis de los resultados:** observación de los diagramas de fallo (FAD) obtenidos, así como otros resultados. Determinación de las condiciones del



componente en función de su situación en el FAD (factor de seguridad, vida remanente, tamaño máximo de defecto, carga máxima aplicable...).

En términos de la industria, el uso de estos procedimientos en las fases de diseño (materiales utilizados, cargas previstas, efecto de la geometría...) y fabricación (detección y evolución de defectos, degradación del material, control de la temperatura de trabajo...) pueden suponer, a parte de la mejora en la seguridad, una gran optimización de los tiempos de producción y reducción del número de componentes usados que se resumen en una mayor producción y menores gastos de fabricación.

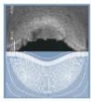
2.2. Procedimientos de Integridad Estructural en uso

Existen gran cantidad de procedimientos, con el carácter o no de norma, desarrollados por diversas instituciones, consorcios y empresas o grupos empresariales. Todas ellas, en general, comparten el análisis de los establecidos como los cuatro mecanismos de fallo más comunes en la ingeniería: fractura-colapso plástico, fatiga, corrosión y fluencia. Sin embargo, existen diferencias en las etapas de toma de datos, evaluación y observación e interpretación de los resultados de un procedimiento a otro. Estas diferencias pueden hacer que un determinado procedimiento se presente más ventajoso u óptimo que otro para el diseño y evaluación de la integridad estructural en el caso de una aplicación concreta. Es por eso que, por ejemplo, la industria petroquímica, la industria nuclear... utilicen distintos procedimientos.

A continuación, se describirán de forma breve algunos de los procedimientos más utilizados.

2.2.1. BS 7910

Procedimiento de origen inglés desarrollado por *British Standards* que brinda orientación y recomendaciones para evaluar la aceptabilidad de los defectos en todos los tipos de estructuras y componentes. Aunque se hace hincapié en las fabricaciones soldadas en aceros ferríticos y austeníticos y aleaciones de aluminio [3], los procedimientos se pueden utilizar para analizar defectos en estructuras hechas de otros materiales metálicos y en componentes o estructuras no soldadas. Los métodos descritos son aplicables en las fases de



diseño, fabricación y operación de la vida de una estructura. Por lo tanto, se trata de un documento que abarca el uso de estructuras metálicas en gran cantidad de aplicaciones por lo que lo hace, posiblemente, ser el más utilizado.

Creado en 1980 como un procedimiento de evaluación de fractura y fatiga cuando se lo conocía como PD 6493, su nombre fue cambiado a BS 7910 tras su revisión en 1999. La versión actual en vigencia es la BS 7910:2013.

Con una buena cobertura de los mecanismos de fallo por fractura, fatiga y fluencia para componentes fisurados, el mecanismo de corrosión se cubre a nivel principalmente orientativo. En esta normativa no se tienen en cuenta el análisis de elementos “no” fisurados.

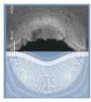
Cuenta con 10 capítulos y 15 anexos. Los capítulos del 1 al 6 cubren aspectos generales acerca del fenómeno de integridad estructural y del documento en cuestión, así como describen la información requerida para la evaluación respecto a las características y dimensiones de los defectos, tensiones y propiedades de los materiales. Los capítulos del 7 al 10 tratan los mecanismos de fallo de fractura, fatiga, fluencia y otros. Los anexos contienen una serie de procedimientos y guías de carácter normativo o informativo sobre los fenómenos y condiciones que influyen en la evaluación.

En el caso que compete a este trabajo de fin de máster, el análisis a fractura-colapso plástico (capítulo 7), será desarrollado con más detalle en apartados posteriores.

2.2.2. FITNET

[4] A principios de siglo convivían numerosos procedimientos de evaluación de carácter marcadamente nacional como la BS 7910 británica, o el RCC-MR francés y otros cuya aplicación quedaba restringida a una industria concreta, como el R5 y el R6 de *British Energy* y el SAQ sueco en el sector nuclear. Además, cada uno de estos procedimientos se centraba generalmente en un tipo de fallo específico (R5 en la fluencia, BS7910, R6 y SAQ en la fractura...), sin que hubiese un procedimiento que permitiese evaluar un componente frente a los distintos mecanismos de fallo.

Debido a esto, la *European Fitness for Service Network* decidió crear un único procedimiento unificado de evaluación de la integridad estructural denominado FITNET



(*Fitness for Service Procedure*). Este comprende el análisis de componentes, estructuras y materiales ante los cuatro mecanismos de fallo más comunes mencionados con anterioridad.

Para poder configurar dicho procedimiento se han utilizado varias de las normas ya existentes. Está compuesto por tres volúmenes [4]:

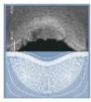
- **Volumen I, FITNET FFS Procedure:** recoge el propio procedimiento de evaluación con capítulos dedicados a cada tipo de fallo.
- **Volumen II, CASE STUDIES AND TUTORIALS:** en este documento se recogen numerosos casos de aplicación del procedimiento a problemas industriales y un total de doce ejemplos en los que se aplica, paso a paso, el FITNET FFS a distintos problemas.
- **Volumen III, ANNEX:** este tomo, que sirve de apoyo a la aplicación del procedimiento, lo componen un total de once anexos.

En el caso que compete a este trabajo de fin de máster, el análisis a fractura-colapso plástico (módulo 6), este procedimiento se basa en los principios de la Mecánica de la Fractura y es aplicable a la evaluación de estructuras metálicas (soldadas o no soldadas) que contienen fisuras reales o postuladas. Está diseñado para su aplicación durante el diseño, la fabricación, la evaluación en servicio de componentes y el diagnóstico de fallos producidos. Cuenta con 6 opciones de análisis distintas.

A pesar de la buena idea de la unificación de los distintos mecanismos y condiciones de fallo en un único documento, quizás la excesiva cantidad de contenido, la introducción de métodos que a pesar de ser más precisos pierden por su dificultad de manejo, así como las ya consolidadas normas utilizadas en algunas aplicaciones específicas, han hecho que este proyecto, a pesar de ser utilizado, se haya quedado lejos de las expectativas puestas en él.

2.2.3. ASME BPVC XI

La Sección XI del código de calderas y recipientes a presión (*Boiler and Pressure Vessel Code*, PVC) del código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) proporciona reglas para el examen, las pruebas e inspecciones en servicio, y la reparación y el reemplazo de



componentes y sistemas en plantas de energía nuclear. Se trata, por lo tanto, de un procedimiento centrado en la industria nuclear.

La integridad de los componentes que trabajan a presión incluye la prevención de fugas del refrigerante del reactor, así como la integridad estructural en términos de prevención de la ruptura o explosión de dichos elementos. La Sección XI proporciona reglas específicas para evaluar las indicaciones de defectos que puede detectarse durante la vida útil de un componente nuclear.

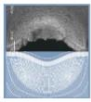
En el caso del análisis a fractura-colapso plástico, tanto los defectos planos como los no planos se tratan en la Sección XI. La evaluación de los procedimientos y los criterios de aceptación cubren el fallo por colapso plástico, caracterizado por el análisis de carga límite, fractura debida al desgarro dúctil previo a la situación de carga límite, caracterizado por análisis de mecánica de fractura elástica-plástica (EPFM) y fractura frágil caracteriza por el análisis de mecánica de fractura elástica lineal (LEFM).

2.2.4. API 579

El procedimiento API 579 desarrollado y publicado por el *American Petroleum Institute* (API), describe varias técnicas estandarizadas de evaluación de la integridad estructural para el servicio (FFS) enfocado a equipos presurizados utilizados en las industrias del petróleo y del gas, petroquímica y química. La última edición se publicó en junio de 2007.

Compuesto por 13 capítulos y 10 anexos, contiene procedimientos de evaluación para calcular el impacto de mecanismos de fallo como fractura frágil, pérdida general de metal y pérdida de metal local, corrosión por picaduras, ampollas y laminaciones, desalineación de la soldadura y distorsión de la carcasa, defectos similares a grietas, daños por fluencia y daño por fuego [5]. Por lo tanto, puede observarse que se trata de un documento muy especializado, útil para unas determinadas aplicaciones.

Está basado en el uso de diagramas de fallo, contando con tres tipos distintos de análisis u opciones dependientes de los datos disponibles del material.



2.2.5. EDF Energy R5 y R6

La empresa *EDF Energy* (originalmente *British Energy*) es una empresa de electricidad que ha desarrollado los procedimientos de evaluación de la integridad estructural R5 y R6. Han sido utilizados durante muchos años en la industria energética puesto que es un código orientado a este tipo de industrias.

R5 y R6 abordan el crecimiento de grietas a altas (por encima de la temperatura de fluencia) y bajas temperaturas (menor a la temperatura de fluencia), respectivamente [6]. Incorporan una amplia experiencia en Mecánica de la Fractura, el análisis de elementos finitos y métodos de prueba.

R5 contiene procedimientos para evaluar la integridad de los componentes que funcionan a altas temperaturas y aborda tanto los componentes no fisurados como los agrietados [7].

R6 evalúa la integridad de las estructuras que contienen defectos en aquellas situaciones donde la fluencia no es significativa. Como otras normativas, tiene en cuenta las cargas mecánicas, térmicas, residuales... y evalúa mediante la utilización de diagramas de fallo, pudiendo escogerse entre varias rutas de cálculo. En las últimas revisiones se incorporaron los fenómenos de confinamiento entre otros [6].



3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN ACEPTADA

En el siguiente capítulo se pretende justificar la realización de una herramienta informática, el procedimiento de evaluación de la integridad estructural que mejor se adapte a las prestaciones a las que va dirigido el programa, así como el tipo de lenguaje de programación usado para su realización.

3.1. Programa informático

Como ya se ha mencionado, los procedimientos de evaluación de la integridad estructural ejercen la función de guías cuyo objetivo es permitir llevar a cabo la evaluación de un componente de la forma más rápida, intuitiva y sencilla posible. Por ello se encuentran perfectamente estructuradas y definidas, diferenciando de forma clara los distintos mecanismos de fallo, los datos necesarios y los distintos procedimientos y modos de análisis.

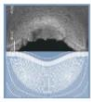
Toda esta organización y simplificación de los cálculos hace que puedan crearse programas o aplicaciones para ordenador con relativa facilidad. Las propiedades de los procedimientos se reflejan en programas intuitivos y de poca complejidad, que otorgan soluciones claras.

La aplicación de los procedimientos sumado a la utilización de un programa informático resulta en una mejora obvia en los tiempos de realización de las evaluaciones, así como en una mejora en la visualización e interpretación de los datos.

Otro objetivo que se pretende con el programa es llevar a cabo un proceso guiado, siguiendo paso a paso las distintas operaciones que hay que realizar durante la evaluación para llegar un resultado óptimo.

3.2. Procedimiento de Evaluación de la Integridad Estructural utilizado

Basándose en la descripción general de las normativas desarrollado en el apartado anterior, así como en un análisis más detallado de los procedimientos más utilizados, se ha



llegado a la conclusión de que para realizar la evaluación de la integridad estructural de las torres de aerogeneradores *onshore*, los procedimientos BS 7910 y FITNET son los que mejor se ajustan.

La principal razón para haberse decidido entre estos dos es que se trata de procedimientos más generales, es decir, pueden utilizarse para la evaluación de componentes y estructuras de una gran variedad de industrias. Incluyen los cuatro principales mecanismos de fallo, cosa que otros documentos no cumplen puesto que tratan temas más específicos propios de determinadas industrias. Los aerogeneradores no trabajan a alta temperatura por lo que una norma específica para el trabajo en condiciones de fluencia (como la R5) no tiene sentido usarla.

Haciendo referencia al modo de fallo que nos interesa analizar, fractura-colapso plástico, de manera muy simplificada, el FITNET y la BS7910 trabajan con los diagramas de fallo (FAD, ver Figura 1), a partir de los cuales se puede obtener información sobre la situación de trabajo del componente o estructura.

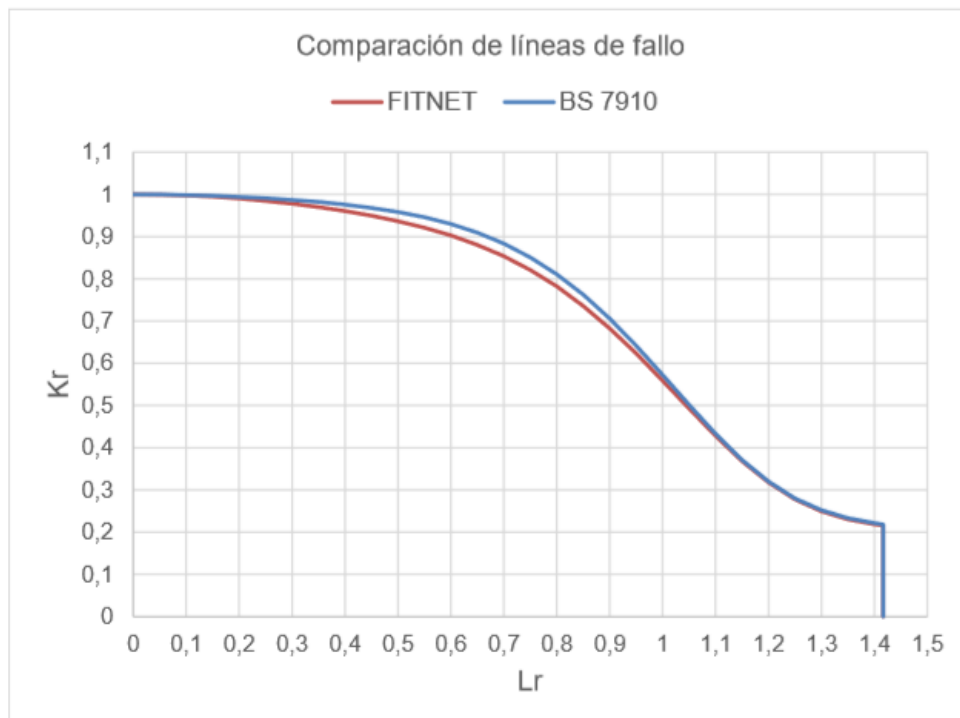
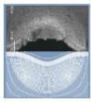


Figura 1. Comparación de líneas de fallo: FITNET y bs 7910.



Dichas situaciones son:

- **Segura:** cuando el punto de análisis se encuentre dentro del área encerrada por la línea de fallo, dicho de otro modo, que el factor de seguridad sea mayor o igual a 1.
- **No segura:** cuando el punto de análisis se encuentre fuera del área encerrada por la línea de fallo, es decir, que el factor de seguridad sea menor que 1.

Dicho factor de seguridad está relacionado con el nivel de carga impuesta. Evidentemente, la condición de estado seguro no se lleva hasta el valor de factor de seguridad igual a 1, sino que se suele dar un pequeño margen.

Existiendo muy poca diferencia entre el FITNET y la BS 7910, finalmente se ha decidido emplear el segundo, de gran aplicación en ingeniería.

3.3. Lenguaje de programación

Se ha decidido utilizar *MATLAB* para realizar el programa debido a su amplia aplicación en la ingeniería y a su intuitivo y sencillo módulo para realizar interfaces gráficas. Además, los conocimientos básicos adquiridos previamente facilitaron su elección. A través de los elementos de la interfaz gráfica, y tras una labor de programación que conecte dichos elementos generando los inputs, se hace referencia y se ejecutan las funciones generadas en los scripts del programa.

El lenguaje de programación utilizado, debido a la elección de *MATLAB*, es el lenguaje *M*, propio del programa.



4. EL PROCEDIMIENTO BS7910:2013

En este capítulo se desarrollará más detalladamente el procedimiento BS 7910 en su última revisión del 2013. Se profundizará en el modo de fallo por fractura-colapso plástico, indicando que datos son necesarios e intervienen en el proceso de evaluación, su influencia, y como obtenerlos. Posteriormente se indicarán las distintas rutas de análisis que podemos seguir y su influencia en los resultados. También se describirán de forma muy general los otros mecanismos de fallo que contempla el procedimiento: fatiga, fluencia y corrosión.

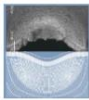
4.1. Introducción al procedimiento BS7910

Una estructura se considera adecuada para su propósito, siempre que no se alcancen las condiciones para causar el fallo. Se debe hacer una distinción entre la aceptación basada en el control de calidad y la aceptación basada en la aptitud para el servicio. En este documento, la derivación de los niveles de aceptación de defectos se basa en el principio de la aptitud para el servicio (FFS).

[8] Las decisiones sobre si requieren rechazo los defectos, baja calificación o reparaciones pueden basarse en la aptitud para el servicio, ya sea a la luz de la experiencia previamente documentada con material similar, tensión y combinaciones ambientales o sobre la base de una evaluación crítica de ingeniería (*Engineering Critical Assessment, ECA*) (ver Figura 2). Es con este último que este documento se refiere.

La evaluación de defectos en una base de aptitud para el servicio requiere un examen minucioso por NDT (*Non Destructive Test*), ensayos no destructivos, utilizando técnicas capaces de localizar y dimensionar defectos en áreas críticas. Donde NDT ha revelado la presencia de defectos, se aplican las siguientes opciones.

- Si los defectos no exceden los niveles de control de calidad en el estándar de aplicación apropiado, no se requieren más acciones.
- Si los límites de aceptación ya se han establecido sobre la base de un ECA para la combinación adecuada de materiales, procedimiento de fabricación, consumibles



de soldadura, cargas y factores ambientales, los defectos deben evaluarse sobre esa base.

Si no existe experiencia relevante documentada, entonces se debe llevar a cabo un ECA basado en la guía dada en este documento.

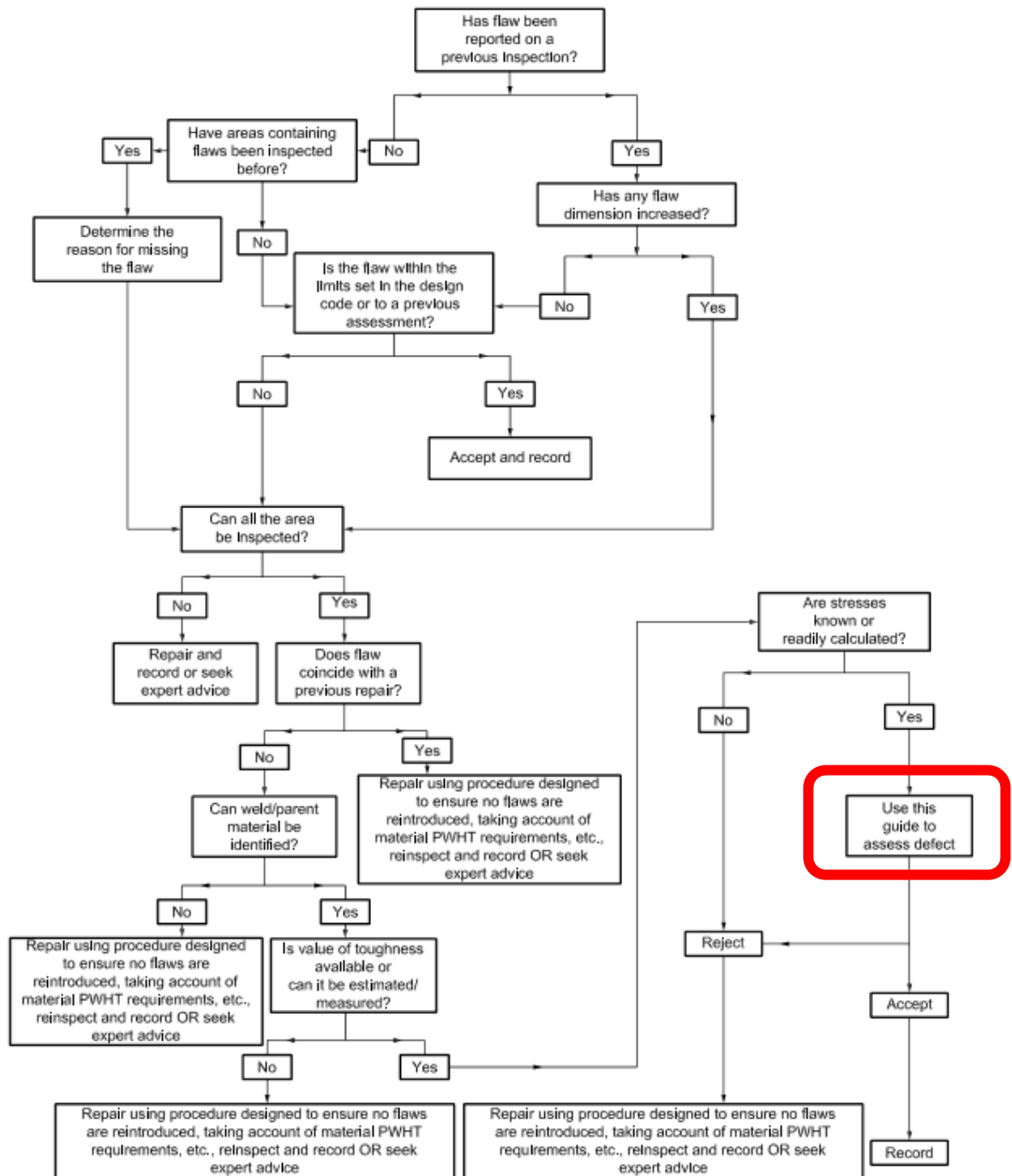
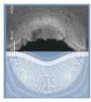


Figura 2. Ejemplo de evaluación crítica de ingeniería (ECA). En rojo se marca el paso del proceso donde se utilizaría el procedimiento BS 7910.



Como ya se ha mencionado antes, este procedimiento brinda orientación y recomendaciones para evaluar la aceptabilidad de los defectos en todos los tipos de estructuras y componentes. Aunque se hace hincapié en las fabricaciones soldadas en aceros ferríticos y austeníticos, y en aleaciones de aluminio, los procedimientos se pueden utilizar para analizar defectos en estructuras hechas de otros materiales metálicos y en componentes o estructuras no soldadas [3]. Los métodos descritos son aplicables en las fases de diseño, fabricación y operación de la vida de una estructura.

Está compuesto por distintos capítulos, unas con carácter normativo, y otras con carácter informativo que, utilizadas conjuntamente, guían y asesoran al usuario durante el proceso de evaluación. Analiza los cuatro modos de fallo principales: fractura-colapso plástico, fatiga, fluencia y corrosión, aunque este último de forma más general.

Para poder llevar a cabo el proceso de evaluación, el procedimiento exige conocer:

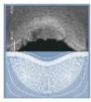
- El mecanismo de fallo que opera.
- Condiciones de operación y análisis de cargas.
- Caracterización de los defectos (ubicación, tamaño del defecto...).
- Propiedades del material (incluso efectos ambientales).

A continuación, se desarrollarán los apartados correspondientes a los mecanismos de fallo que analiza el procedimiento, en especial el de fractura-colapso plástico. Sólo se tendrán en cuenta los aspectos que se han empleado para crear el programa.

4.2. FRACTURA-COLAPSO PLÁSTICO

[9] Hay tres opciones para la evaluación de fracturas en esta cláusula, opciones 1, 2 y 3, que usan métodos similares (apartado 7.3). Cuál se utiliza depende de las propiedades de los materiales disponibles y del nivel de conservadurismo requerido.

La evaluación generalmente se hace por medio de un diagrama de fallo (Failure Analysis Diagram, FAD) basado en los principios de la mecánica de fractura. El eje vertical del FAD compara la carga aplicada, en términos de los factores de intensidad de tensión

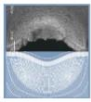


correspondientes, con la tenacidad a la fractura del material. El eje horizontal es la relación entre la carga primaria aplicada y la requerida para el colapso plástico. Una línea de evaluación de fallo se traza en el diagrama. Los cálculos para un defecto proporcionan las coordenadas de un punto de evaluación o, en el caso del crecimiento de grietas, una distribución de puntos. Las posiciones de estos se comparan con la línea de fallo para determinar la aceptabilidad del defecto.

La aceptabilidad de un defecto puede evaluarse directamente o el cálculo puede ser iterado para determinar el valor límite de un parámetro tal como el tamaño del defecto, la carga aplicada o la tenacidad a la fractura. Las evaluaciones que usan el FAD se relacionan con defectos planos. La orientación sobre la evaluación de otros tipos de defectos se trata en el apartado 7.4.3.1. Las evaluaciones en esta sección se refieren solo al modo de carga I, de tracción. La carga en modo mixto se trata en el Anexo A. En algunos casos, la aceptabilidad puede demostrarse cuando una evaluación inicial muestra que un error es inaceptable. Esto puede requerir mejorar la calidad de los datos de entrada, o aplicar una opción de evaluación más alta, o tener en cuenta la rotura dúctil bajo carga creciente.

Los procedimientos en este apartado suponen que la región afectada por el defecto afecta a un solo material. La resistencia a la fractura utilizada se obtiene siguiendo los apartados de 7.1.4 a 7.1.5 y asume condiciones de alta restricción en la punta de la grieta. Las condiciones de baja restricción, promovidas, por ejemplo, por defectos poco profundos y predominantemente por tracción (por ejemplo, cuando la tensión de flexión de la pared es mucho menor que la tensión de la membrana, como en una tubería) pueden conducir a una mayor tenacidad a la fractura y, por lo tanto, mayores márgenes en la evaluación. En el Anexo N se describe un procedimiento que permite condiciones de baja restricción estructural en el plano. El Anexo N no debe utilizarse junto con el Anexo I (fenómeno de mis-match).

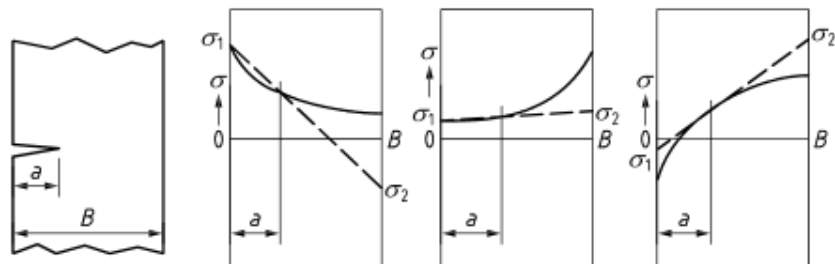
Por lo tanto, vistas algunas de las rutas que se pueden seguir para la evaluación frente a fractura-colapso plástico, es necesario obtener los datos de partido o inputs que nos permitan realizar el análisis.



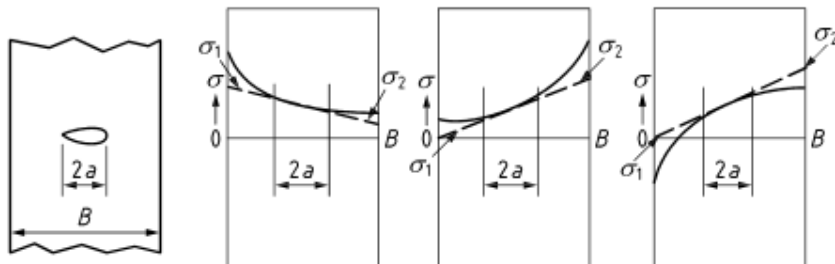
4.2.1. Acciones sobre la estructura

[10] Los métodos reflejados en este documento se refieren predominantemente a la evaluación basada en las tensiones, es decir, cuando la tensión nominal es menor que el límite elástico de la sección defectuosa. Las tensiones que se deben considerar en la evaluación son las que se calcularían mediante un análisis de tensiones de la estructura no fragmentada. Se pueden usar distribuciones de tensiones reales, o las tensiones (o rangos de tensiones) pueden linealizarse, como se muestra en la Figura 3.

a) Linearization of stress distributions across flaw in fracture assessments



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



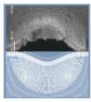
ii) Examples of linearization of primary or secondary stress distributions for embedded flaws

P_m, Q_m and P_b, Q_b can be determined from the distributions in i) and ii) using the following equations:

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

Figura 3. Linealización de la distribución de tensiones en evaluaciones de fractura.

Se deben tener en cuenta las tensiones primarias de membrana y flexión, las tensiones secundarias y el aumento de las tensiones primarias causadas por discontinuidades locales, macroscópicas, o por desalineación, como se describe en 6.4.2, 6.4.3 y 6.4.4, respectivamente. Las representaciones esquemáticas típicas de estos se muestran en la Figura 3. En una evaluación del efecto de una carga aplicada no oscilante, es importante distinguir entre las tensiones primarias y secundarias, ya que solo las primeras contribuyen al colapso del plástico.



- **Tensiones primarias (P)**

Las tensiones primarias, P , son tensiones que pueden, si son lo suficientemente altas, contribuir al colapso del plástico (véase 6.4.3). También pueden contribuir al fallo por fractura, fatiga, fluencia o SCC (*Stress Corrosion Cracking*), corrosión bajo tensión. Incluyen todas las tensiones que surgen de la presión interna y las cargas externas.

- La tensión de la membrana (P_m) es la tensión media a través del grosor de la sección que es necesaria para garantizar el equilibrio del componente o estructura.
- La tensión de flexión (P_b) es la componente de la tensión debida a la carga impuesta que varía linealmente a lo largo del espesor de la sección. Las tensiones de flexión están en equilibrio con el momento de flexión local aplicado al componente. En este documento, P_b se considera una carga superpuesta a P_m .

- **Tensiones secundarias (Q)**

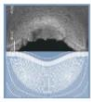
Las tensiones secundarias, Q , son tensiones de autoequilibrio necesarias para satisfacer la compatibilidad en la estructura. Pueden ser aliviadas mediante tratamiento térmico, etc. Las tensiones residuales y térmicas suelen ser secundarias.

Las tensiones secundarias no contribuyen al fallo por colapso plástico, ya que surgen de fenómenos de deformación/desplazamiento limitado. Sin embargo, contribuyen a la severidad de las condiciones locales en la punta de grieta, y cuando es necesario incluirlos en una evaluación, deben incluirse en los cálculos de K_I y ΔK_I . Las tensiones térmicas (primarias y secundarias) también se deben multiplicar por factores de concentración de tensión y desalineación apropiados, k_t y k_m .

Las tensiones secundarias se pueden dividir en componentes de membrana, Q_m , y flexión, Q_b , como las tensiones primarias (véase 7.1.8).

4.2.2. Efecto de la temperatura en las propiedades del material

Cuando las propiedades de tracción no están disponibles para la temperatura de evaluación, se debe aplicar la siguiente corrección a los aceros ferríticos para los datos



obtenidos a temperatura ambiente (ver BS EN ISO 15653), en el caso de que la temperatura de evaluación sea inferior a la temperatura ambiente y superior a -196°C :

$$\sigma_y(\text{at low temperature}) = \sigma_y(\text{at room temperature}) + \frac{10^5}{(491-1.8 \cdot T)} - 189 \quad (1)$$

$$\sigma_u(\text{at low temperature}) = \sigma_u(\text{at room temperature}) \cdot (0.7857 + 0.2423 \cdot \exp\left(-\frac{T}{170.646}\right)) \quad (2)$$

La modificación correspondiente a módulo elástico (E) y al coeficiente de Poisson en función de la temperatura pueden obtenerse a partir de la Tabla 3 del apartado 7.1.3.3.

4.2.3. Línea de fallo (FAL)

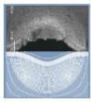
[11] Existen tres enfoques distintos: opción 1, opción 2 y opción 3. Estas son de una complejidad creciente en términos de datos disponibles sobre el material y las acciones actuantes, pero proporcionan resultados más precisos o ajustados a la realidad. Es decir, por ejemplo, la opción 2 es menos conservadora que la 1.

Cada enfoque tiene una línea de evaluación dada por la ecuación de la curva, $K_r = f(L_r)$, y un valor máximo de L_r , $L_{r,max}$. Si el punto de evaluación calculado (L_r , K_r) se encuentra dentro del área limitada por los ejes, la línea de fallo y la línea vertical correspondiente a $L_{r,max}$, el defecto es aceptable. En caso contrario, no es aceptable. Sin embargo, en el caso de un defecto inaceptable, podría ser posible refinar el análisis en términos de la opción de análisis empleada, utilizando una opción menos conservadora. Si dicha opción, más compleja, determina la aceptación de la aptitud del elemento, aunque la opción más conservadora la considere inaceptable, el componente se encontrará en una situación de seguridad.

- **Valor de corte $L_{r,max}$**

El corte se establece para evitar el colapso del plástico. Se establece en el punto en que $L_r = L_{r,max}$, donde:

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2 \cdot \sigma_y} \quad (3)$$



• Opción 1

Se requieren los siguientes datos del material: límite elástico (σ_y), resistencia a la tracción (σ_u), límite elástico inferior (R_{eL}) y módulo de elasticidad o Young (E). No requiere conocer la curva tensión-deformación verdadera. Se trata de la opción más sencilla y rápida de aplicar, requiriendo pocos datos del material, pero se trata de la opción más conservadora. Es la que se suele usar por facilidad y rapidez. Además, si se cumple la condición de aptitud utilizando esta opción, también se cumplirá para las siguientes.

En la Figura 4 pueden observarse un esquema del modo de proceder si se desea aplicar dicha opción de análisis.

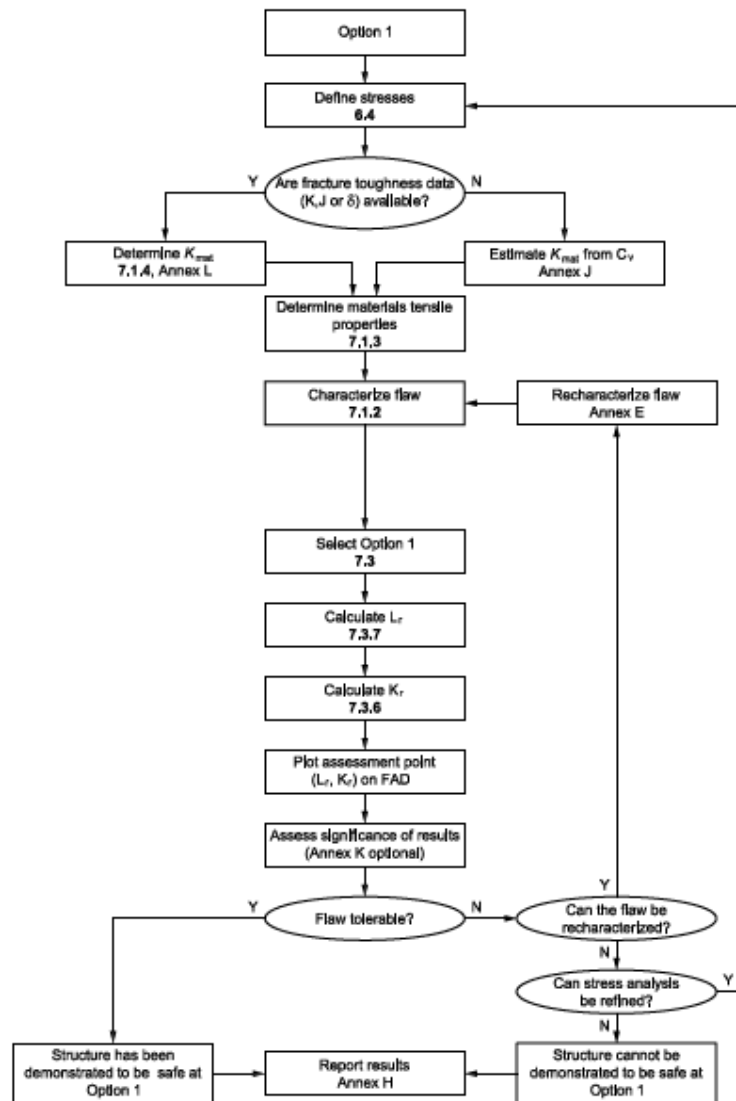
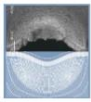


Figura 4. Diagrama de flujo para la evaluación a fractura mediante la Opción 1.



Dando valores a L_r , las ecuaciones que describen la línea de fallo si el material no presenta escalón de cedencia, son las siguientes:

$$f(L_r) = (1 + \frac{1}{2}L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7\exp(-\mu L_r^6)] \quad \text{si } L_r \leq 1 \quad (4)$$

$$f(L_r) = f(1)L_r^{(N-2)/(2N)} \quad \text{si } 1 < L_r < L_{r_{max}} \quad (5)$$

$$f(L_r) = 0 \quad \text{si } L_{r_{max}} < L_r \quad (6)$$

donde:

$$\mu = \min(0.001 E/\sigma_y, 0.6) \quad (7)$$

$$N = 0.3(1 - \sigma_y/\sigma_u) \quad (8)$$

Si el material presenta escalón de cedencia, las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$f(L_r) = (1 + \frac{1}{2}L_r^2)^{-1/2} \quad \text{si } L_r < 1 \quad (9)$$

$$f(L_r) = (\lambda + 1/2\lambda)^{-1/2} \quad \text{si } L_r = 1 \quad (10)$$

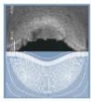
$$f(L_r) = f(1)L_r^{(N-2)/(2N)} \quad \text{si } 1 < L_r < L_{r_{max}} \quad (11)$$

$$f(L_r) = 0 \quad \text{si } L_{r_{max}} < L_r \quad (12)$$

El valor $\lambda > 1$ se define en términos del módulo elástico E , límite elástico inferior (R_{eL}), y el valor de la deformación de Lüders ($\Delta\varepsilon$):

$$\lambda = 1 + E\Delta\varepsilon/R_{eL} \quad (13)$$

$$\Delta\varepsilon = 0.0375(1 - 0.001\sigma_y) \quad \text{si } \sigma_y < 1000 \text{ MPa} \quad (14)$$



El valor de R_{eL} puede tomarse igual al límite elástico si este es menor a 946 MPa.

A partir de los valores de L_r tomados, los valores $f(L_r)$ obtenidos mediante las ecuaciones y el valor de $L_{r,max}$, puede obtenerse el diagrama de fallo (FAD). En la Figura 5 se muestra un esquema de dicho diagrama según la opción 1.

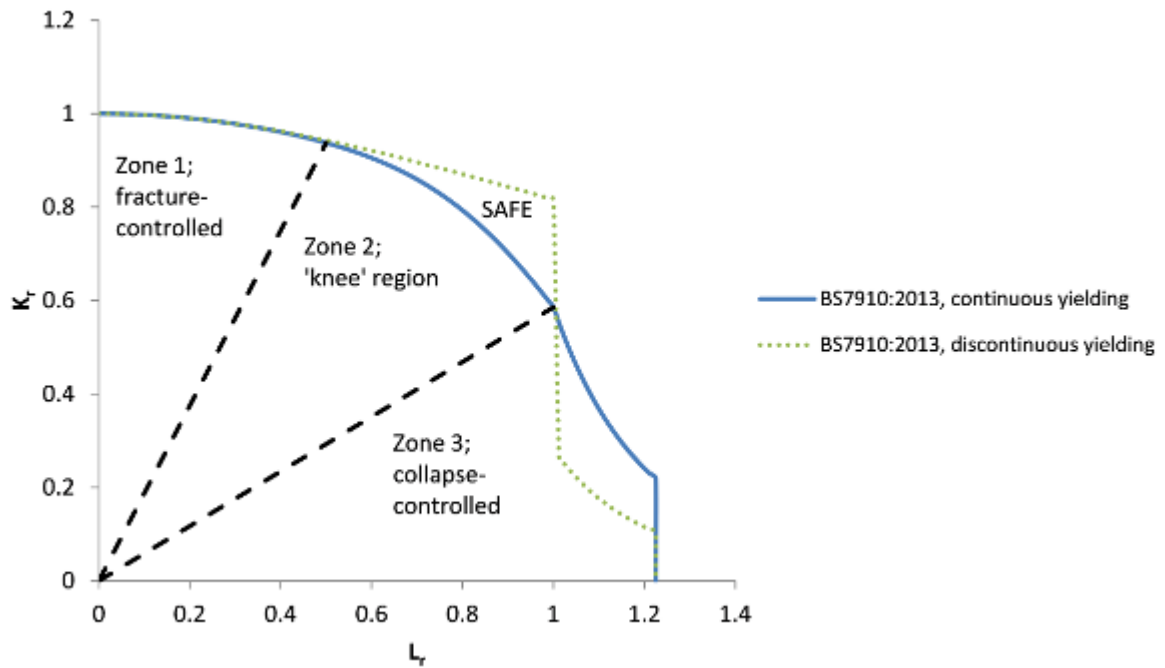


Figura 5. Diagrama de fallo según la Opción 1 de la BS 7910. La línea azul representa a un material sin escalón de cedencia, mientras que la línea punteada a uno con escalón de cedencia.

- **Opción 2**

En la Figura 6 puede observarse un esquema del modo de proceder si se desea aplicar dicha opción de análisis.

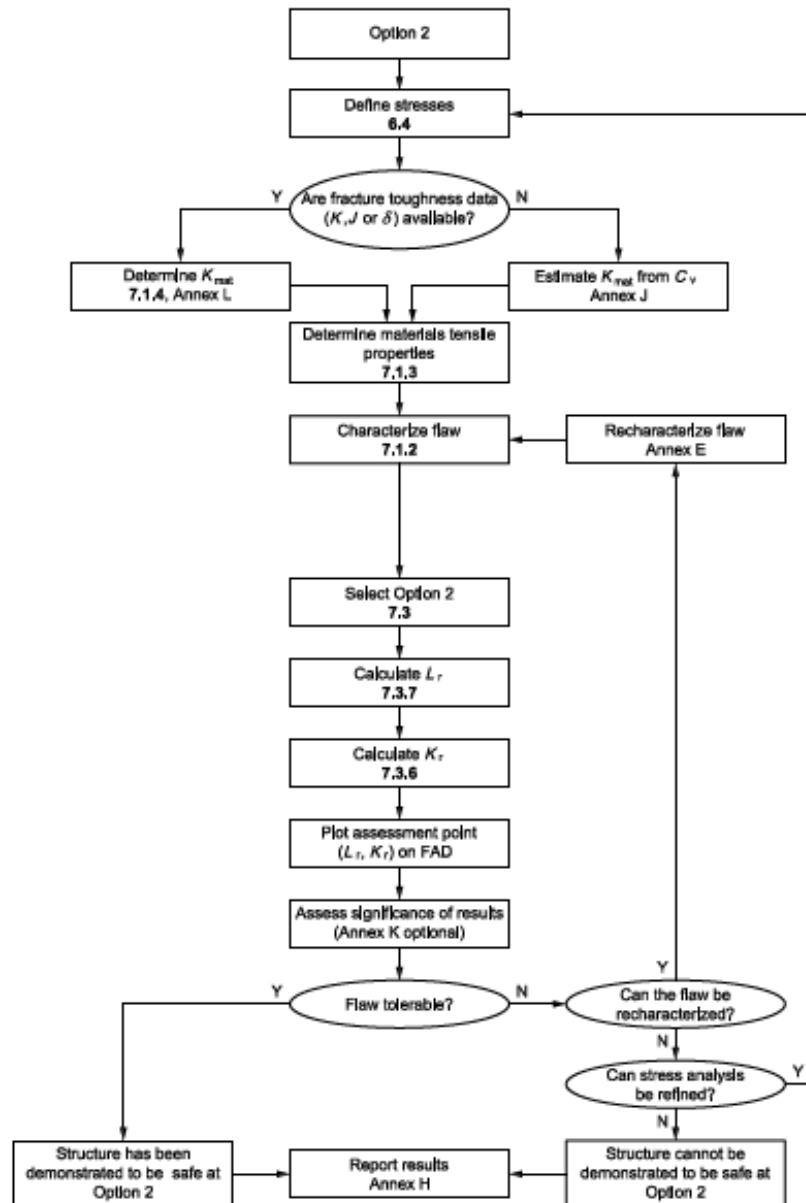
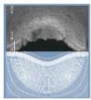
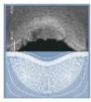


Figura 6. Diagrama de flujo para la evaluación a fractura mediante la Opción 2.

A parte de los datos del material que se describen en la opción 1, requiere la curva tensión-deformación verdadera obtenida mediante el ensayo de tracción uniaxial a la temperatura de evaluación para tensiones hasta σ_u . Es adecuada para todos los metales independientemente del comportamiento de tensión-deformación. Donde hay una discontinuidad en la curva de tensión-deformación en la resistencia a la fluencia más baja, hay una discontinuidad en la curva de la Opción 2 en el valor correspondiente de L_r , que a menudo es $L_r = 1$.



Las ecuaciones que describen la línea de fallo son las siguientes:

$$f(Lr) = \left(\frac{E \varepsilon_{ref}}{Lr \sigma_y} + \frac{Lr^3 \sigma_y}{2E \varepsilon_{ref}} \right) \quad \text{si } Lr < Lr_{max} \quad (15)$$

donde:

ε_{ref} es la deformación verdadera para la tensión verdadera $\sigma_{ref} = Lr \sigma_y$

y:

$$f(Lr) = 0 \quad \text{si } Lr_{max} < Lr \quad (16)$$

Es necesario definir unos valores de L_r . El procedimiento indica que como mínimo debe calcularse con los valores $L_r = 0.7, 0.9, 0.98, 1.0, 1.02$ y 1.1 y luego en un número suficiente de puntos para definir la curva hasta $L_{r,max}$. A partir de L_r se van calculando las tensiones verdades $\sigma_{ref} = Lr \sigma_y$. Con estas se va a la curva tensión-deformación verdadera y se obtienen los valores de la deformación verdades (ε_{ref}). Con el vector L_r y su correspondiente vector de valores ε_{ref} , se pueden aplicar las ecuaciones que definen la línea de fallo. En la Figura 7 se muestra un esquema del diagrama de fallo según la Opción 2.

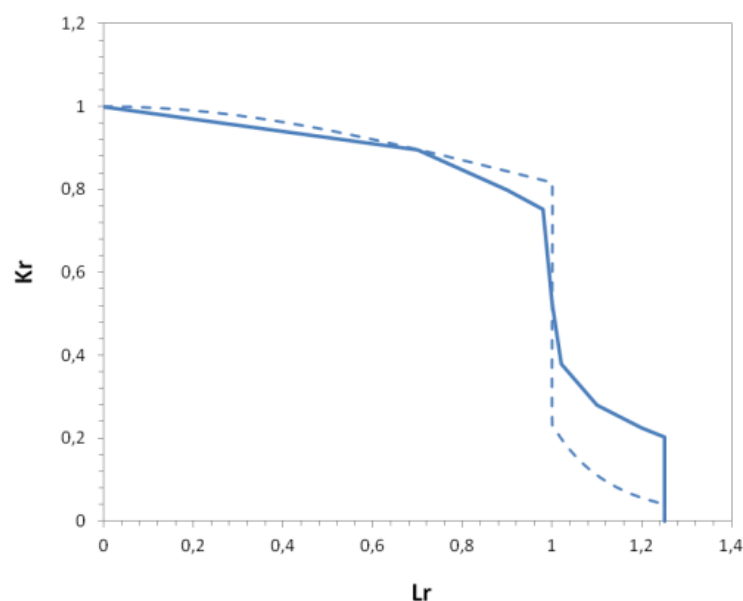
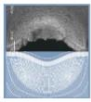


Figura 7. Diagrama de fallo según la Opción 2 de la BS 7910.



Se trata de una opción menos conservadora que la anterior, ampliando el diagrama, sobre todo, para valores de $L_r > 1$. Es decir, permite ser menos conservador en el caso de trabajar con materiales con comportamiento elastoplástico o plástico.

- **Opción 3**

Una curva de evaluación de fallo específica de un material, geometría y tipo de carga en particular se puede determinar utilizando análisis elástico y elástico-plástico de la estructura defectuosa en función de las cargas que generan las tensiones primarias, es decir, aquellas que contribuyen a la evaluación de L_r . Está dado por:

$$f(L_r) = \sqrt{J_e/J} \quad \text{si } L_r < L_{r_{max}} \quad (17)$$

$$f(L_r) = 0 \quad \text{si } L_{r_{max}} < L_r \quad (18)$$

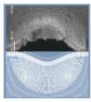
donde:

J_e es el valor de la integral J del análisis elástico a la carga correspondiente al valor L_r .

J es el valor de la integral J del análisis elástico-plástico en la carga correspondiente al valor L_r .

Esta curva no es adecuada para uso general. Es útil solo para casos específicos como un enfoque alternativo a las Opciones 1 y 2. Es el método menos conservador de todos, el más ajustado al comportamiento real del material.

Esta opción no ha sido incluida en el programa por su poco uso. Esto es debido a que requiere la realización de gran cantidad de ensayos, uno para cada nivel de carga que, además de requerir más tiempo, aumenta el coste por la cantidad de ensayos a realizar y aumenta la dificultad del análisis. Además, si la aptitud para el servicio se cumple con alguna de las opciones anteriores no es necesario utilizar esta ruta de análisis.



4.2.4. Relación de fractura, K_r

El procedimiento define la relación de fractura de dos formas:

$$K_r = \frac{(K_I^p + VK_I^s)}{K_{mat}} \quad (19)$$

$$K_r = \frac{(K_I^p + K_I^s)}{K_{mat}} + \rho \quad (20)$$

donde:

K_I^p es el factor de intensidad de tensión con el tamaño de grieta actual debido a las cargas primarias (ver Anexo M);

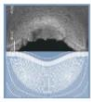
K_I^s es el factor de intensidad de tensión con el tamaño de fisura actual debido a las cargas secundarias (ver Anexo M);

K_{mat} es la tenacidad a la fractura ($MPa\sqrt{m}$) (ver apartado 7.1.4).

En el programa se ha utilizado la segunda ecuación que define K_r . El término ρ se puede obtener en el Anexo R. Cuando las estructuras se cargan mediante una combinación de tensiones primarias y secundarias, se producen efectos de plasticidad que no se pueden evaluar mediante una simple adición lineal de los efectos resultantes de los dos sistemas de tensión. El término ρ tiene en cuenta los efectos de interacción de plasticidad [12].

- **Factor de intensidad de tensión (K_I).**

El factor de intensidad de tensiones determina la amplitud del campo tensional en el frente de grieta, estando relacionado con la energía disponible para la propagación de la grieta. Este factor depende de la forma del cuerpo y también de la carga, por lo que la amplitud de tensiones también lo hace [13]. Particularizando para la mayoría de los casos, la carga se produce bajo modo I o de apertura de la grieta y por ello K se distingue como K_I . En el Anexo M se define K_I como:



$$K_I = (Y\sigma)\sqrt{\pi a}$$

El término $(Y\sigma)$ puede descomponerse como:

$$(Y\sigma) = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad (22)$$

donde:

$(Y\sigma)_p$ es la contribución de las tensiones primarias.

$(Y\sigma)_s$ es la contribución de las tensiones secundarias.

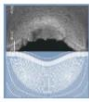
Estos se pueden definir como:

$$(Y\sigma)_p = M f_w \{k_{tm} M_{km} M_m P_m + k_{tb} M_{kb} M_b P_m [P_b + (k_m - 1) P_m]\} \quad (23)$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b \quad (24)$$

Los términos que componen las anteriores ecuaciones son los siguientes:

- a: longitud o semilongitud de grieta.
- M: factor de corrección abultada.
- fw: factor de corrección de anchura finita.
- Mm y Mkm: factores de intensificación de la carga de membrana.
- Mb y Mkb: factores de intensificación de la carga de flexión.
- Ktm: factor de concentración de la tensión de membrana.
- Ktb: factor de concentración de la tensión de flexión.
- Km: factor de intensificación de la carga debido a la desalineación.



Estos factores están definidos en el Anexo M para algunas de las geometrías y tipos de grietas más comunes. En el programa solo se tienen en cuenta el análisis de estas geometrías, aunque es posible introducir el valor de los factores de intensificación de forma manual, independientemente de la geometría. Las geometrías que contempla este procedimiento y se han incluido en el programa son: placas, placas curvas y tuberías, esferas de pared delgada, redondos y tornillos, y uniones soldadas con penetración completa o parcial. En la Figura 8 se muestra, como ejemplo, el cálculo de estos factores para un defecto en el borde de una placa (Anexo M, apartado M.3.2).

M.3.2 Edge flaws in plates [276]

See Figure M.2 for the definition of the geometry.

The stress intensity factor is given by Equation M.1 to Equation M.6, where, for $a/W \leq 0.6$:

$$M = 1$$

$$f_w = 1$$

$$M_m = M_b = 1.12 - 0.23(a/W) + 10.6(a/W)^2 - 21.7(a/W)^3 + 30.4(a/W)^4 \quad (M.8)$$

NOTE This solution has the same form as that for extended surface flaws (M.4.2), Equation M.12, although the plate membrane and bending stresses have been superimposed. Equation M.8 does not account for in-plane bending (e.g. SENB specimen). In such cases, a modified form of the extended surface flaw solution may be used.

Figure M.2 Edge flaw geometry

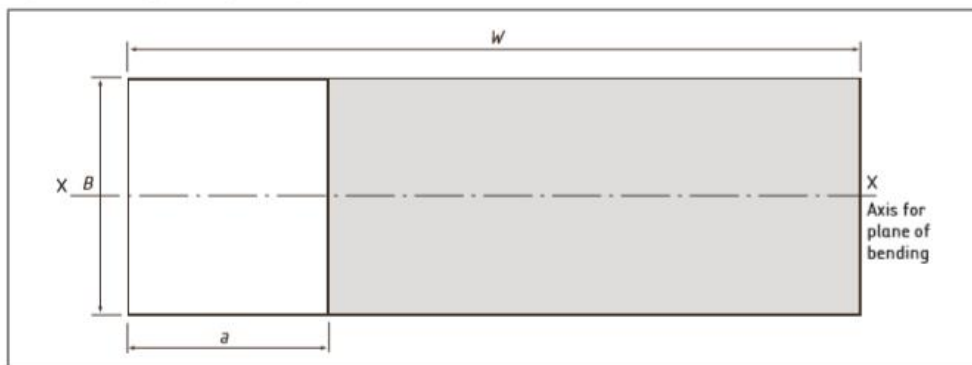
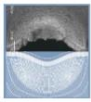


Figura 8. Cálculo de los factores de intensificación de cargas para una placa con defecto en el borde (apartado M.3.2 de la BS 7910).

- **Tenacidad a la fractura (K_{mat})**

[14] Es una propiedad del material y se determina experimentalmente mediante ensayos realizados de acuerdo a una normativa de referencia. Cuando no es posible determinar directamente la tenacidad a la fractura, se pueden realizar estimaciones utilizando las correlaciones de Charpy descritas en el Anexo J.



Alternativamente, se pueden utilizar datos genéricos (por ejemplo, obtenidos de libros o tablas) siempre que se demuestre que son totalmente representativos del material utilizado en la estructura que se evalúa y que la tenacidad a la fractura elegida representa un límite inferior de los datos. Para los aceros ferrítico/bainíticos es particularmente importante que los datos de tenacidad a la fractura se generen a la misma temperatura que la del componente estructural que se evalúa.

Cuando la tenacidad a la fractura se ha determinado utilizando geometrías de muestras distintas a la curvatura profunda (SENB) o tensión compacta (CT) definidas en las normas de referencia utilizadas, se debe tener cuidado de asegurar que la restricción de punta de grieta generada en la muestra no es menor que la generada por el defecto en el componente a evaluar.

El apartado 7.1.4 la BS 7910 contiene ecuaciones para determinar K_{mat} en función de los datos de la integral J , o del $CTOD$. En el Anexo J se dan ecuaciones para determinarla en función de los datos obtenidos del ensayo Charpy.

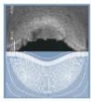
4.2.5. Relación de carga, L_r

La relación de carga, L_r , se determina a partir de las cargas primarias que actúan en el componente a través de:

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_y \quad (25)$$

σ_{ref} es la tensión de referencia para una determinada geometría y estado de carga (el Anexo N contiene compendios para el cálculo de la tensión de referencia), y σ_y es el límite elástico del material.

El colapso estructural se registrará por el fallo de la sección de la sección remanente. La posibilidad de un colapso prematuro en otra parte de la estructura debe investigarse por separado. El uso de una carga límite correspondiente a dicho mecanismo de fallo en una evaluación de la sección que contiene el defecto, podría ser demasiado conservador.



4.2.6. Constraint (condición de confinamiento)

[15] Los procedimientos básicos del Capítulo 7 permiten hacer una evaluación de la resistencia a la fractura y el colapso plástico de un componente defectuoso. Sin embargo, los resultados obtenidos a partir del procedimiento pueden llegar a ser muy conservadores respecto al comportamiento y situación real del componente.

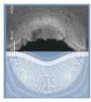
Un conservadurismo particular implícito en el procedimiento es que el valor de la resistencia a la fractura K_{mat} , utilizado para definir K_r , se obtiene normalmente de ensayos de flexión profundamente fisuradas utilizando estándares de prueba recomendados y criterios de validez. Estos están diseñados para garantizar condiciones de deformación plana y altas tensiones hidrostáticas cerca de la punta de la grieta para proporcionar una propiedad del material independiente del tamaño y la geometría de la muestra. Sin embargo, hay pruebas considerables de que la resistencia del material a la fractura aumenta cuando se prueban probetas con defectos poco profundos o especímenes cargados a tracción. Estas condiciones conducen a tensiones hidrostáticas más bajas en la punta de la grieta y a campos de deformación plástica menos restringidos. Este fenómeno se conoce como condición de restricción baja, o menor confinamiento.

El Anexo N utiliza una serie de metodologías para incluir limitaciones en el procedimiento general del Capítulo 7. Estos procedimientos no reemplazan a los del Capítulo 7. Se pueden usar junto con ese enfoque para estimar cualquier aumento en las propiedades (K_{mat}) que puedan surgir bajo condiciones de baja restricción.

Se pueden aplicar dos métodos diferentes: modificar el FAD, o modificar el punto de análisis. El programa trabaja únicamente con la modificación del FAD. Para ello lo que hay que hacer es multiplicar cada valor del vector $f(L_r)$ obtenido para representar el FAD en el Capítulo 7, de la siguiente forma:

$$Kr = f(Lr) \tag{26}$$

$$Kr = f(Lr) \left(\frac{K_{mat}^c}{K_{mat}} \right) \quad \text{si } Lr < Lr_{max} \tag{27}$$



donde:

$$K_{mat}^c = K_{mat} [1 + \alpha(-\beta Lr)^k] \quad \text{si } \beta Lr \leq 0 \quad (28)$$

$$K_{mat}^c = K_{mat} \quad \text{si } \beta Lr > 0 \quad (29)$$

α y κ son constantes dependientes del material y la temperatura que se encuentran tabulados de la Tabla N.12 a N.42. β es el parámetro de confinamiento, y aunque en el anexo aparece la formulación para calcularla, se trata de un proceso muy complejo, por lo que normalmente se obtiene a partir de programas de elementos finitos. β puede definirse de dos formas diferentes:

- **Definición "T-stress":** T-stress es el término de segundo orden que se puede considerar como la tensión paralela a los flancos del defecto. Para materiales elásticos.
- **Definición "Q-parameter":** para materiales con comportamiento elasto-plástico.

El comportamiento del material también afectará a la elección de las constantes α y κ .

En la Figura 9 se muestra el efecto que tiene la suposición de una situación de menor confinamiento en el FAD.

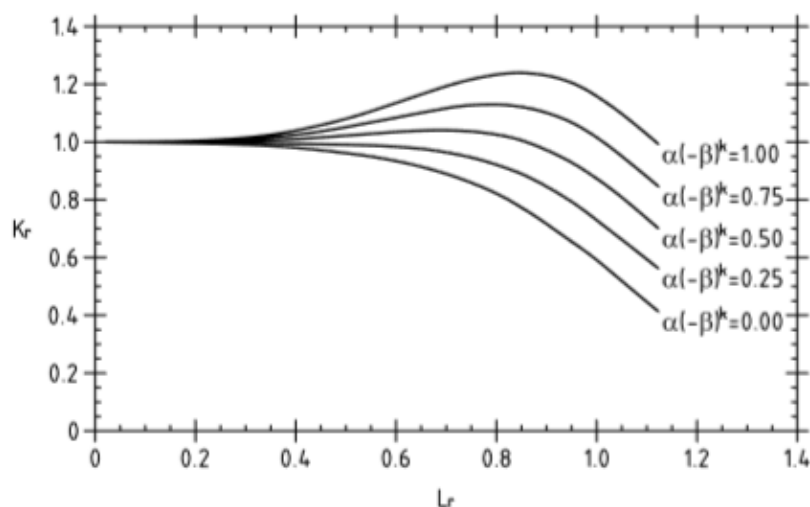
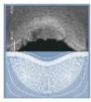


Figura 9. Modificación de la Opción 1 para distintos parámetros α y κ del material y niveles β de confinamiento ($\beta < 0$).



5. HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DESARROLLADA

En este capítulo se definirá de forma general el lenguaje de programación usado y se detallará la estructura del programa, la utilidad de cada elemento que forma parte de este, las opciones de cálculo que presenta, y los resultados que se generan.

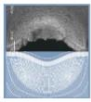
5.1. Lenguaje de programación

Matlab posee un lenguaje de programación propio, el lenguaje M. Este es un lenguaje interpretado de alto nivel. Básicamente un lenguaje interpretado es aquel en el cual sus instrucciones, o más bien el código fuente, escrito por el programador en un lenguaje de alto nivel, es traducido por el intérprete a un lenguaje entendible para la máquina, paso a paso, instrucción por instrucción. Esto ofrece las siguientes ventajas:

- **Multiplataforma:** el intérprete suele estar en varios sistemas operativos, así que no tienes que adaptar tu código a una plataforma en concreto.
- **Portabilidad:** el mismo programa puede llevarse a diferentes plataformas.
- Códigos más cortos.
- **Facilidad de depuración:** es más fácil obtener información del código fuente que en los lenguajes compilados.

La principal desventaja de la interpretación es una velocidad de ejecución del programa mucho más lenta, comparada con la ejecución directa del código máquina en la CPU del ordenador.

Además, MATLAB es un lenguaje de computación técnica de alto nivel y un entorno interactivo para desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos, cálculo numérico y desarrollo de aplicaciones gráficas. Lenguaje de alto nivel quiere decir que expresa los algoritmos de una manera adecuada a la capacidad cognitiva del ser humano, alejándose del lenguaje computacional y acercándose más al lenguaje natural. Esto ayuda a incluir rutinas de uso frecuente como las de entrada/salida, funciones matemáticas, manejo de tablas...



5.2. Estructura del programa

En la Figura 10 se representa la interfaz “INTRO” del programa. Esta da acceso al menú principal.



Figura 10. Interfaz gráfica “INTRO” del programa.

El programa evalúa el fallo por fractura-colapso plástico. Por lo tanto, contará con un menú principal compuesto por diversos elementos que nos darán acceso a los inputs y outputs, y otros que ejecutarán el análisis.

En la Figura 11 se puede observar la interfaz gráfica “MENU”, la cual se encuentra dividida en función de las tres etapas del programa: introducción de datos, procesado y resultados.

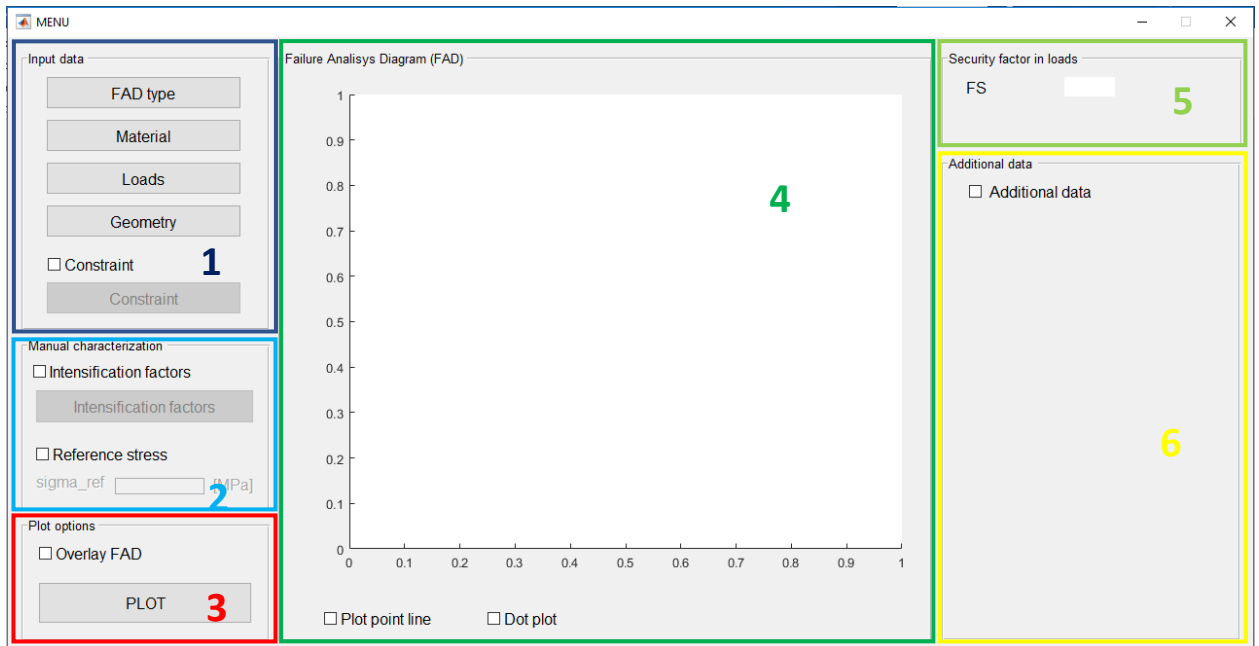
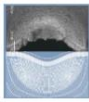


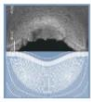
Figura 11. Interfaz gráfica (“MENU”) del menú principal del programa.

1. Entrada de datos: aquí se encuentran los pulsadores que conducen a las interfaces donde se introducen los datos necesarios para realizar la evaluación de la integridad estructural del componente. Estos son:

- **“FAD type”:** tipo de análisis (opciones).
- **“Material”:** propiedades del material.
- **“Loads”:** cargas sobre el componente.
- **“Geometry”:** tipo y datos sobre la geometría y defecto.
- **“Constraint”:** datos sobre el fenómeno de confinamiento en el caso de ser distinto al de un ensayo normalizado.

2. Entrada manual de factores de intensificación y tensión de referencia: aquí se introducen de forma manual los factores de intensificación de las cargas en el cálculo de K_I , así como la tensión de referencia. Se utiliza en el caso de que la geometría no se encuentre definida en la BS 7910 y, por lo tanto, no lo esté en el programa.

3. Botones y opciones de cálculo: contiene los elementos que ejecutan el cálculo.



4. **Diagrama de fallo (FAD):** en este espacio se coloca el diagrama de fallo. Contiene opciones secundarias de visualización del diagrama.
5. **Factor de seguridad:** indica el resultado del factor de seguridad en las cargas obtenido. Según el valor de este, indicara la situación respecto a la seguridad en la que se encuentra el componente.
6. **Datos adicionales:** se indica el resultado de valores que influyen en el diagrama de fallo, como por ejemplo, los factores M_m y M_b , la posición del punto de análisis (L_r, K_r), la longitud de grieta crítica...

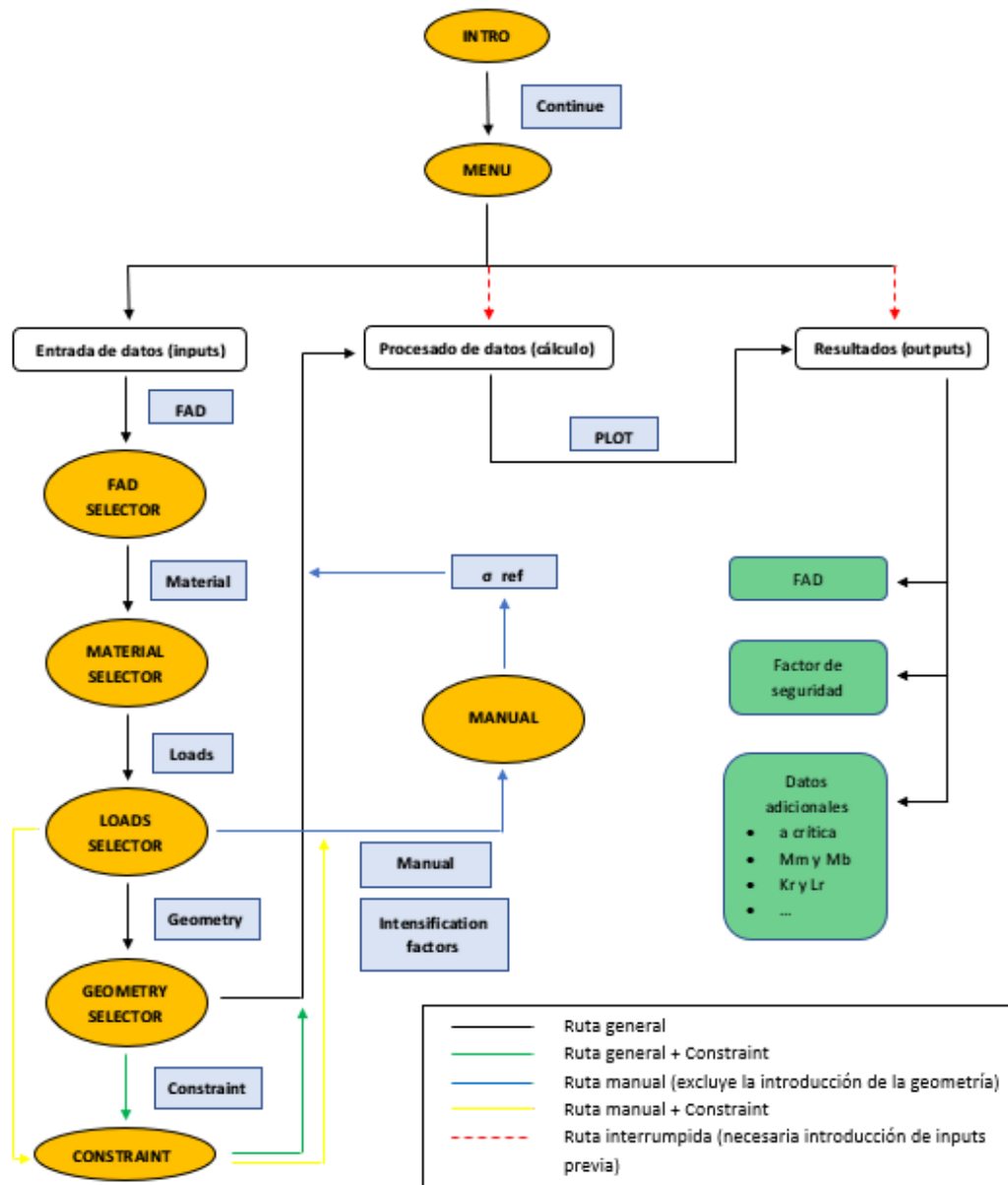
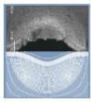


Figura 12. Esquema general de las posibilidades de cálculo que ofrece el programa.



El procedimiento a seguir por el usuario, que será explicado con mayor detalle en el Anexo A, puede resumirse mediante la Figura 12.

Sin tener en cuenta las distintas opciones de análisis que permite seleccionar la BS 7910, con el programa pueden seguirse las siguientes rutas de cálculo (ver Figura 12):

- Indicar la opción de análisis, las propiedades del material, las cargas que intervienen y seleccionar una geometría contenida en el Anexo M del procedimiento (Ruta general).
- Seguir los pasos anteriores, pero variando las condiciones de restricción en el frente del defecto (Ruta general + Constraint).
- Indicar la opción de análisis, las propiedades del material y las cargas que intervienen, pero al no disponer de los cálculos de los factores de intensificación y la tensión de referencia para una determinada geometría (ya que no ha sido contemplada por la BS 7910). Introducir estos de forma manual (Ruta manual).
- Seguir pasos de la ruta manual, pero variando las condiciones de restricción en el frente del defecto (Ruta manual + Constraint).

En la interfaz “*FAD_SELECTOR*”, representada en la Figura 13, se selecciona la opción de análisis que queramos. No se incorpora la opción 3 del procedimiento. Además, te permite jugar con algunos parámetros de refinamiento del cálculo que serán detallados en el Anexo A.

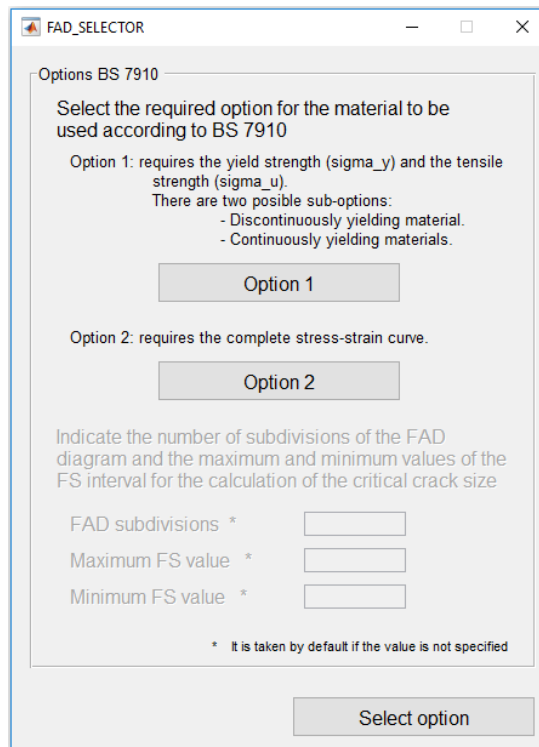
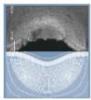


Figura 13. Interfaz gráfica (“FAD_SELECTOR”) de selección de la opción de cálculo.

La interfaz “MATERIAL_SELECTOR”, que se representa en la Figura 14, permite la introducción de los datos referentes a las propiedades del material, en función de si se ha escogido la Opción 1 o la 2.

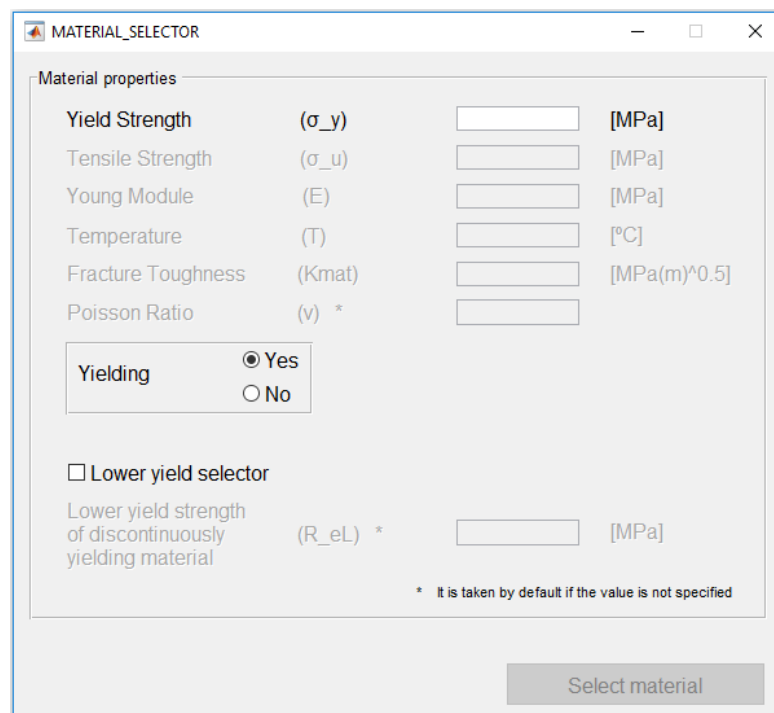
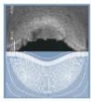


Figura 14. Interfaz gráfica (“MATERIAL_SELECTOR”) para la introducción de las propiedades del material.



La interfaz “LOADS_SELECTOR” mostrada en la Figura 15, permite la introducción de los valores de las cargas primarias y secundarias de membrana y flexión.

Load Type	Symbol	Unit
Primary membrane stress	(Pm) *	[MPa]
Primary bending stress	(Pb) *	[MPa]
Secondary membrane stress	(Qm) *	[MPa]
Secondary bending stress	(Qb) *	[MPa]

* It is taken by default if the value is not specified

Select loads

Figura 15. Interfaz gráfica (“LOADS_SELECTOR”) para la introducción de las cargas aplicadas.

En la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR”, representada en la Figura 16, se selecciona la geometría del componente y se introducen los datos referentes a esta y al defecto. Aunque en el Anexo A se detallará el proceso a seguir en esta interfaz, en la Figura 17 se muestra un esquema general de los pasos que debe seguir el usuario.

Geometry parameters

Geometry

Show geometry

Flaw length or half flaw length (a) [mm]

Half flaw length (c) [mm]

Section thickness in-plane of flaw (B) [mm]

Structure width in-plane of flaw (W) [mm]

Parametric angle (θ) [rad]

Shortest distance from material surface to embedded flaw (p) [mm]

Radius of round bar or bolt (r) [mm]

Internal radius (r_i) [mm]

External radius (r_o) [mm]

Mean radius (r_m) [mm]

Position: Interior, Exterior

Restraint: Normal, Negligible

Confirm geometry

Geometry scheme

Select geometry

Figura 16. Interfaz gráfica (“MATERIAL_SELECTOR”) para la introducción del tipo y datos de geometría.

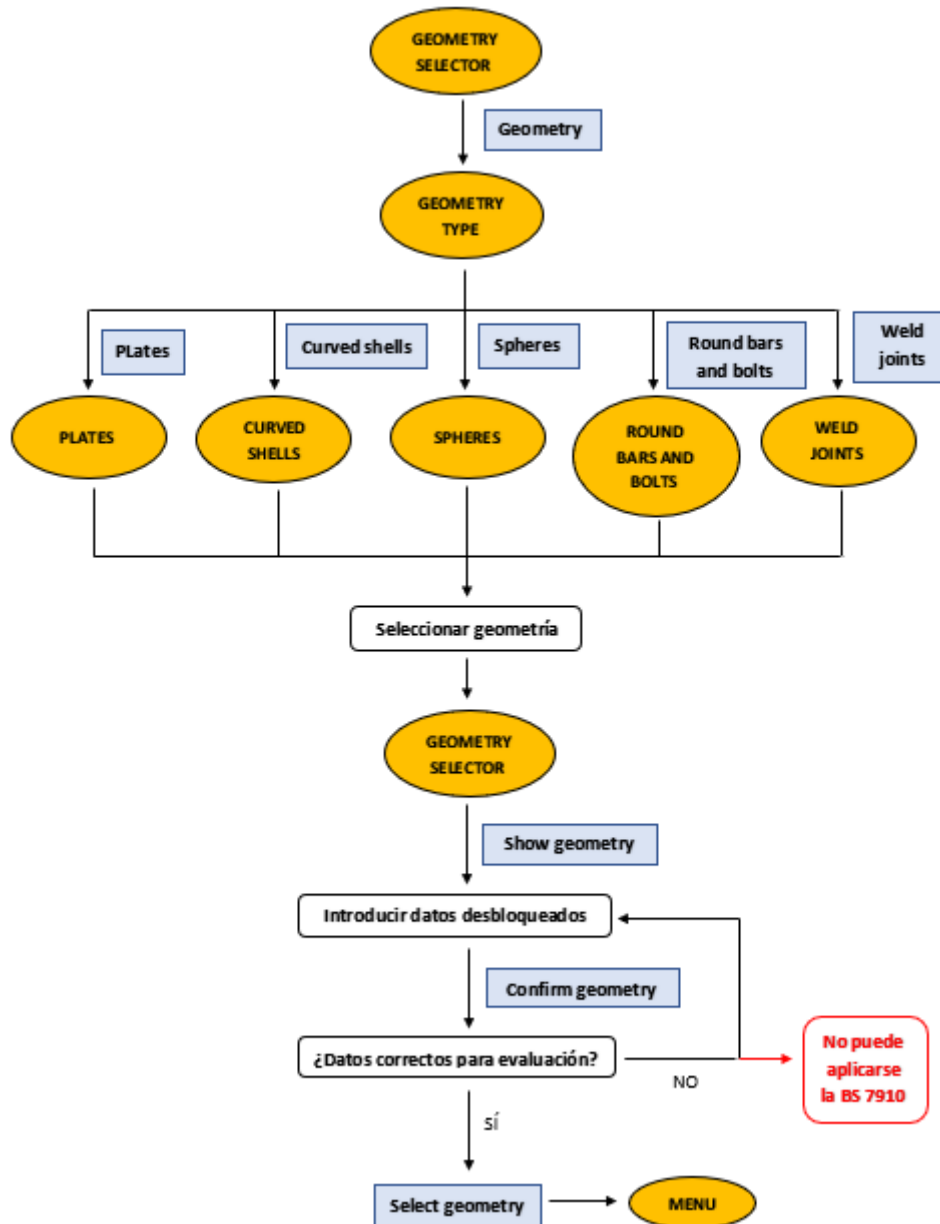
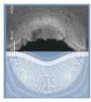


Figura 17. Esquema general de los pasos a seguir para la selección y introducción de datos de la geometría.

El programa permite escoger distintas configuraciones geometría-defecto para las siguientes geometrías más utilizadas: placas, placas curvas y tuberías, esferas de pared delgada, redondos y tornillos, y uniones soldadas con penetración completa o parcial. Para poder acceder a las interfaces que contienen las distintas configuraciones geometría-defecto para una determinada geometría del componente, es necesario pulsar el botón “Geometry”. Por poner un único ejemplo de estas interfaces de selección (ya que todas ellas tienen la misma estructura y funcionamiento), en la Figura 18 se muestra la interfaz “CURVED_SHELLS”. En ella se muestran las distintas configuraciones geometría-defecto-cargas externas que pueden seleccionarse.

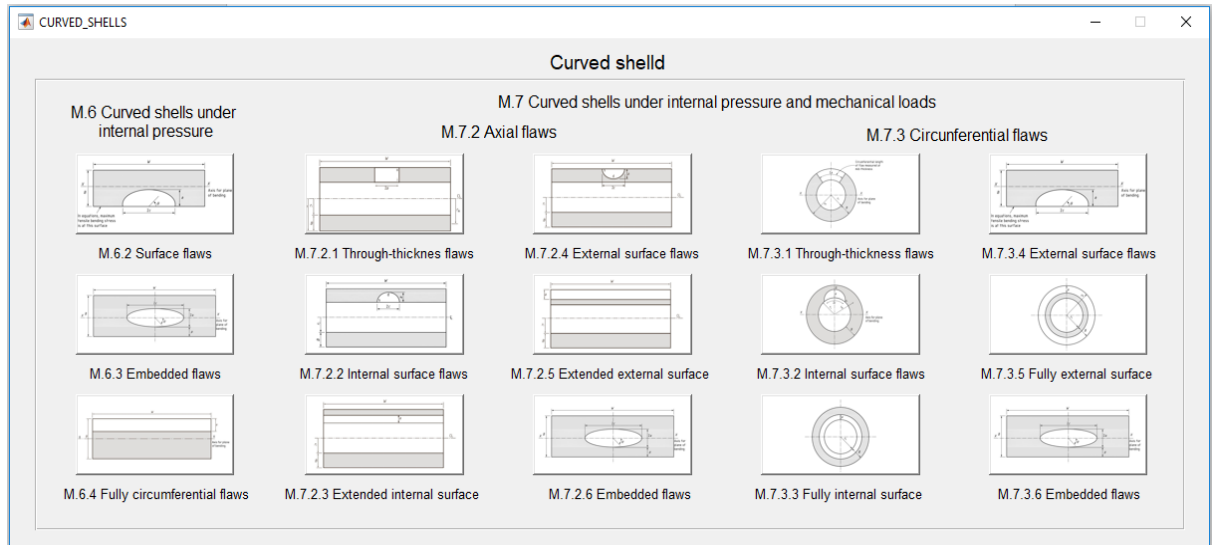
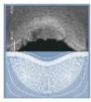


Figura 18. Interfaz gráfica (“CURVED_SHELLS”) para la selección de una configuración geometría-defecto para chapas curvas.

La interfaz “CONSTRAINT” que se muestra en la Figura 19, permite la introducción de los valores necesarios para modificar las condiciones de restricción en el frente del defecto. Es necesario conocer el comportamiento del material: elástico o elasto-plástico.

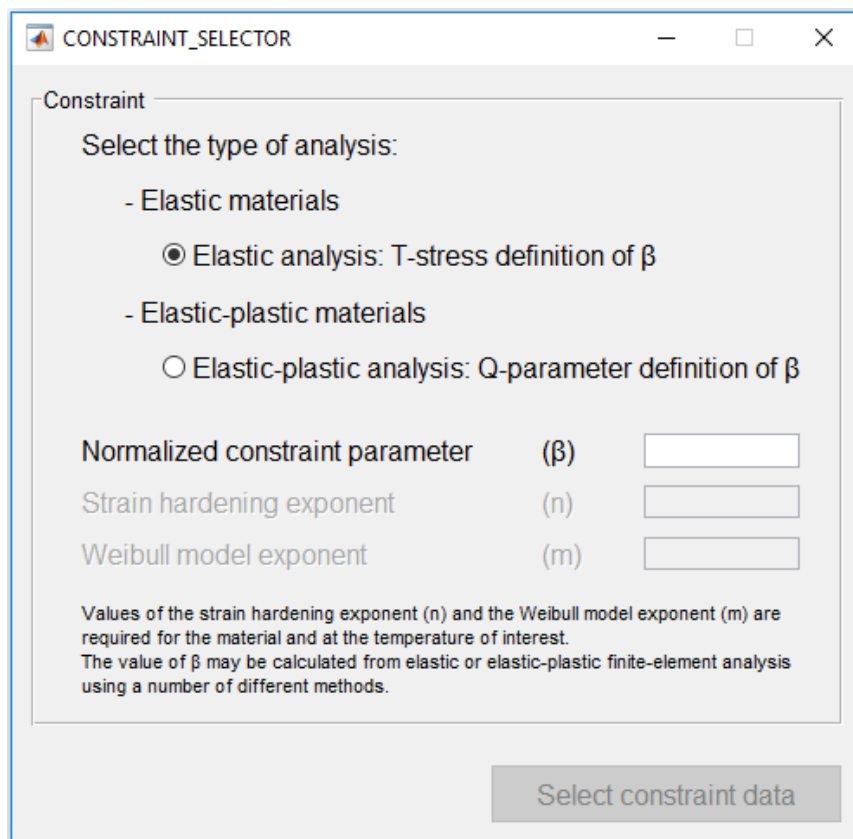
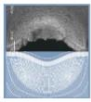


Figura 19. Interfaz gráfica (“CONSTRAINT”) para la introducción de los parámetros de modificación de las condiciones de restricción en el frente del defecto.



Una vez introducidos todos los datos de entrada, ya sea mediante la utilización de una de las geometrías preestablecidas en el procedimiento, y por lo tanto en el programa, o bien mediante la introducción manual de los factores de intensificación y la tensión de referencia, sólo queda pulsar el botón “PLOT” para ejecutar los cálculos.

5.3. Posibles resultados

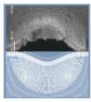
El programa nos permite obtener los siguientes resultados:

- Diagrama de fallo (FAD) según la opción 1 o 2 (Figura 20).
- Factor de seguridad en las cargas.
- Punto de análisis (L_r, K_r) (ver Figura 20).
- Longitud de defecto crítico.
- Estimación sobre el mecanismo de fallo más probable (fractura frágil, colapso plástico, fractura mixta).
- Diagrama de fallo modificado por la variación de la condición de confinamiento en el frente de grieta (ver Figura 21).
- Otros datos que influyen en el FAD.

Podemos observar la línea de fallo para un determinado material u opción de cálculo, así como la situación de un componente en cuanto a la aptitud para el servicio.

A parte de los resultados, se puede jugar con la representación gráfica del FAD, posibilitando las siguientes opciones:

- Superposición de diagramas de fallo y puntos de análisis. El objetivo es permitir la comparación. Con estos también se puede representar, punto a punto, la evolución de la situación de un componente (ver Figura 22).
- La curva del punto de análisis $K_r = mL_r$. Punto de corte con la línea de fallo (ver Figura 23).



- Representación del diagrama por puntos en vez de línea continua. Permite ver la distribución de puntos que conforman la línea de fallo y estimar si el ajuste será bueno o no (ver Figura 23).

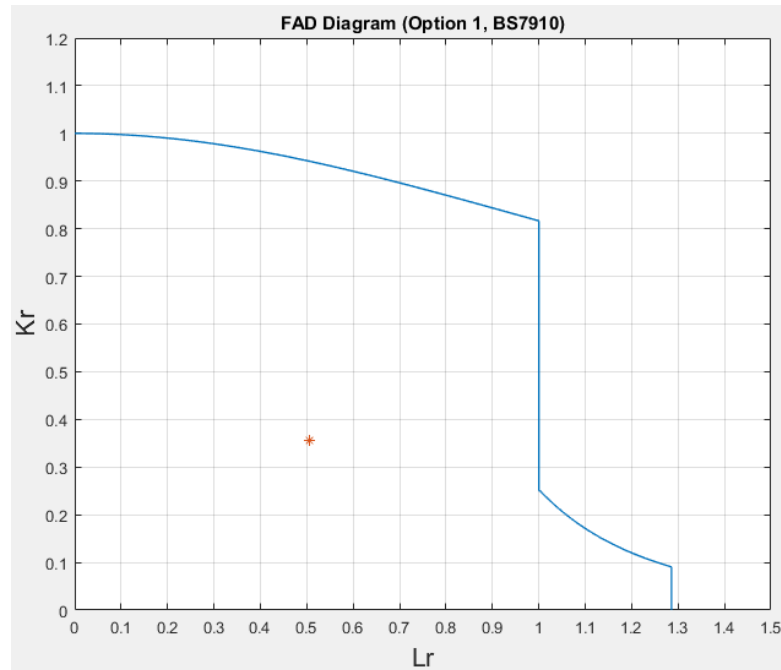


Figura 20. Ejemplo de diagrama FAD para un determinado material, geometría y estado de carga, calculado mediante la herramienta informática. Se puede observar la línea de fallo y el punto de análisis.

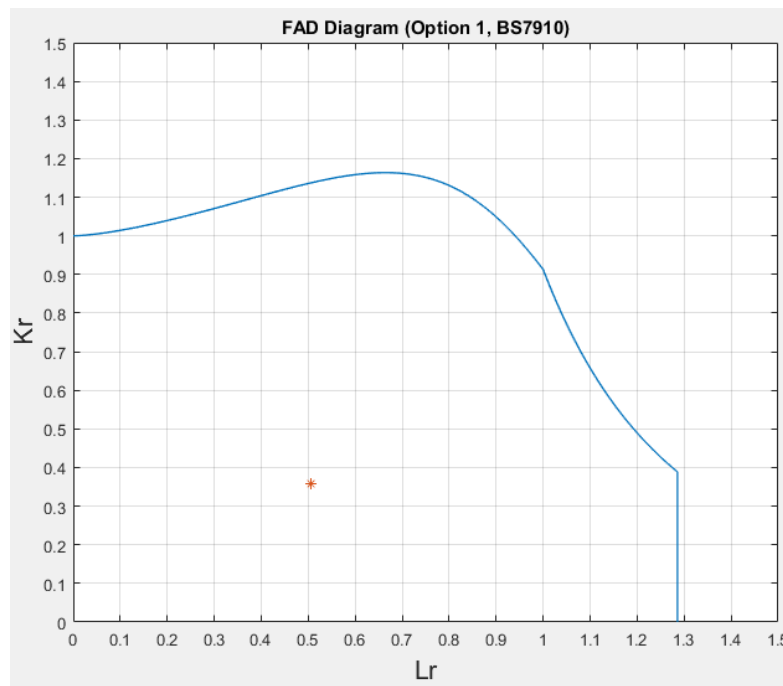


Figura 21. Ejemplo de diagrama FAD para un determinado material, geometría y estado de carga, calculado mediante la herramienta informática, variando la condición de confinamiento en el frente de grieta ($\beta < 0$). Se puede observar la línea de fallo y el punto de análisis.

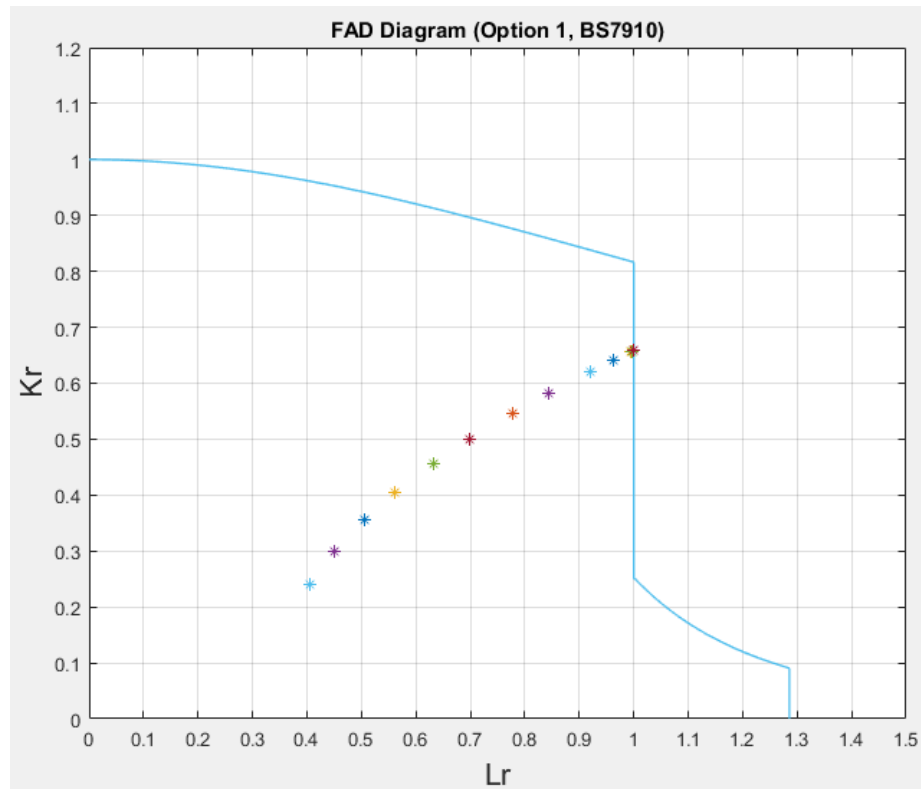
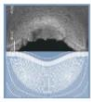


Figura 22. Ejemplo de superposición de los puntos de análisis para una determinada geometría, estado de carga y material, donde se va variando el tamaño de grieta hasta llegar a límite.

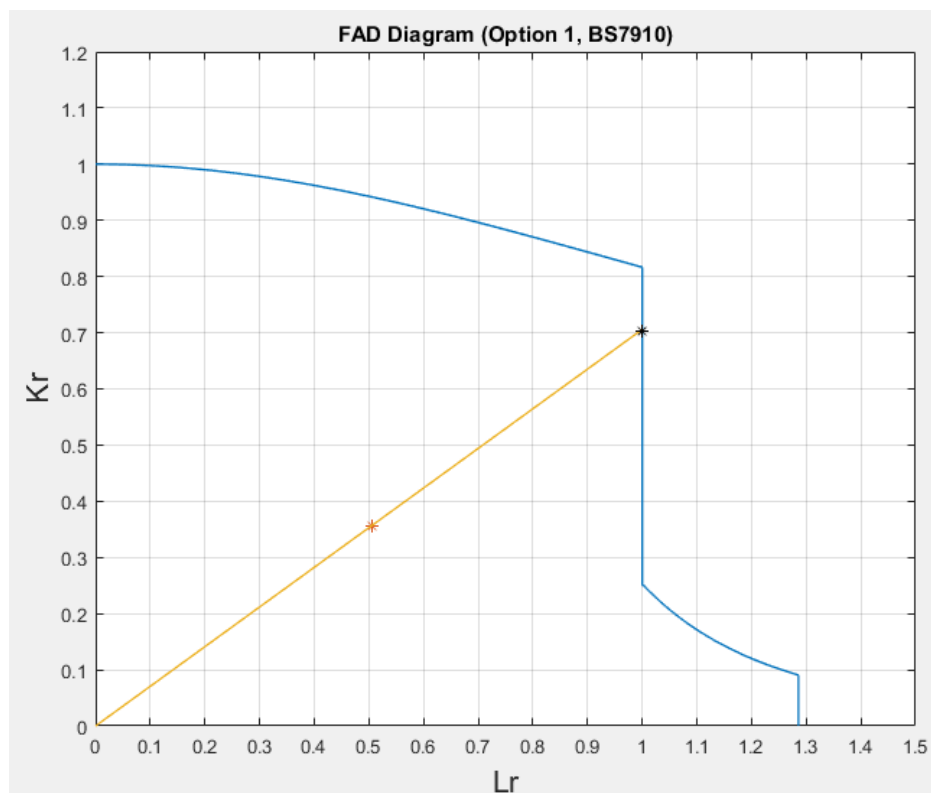
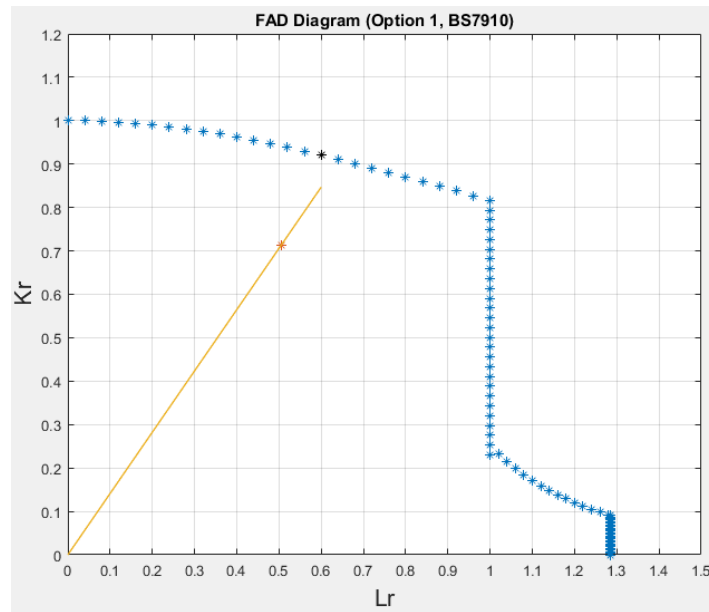
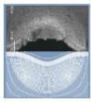
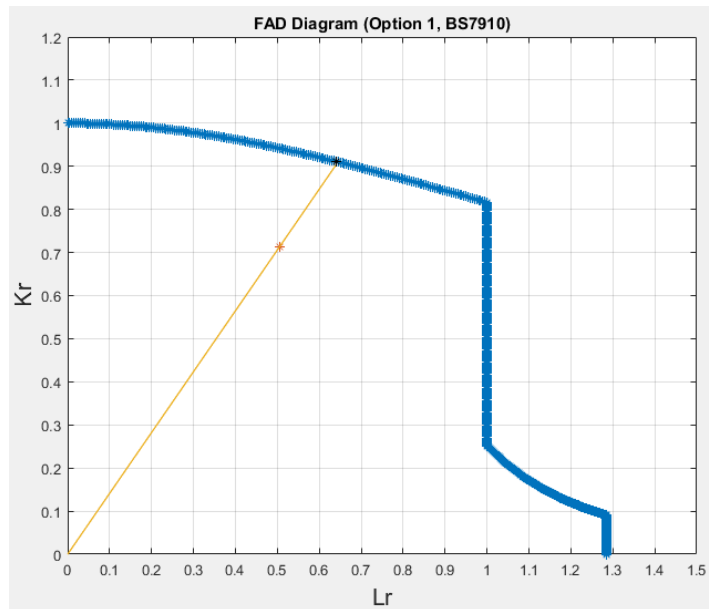


Figura 23. Representación del diagrama FAD y la curva $Kr=mLr$. Se indica en negro el punto de corte con la línea de fallo, y en naranja el punto de análisis.



a)

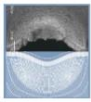


b)

Figura 24. Representación de los puntos que generan la línea fe fallo. a) Pocos puntos de análisis (25 puntos desde Lr igual a 0 a 1). b) Muchos puntos de análisis (200 puntos desde Lr igual a 0 a 1)

En la Figura 24 se puede observar como refinando el análisis, se obtienen resultados más ajustados y con menos error. Esto es debido a que el punto de corte entre la recta de pendiente “m” y la línea de fallo se realiza mediante aproximación de los puntos q contienen ambas curvas cuando el factor de seguridad es aproximadamente 1.

El programa mantiene la misma relación a/c siempre, es decir, al aumentar a, c aumenta proporcionalmente.



6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1. Conclusiones

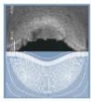
La integridad estructural se ha convertido en una rama ingenieril fundamental en una sociedad en la que cada vez se les exige más a los materiales y estructuras. No solo tiene importancia a nivel de seguridad, si no a nivel económico, pudiendo extender más allá la vida útil de los elementos (como las torres eólicas) y evitando la parada o daño de los sistemas de producción por culpa del fallo. Queda claro entonces que realizar una correcta evaluación de la integridad estructural tiene grandes ventajas.

Como método de agilización y simplificación del proceso de evaluación, realizado a partir de procedimientos totalmente establecidos y refundados, se ha llevado a cabo una herramienta informática utilizando el programa MATLAB. Este, intuitivamente estructurado, posee un manual de usuario que permite un aprendizaje paso a paso sin ningún tipo de dificultad.

En programa está basado en el procedimiento BS 7910:2013, y en él se pueden seleccionar las opciones de análisis 1 y 2 definidas en el documento, así como permite modificar la condición de restricción en el frente de grieta, pudiendo aumentar el área bajo la línea de fallo y hacer menos conservador el cálculo. Se pueden seleccionar geometrías de forma automática (las presentes en el Anexo M del procedimiento), o se pueden introducir los valores de los factores de intensificación de cargas y de tensión de referencia de manera manual.

Todo esto permite la obtención de resultados en forma de diagramas de fallo, entre otros datos, de una manera rápida y sencilla. Incluye modalidades de visualización que mejoran interpretación de los resultados.

Se cumplen así todos los objetivos, principales y secundarios, previstos en este trabajo de fin de máster, dejando la opción a posibles mejoras y al ampliamiento del programa en un futuro.



6.2. Trabajo futuro

Los objetivos prioritarios para una futura ampliación del programa serían los siguientes:

- Ampliación del módulo de fractura: análisis de desgarro dúctil, mismatching y modo mixto.
- Tratamiento estadístico de los datos del material.
- Configuración de la opción 3 de análisis a fractura.
- Incorporar más geometrías, especialmente los conjuntos soldados.
- Incluir los módulos de fatiga, fluencia y corrosión.
- Permitir el tratamiento de los datos de la curva tensión-deformación verdadera si es seleccionada la opción 2 de análisis.
- Impresión en pdf de los resultados obtenidos.

Otros objetivos de interés a largo plazo serían:

- Posibilitar la elección de otros procedimientos.
- Posibilitar la elección de las unidades de trabajo.
- Biblioteca de materiales con las propiedades exigidas para el cálculo.
- Incorporar las iteraciones entre defectos.
- Incorporar el análisis de fuga antes de rotura.
- Incorporar otras opciones de análisis hasta, si fuera posible, completar la programación de todo el procedimiento.



7. PRESUPUESTO

7.1. Licencia de programas informáticos y bienes de equipo

Código	Descripción	Unidad	Precio/Unidad	Cantidad	Coste total
7.1.1	Licencia <i>MATLAB</i>	h	3,0 €	150	450 €
7.1.2	Licencia de <i>Microsoft Office</i>	h	2,0 €	30	60 €
Subtotal 7.1					510 €

Tabla 1. Presupuesto de licencias de programas informáticos y bienes de equipo.

7.2. Mano de obra

Código	Descripción	Unidad	Precio/Unidad	Cantidad	Coste total
7.2.1	Búsqueda de información y análisis	h	50 €	50	2.500 €
7.2.2	Realización del programa y documentación pertinente	h	50 €	170	8.500 €
Subtotal 7.2					11.000 €

Tabla 2. Presupuesto de la mano de obra.

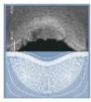
7.3. Presupuesto parcial

Código	Descripción	Coste
7.1	Licencia de programas informáticos y bienes de equipo	510 €
7.2	Mano de obra	11.000 €
TOTAL		11.510 €

Tabla 3. Presupuesto parcial.

7.4. Presupuesto general

Finalmente, una vez sumadas todas las partidas presupuestarias, se obtiene el Presupuesto de Ejecución de Material (PEM), se calcula el 6% de Beneficio Industrial y el 13% de Gastos Generales, aplicados ambos términos a la suma calculada en un principio.



Una vez sumados estos términos, se aplica el 21% de I.V.A. sobre el resultado y obtendremos el Presupuesto de Ejecución por Contrato (PEC).

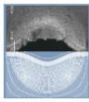
P.E.M.	11.510 €
6% B.I.	690,6 €
13% G.G.	1.496,3 €
TOTAL PARCIAL	13.696,9 €
21% I.V.A.	2.876,35 €
P.E.C	16.573,25 €

Tabla 4. Presupuesto de Ejecución por Contrato.

Asciende el Presupuesto de Ejecución por Contrato a la expresada cantidad de **DIECISEIS MIL QUINIENTOS SETENTA Y TRES EUROS CON VEINTICINCO CÉNTICOS.**

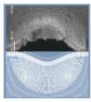
En Pola de Siero, Julio de 2018

Fdo.: Imanol García Pedrero



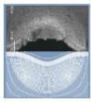
8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Santiago Rey, David. << *Evaluación de la Integridad Estructural según FITNET* >>. Universidad de Oviedo, 2013.
- [2] Lacalle Calderón, Roberto. *Apuntes de la asignatura "Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural"*, Universidad de Cantabria, 2013.
- [3] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013, p. 4.
- [4] F. Gutiérrez-Solana, S. Cicero, << *FITNET FFS procedure: un procedimiento europeo unificado de evaluación de la integridad estructural* >>, Anales de la mecánica de la fractura, 2007.
- [5] Wintle, J B. << *Which procedures for fitness-for-service assessment: API 579 or BS 7910?* >>. International Conference on Pressure Vessel Technology, 2003. TWI, The Welding Institute. [En línea]: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/which-procedures-for-fitness-for-service-assessment-api-579-or-bs-7910-july-2003/>.
- [6] Ainsworth, Robert A. << *Advances in the R5 and R6 defect assessment procedures* >>. 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), 2005.
- [7] W. Dean, David, J. Budden, Peter, and Ainsworth, Robert A. << *R5 Procedures for Assessing the High Temperature Response of Structures: Current Status and Future Developments* >>, ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2007.
- [8] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. Introduction.
- [9] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. pp. 35-40.
- [10] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. pp. 30-35.



- [11] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. pp. 62-64.
- [12] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. Anexo R, p. 404.
- [13] Rodríguez González, Cristina y Betegón Biempica, Covadonga. Apuntes de la asignatura “Mecánica de la Fractura”. Universidad de Oviedo, 2017.
- [14] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. pp. 50-55.
- [15] British Standards Institution, *BS 7910 – Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, 2013. Anexo N.

ANEXOS



ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO

En el siguiente manual se indicará todos los pasos necesarios para poder llevar a cabo una correcta utilización del programa, y, por lo tanto, una correcta evaluación de la integridad estructural de un determinado componente. Se parte de la base de que el usuario no ha utilizado nunca el programa, por lo que se explicaran de forma detallada todos los pasos a seguir, así como todas las opciones disponibles para realizar la evaluación.

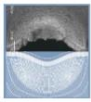
A.1. Aspectos generales

Bienvenidos al programa “Evaluación de la Integridad Estructural a Fractura según la BS 7910:2013”.

Antes de comenzar ha de tener en cuenta que este programa ha sido creado a partir de *MATLAB*. Todos los archivos que forman parte del programa ya sean funciones (*.m), interfaces gráficas (*.fig), tablas (*.xlsx) e imágenes (*.jpg), se encuentran dentro de la carpeta *Fracture_BS7910*. No es recomendable extraer ningún archivo de dicha carpeta puesto que podría afectar al correcto funcionamiento del programa.

Si en algún momento se decide realizar modificaciones en alguno de los scripts que lo configuran, recuerde por seguridad, realizar una copia de la carpeta *Fracture_BS7910* para mantener el programa intacto en caso de fallo.

El idioma predeterminado es el inglés, no encontrándose disponible en otros idiomas. Aunque el programa permita detectar y transmitir algunos errores que puedan llegar a producirse, como aquellos referentes a la geometría debido a las condiciones impuestas por la norma o errores por falta de datos, no todos han sido previstos por lo que al ejecutar puede que no se genere una respuesta, o que esta sea equivocada. Por ello, es recomendable que use el programa acompañado de la norma, así como que indique todos los datos necesarios y cuyos valores no se tomen por defecto en caso de su ausencia.



A.2. Interfaz “INTRO”

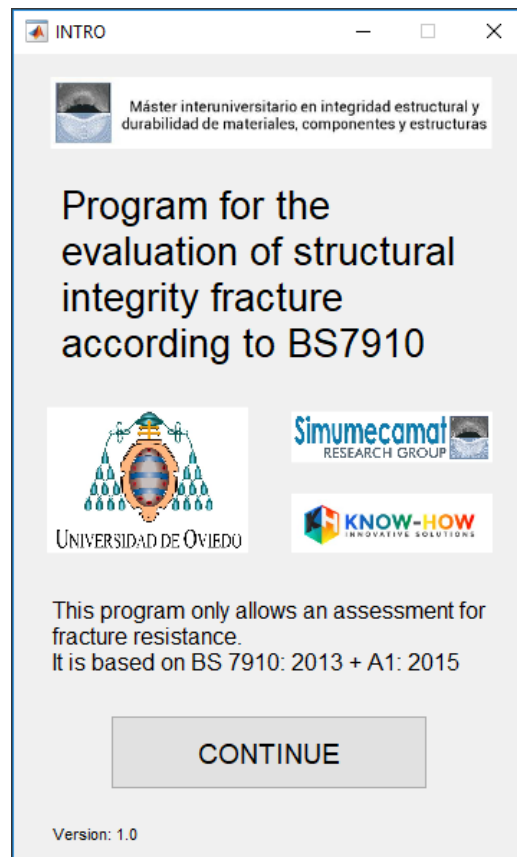


Figura A.1. Interfaz gráfica “INTRO”. Aparece al iniciar el programa.

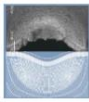
En la Figura A.1 se muestra la interfaz gráfica de iniciación del programa. En ella se indican el nombre del programa, la normativa vigente en la que está basado, las entidades colaboradoras, así como la versión.

En la parte inferior se encuentra el botón “Continue” que permite avanzar hacia la siguiente interfaz gráfica (“Menu”).

A.3. Interfaz “MENU”

La Figura A.2 representa el menú principal del programa. Se encuentra debido en varios paneles, cumpliendo cada uno de ellos una única misión de las siguientes:

- **Introducción de datos (inputs):** datos de entrada requeridos por la BS 7910:2013 necesarios para generar una correcta obtención de resultados. Esta función es



cumplida por los distintos elementos que forman los siguientes paneles: “*Input data*” y “*Manual characterization*”.

- **Procesado:** ejecuta los cálculos necesarios para la obtención de los resultados, es decir, aplica los cálculos establecidos en la BS 7910:2013. También incluye algunos comandos de personalización de los datos obtenidos. Esta función es cumplida por los distintos elementos que forman los siguientes paneles: “*Plot options*” y las casillas “*Plot point line*” y “*Dot plot*” del panel “*Failure Analysis Diagram (FAD)*”.
- **Exposición de resultados (outputs):** expone los resultados obtenidos (FAD, factor de seguridad...) en base a los datos de entrada tomados. Esta función es cumplida por los distintos elementos que forman los siguientes paneles: “*Failure Analysis Diagram (FAD)*”, “*Security factor in loads*” y “*Additional data*”.

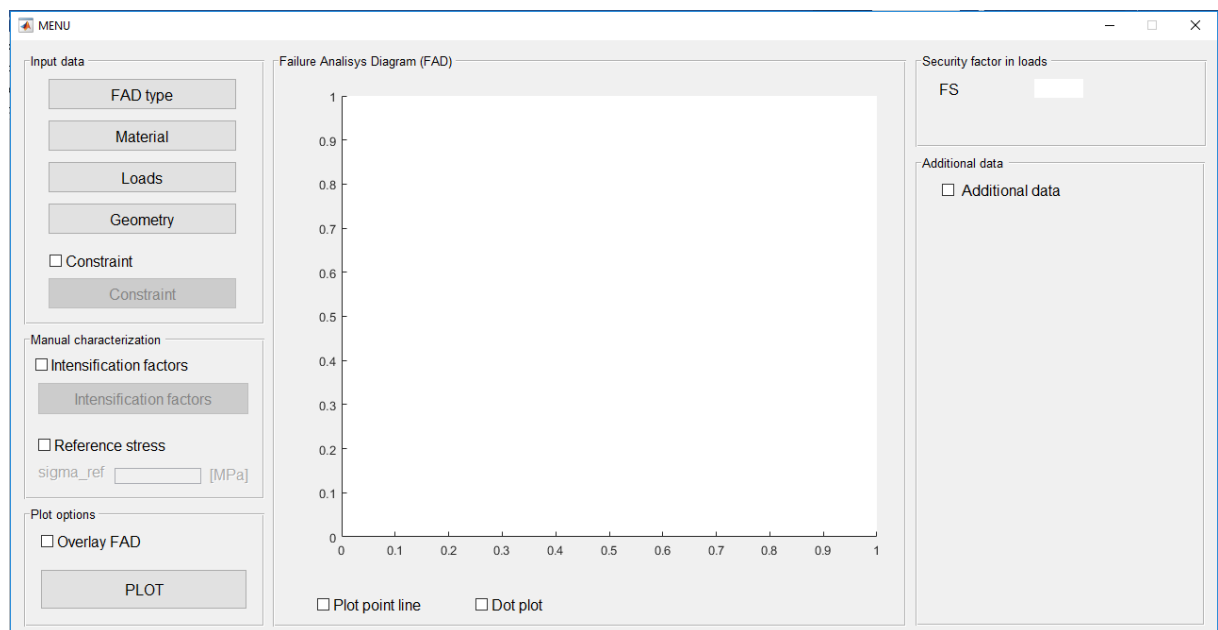
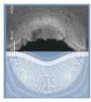


Figura A.2. Interfaz gráfica “MENU”. Es el menú principal del programa.

A continuación, se explicarán en más detalle cada uno de los paneles.



A.3.1. Panel “Input data”

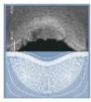
Está formado por los siguientes cinco botones:

- **“FAD type”**: le envía a la interfaz gráfica *“FAD_SELECTOR”*. En ella se puede establecer el tipo de opción de cálculo del diagrama FAD, así como otras opciones de optimización del proceso de cálculo.
- **“Material”**: le envía a la interfaz gráfica *“MATERIAL_SELECTOR”*. En ella se pueden introducir todos los datos del material necesarios según la opción de cálculo previamente escogida.
- **“Loads”**: le envía a la interfaz gráfica *“LOADS_SELECTOR”*. En ella se pueden introducir todos los datos de entrada relativos a las cargas que experimenta el componente.
- **“Geometry”**: le envía a la interfaz gráfica *“GEOMETRY_SELECTOR”*. En ella se pueden introducir todos los datos de entrada correspondientes a la geometría de análisis.
- **“Constraint”**: le envía a la interfaz gráfica *“CONSTRAINT_SELECTOR”*. En ella se pueden introducir todos los datos de entrada relativos al fenómeno de constraint en el caso de que se considere que las condiciones de trabajo del componente difieran considerablemente de las condiciones de confinamiento en el frente de grieta impuestas en los ensayos.

El pulsador *“Constraint”* se encuentra inicialmente bloqueado. Para poder acceder a dicho botón es necesario seleccionar el checkbox *“Constraint”* que se encuentra sobre él. Dicho pulsador se bloqueará de nuevo en caso de deseleccionar el checkbox o de pulsar el botón *“FAD type”*.

A.3.2. Panel “Manual characterization”

Los checkbox *“Intensification factors”* y *“Reference stress”* desbloquean el botón *“Intensification factors”* y la casilla *“sigma_ref”*, respectivamente.



El pulsador “*Intensification factors*” le envía a la interfaz gráfica “*Manual*”. En ella se pueden introducir de manera manual el valor de todos los factores que se especifican en el Anexo M de la BS 7910:2013 para cada geometría. Debido a la introducción manual de estos factores, también se debe introducir manualmente la tensión de referencia. Por ello, al activar el checkbox “*Intensification factors*”, también se desbloquea la casilla “*sigma_ref*”.

La casilla correspondiente a la tensión de referencia puede activarse, aunque no se introduzcan de manera manual los factores de intensificación.

A.3.3. Panel “Plot options”

El botón “*PLOT*” ejecuta todos los cálculos y genera todos los outputs que serán representados en otros paneles. Como ya se ha mencionado con anterioridad, es recomendable seguir todos los pasos previos de introducción de datos antes de ejecutar los cálculos.

El checkbox “*Overlay FAD*”, si se encuentra activado, permite superponer varios diagramas de fallo en el gráfico central del menú, es decir, no se borra el resultado previo (ver Figura A.3). Si no se encontrase activado, al calcular se elimina el gráfico anterior en caso de existir.

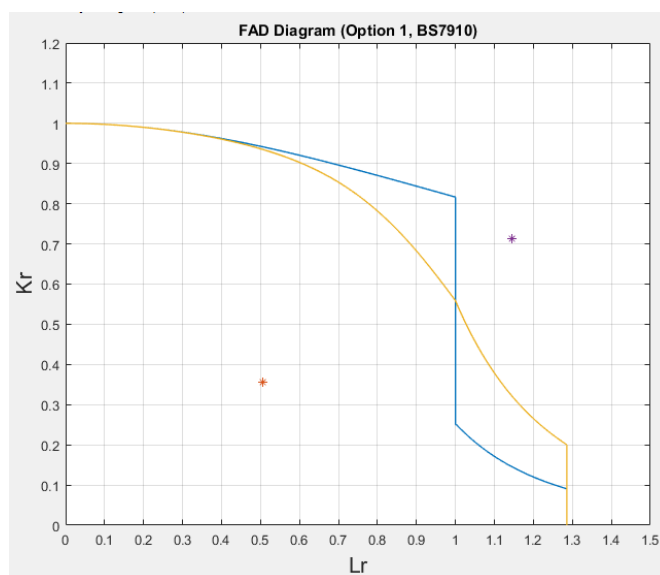
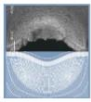


Figura A.3. Superposición de las opciones 1 y 2 de la BS 7910 para dos análisis distintos.



A.3.4. Panel “*Failure Analysis Diagram (FAD)*”

En este panel se encuentra el diagrama FAD y dos checkboxes que modifican o añaden información a este.

En el gráfico central se representan:

- **Diagrama de fallo (FAD):** es la línea de fallo descrita por los vectores L_r y f_{L_r} definidos en el apartado 7.3 de la BS 7910:2013.
- **Punto de análisis:** es el punto calculado para la geometría y cargas establecidas que define, en función de los valores de L_r y K_r (apartado 7.3 de la BS 7910:2013), la situación a fractura en la que se encuentra un componente de un determinado material.
- **Recta OAB:** donde O es el origen del diagrama (0,0), A es el punto de análisis (L_r, K_r) y B es el punto de corte de esta recta con el diagrama de fallo (L_{rc}, K_{rc}). A partir de la distancia OA y la distancia OB se calcula el factor de seguridad (FS). El punto B siempre se representa en negro. Esta recta se activa mediante el checkbox “*Plot point line*”.

En la Figura A.4 se observa un ejemplo de un diagrama FAD donde se representan los aspectos previamente mencionados.

El checkbox “*Dot plot*” permite visualizar en el gráfico central los puntos que conforman el diagrama de fallo. El objetivo de esta función es dar la oportunidad al usuario de comprobar que el número de puntos que conforman el FAD es suficiente para realizar una correcta evaluación de la integridad estructural. En la Figura A.5 se pueden observar las diferencias entre usar más o menos puntos. Con más puntos el refinamiento y, por lo tanto, el resultado, va a ser mejor.

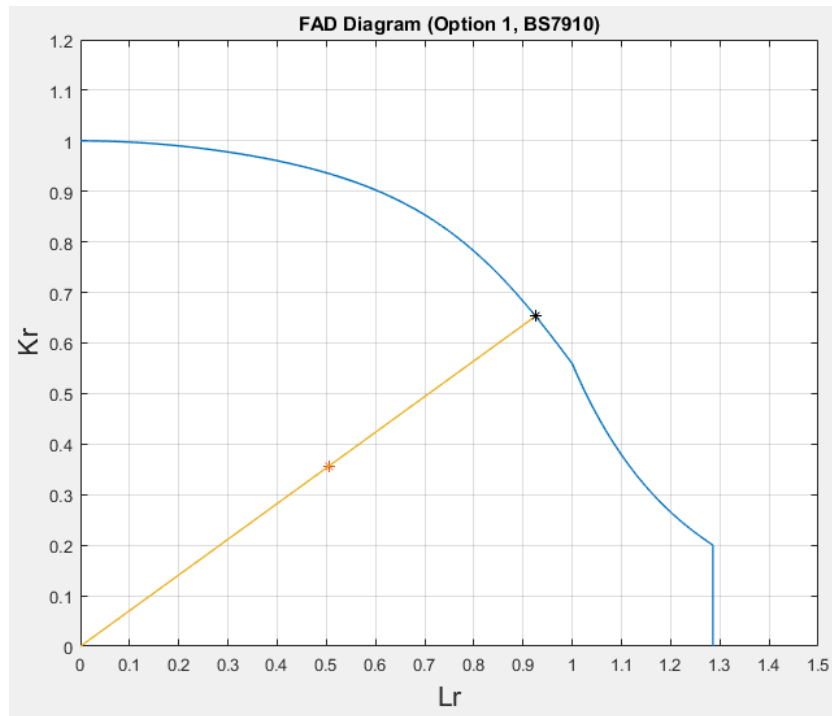
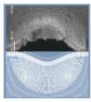


Figura A.4. Ejemplo de diagrama de FAD con la visualización de la recta OAB de pendiente m .

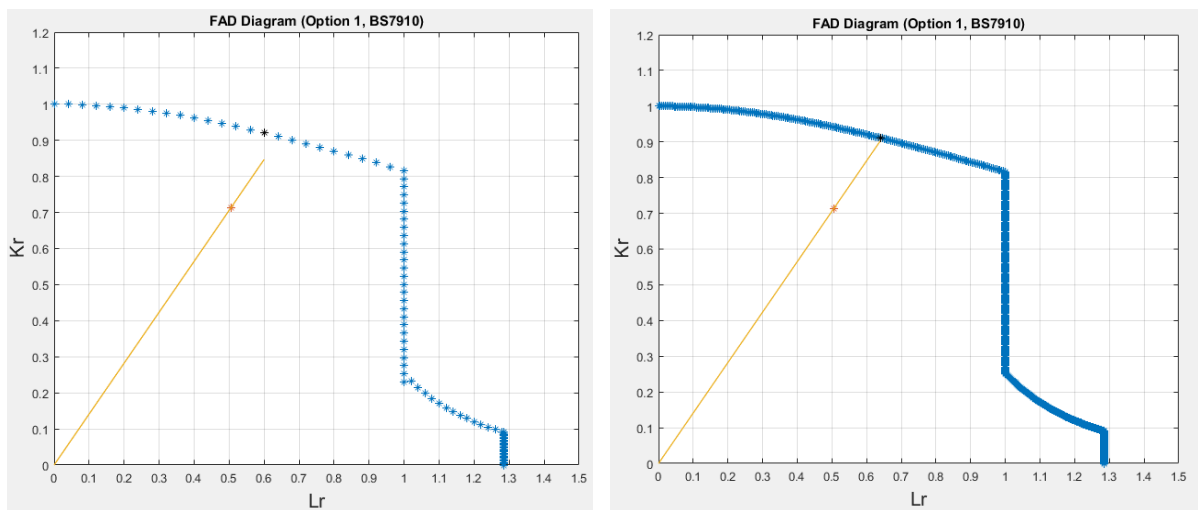
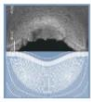


Figura A.5. Comparación entre usar más o menos puntos de definición del FAD.

A.3.5. Panel "Security factor in loads"

En la casilla "FS" se representa el valor del factor de seguridad. Este valor, en el caso de no existir ningún error, se establece al ejecutar el cálculo.



Debajo de esta casilla aparecerá cuadro de texto que puede adoptar, en función del valor del factor de seguridad, las siguientes apariencias:

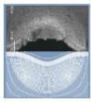
- $FS \geq 1.2$:
 - Color: Verde.
 - Texto: *"Safe situation"*.
- $1 \leq FS < 1.2$:
 - Color: Amarillo.
 - Texto: *"Safe but dangerous situation"*.
- $FS < 1$:
 - Color: Rojo.
 - Texto: *"Unsafe situation"*.

A.3.6. Panel "Additional data"

En este panel se resumen algunos a de los datos generales más importantes que confeccionan el resultado final. Se han incorporado los valores correspondientes al factor intensificador de la carga de membrana y flexión (" M_m " y " M_b " respectivamente), factor de intensidad de tensiones (" K_I "), tensión de referencia (" σ_{ref} "), componentes L_r y K_r del punto de análisis (" L_{r_p} " y " K_{r_p} " respectivamente), componentes L_r y K_r del punto B de corte (" $L_{r_{pc}}$ " y " $K_{r_{pc}}$ " respectivamente), la longitud de grieta crítica (" a_{cri} "), la L_r máxima del diagrama FAD (" L_{rmax} ") y pendiente m de la recta OAB (" m ").

También se incluye un cuadro de texto en la parte inferior del panel, que puede adoptar, según el valor de m , las siguientes afirmaciones:

- **$m < 0.4$:** *"m is less than 0.4. Therefore, the most likely failure mechanism is plastic collapse"*.



- **0.4 <= m <= 1.1:** “m is between 0.4 and 1.1. Therefore, it is most likely that a mixed failure mechanism will occur”.
- **1.1 <= m:** “m is greater than 1.1. Therefore, the most likely failure mechanism is brittle fracture”.

Para poder visualizar estos valores es necesario activar el checkbox “Additional data”. Si se deselecciona se ocultan los valores. En el caso de realizar un cálculo sobre uno ya establecido esta información adicional se ocultará.

A.4. Interfaz “FAD_SELECTOR”

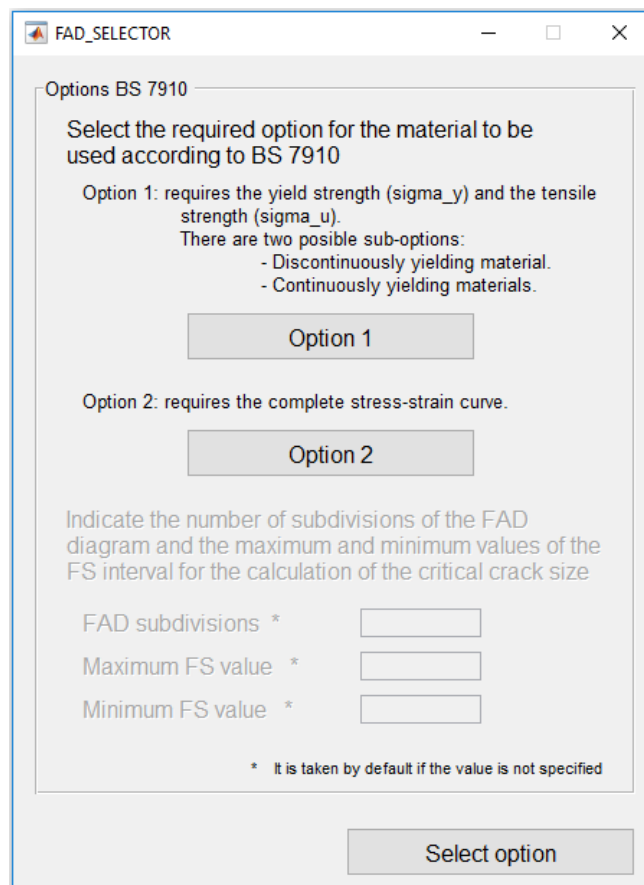
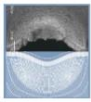


Figura A.6. Interfaz gráfica “FAD_SELECTOR”. En ella se selecciona la opción de análisis y parámetros de optimización del cálculo.

En la Figura A.6 se representa la interfaz gráfica “FAD_SELECTOR” encargada de la selección del tipo de diagrama de fallo. Aunque el apartado 7.3 de la BS 7910:2013 describe



tres opciones distintas para el cálculo del diagrama de fallo, en este programa se han incluido sólo 2. Estas son:

- **Opción 1:** es necesario conocer datos del material como el límite elástico (" σ_y "), la resistencia a tracción (" σ_u ") y el módulo de Young (" E "). Sin embargo, no es necesario conocer la curva tensión-deformación verdaderas. El botón "*Option 1*" selecciona esta opción. En la Figura A.7 se muestra un ejemplo del FAD obtenido mediante esta opción. La existencia o no existencia de escalón de cedencia en la curva de tracción del material se especificará en la interfaz gráfica "*MATERIAL_SELECTOR*".

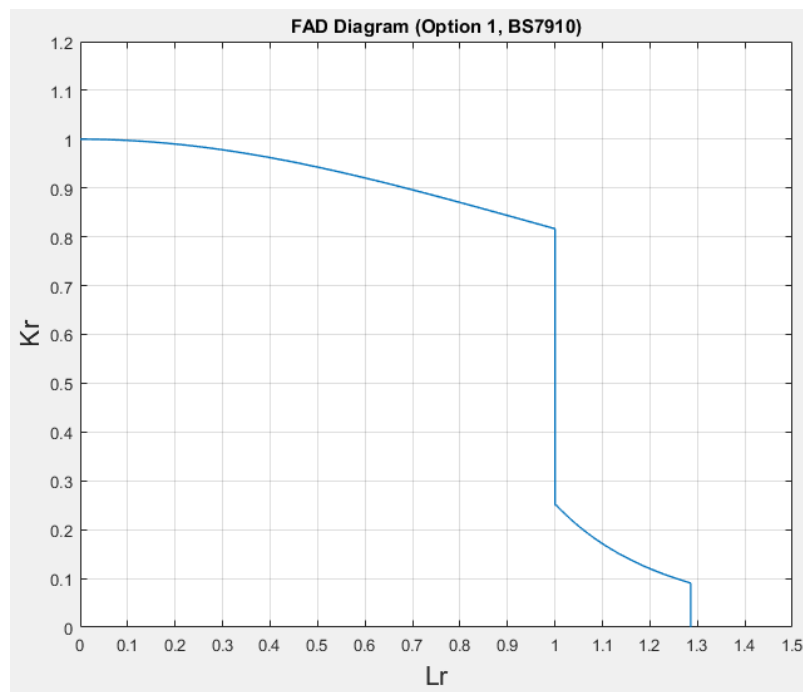


Figura A.7. Ejemplo de diagrama de fallo empleando la opción 1 para un material con escalón de cedencia.

- **Opción 2:** es necesario conocer datos del material como el límite elástico (" σ_y "), la resistencia a tracción (" σ_u ") y el módulo de Young (" E "), así como la curva de tensión-deformación verdadera completa. El botón "*Option 2*" selecciona esta opción. En la Figura A.8 se muestra un ejemplo del FAD obtenido mediante esta opción.

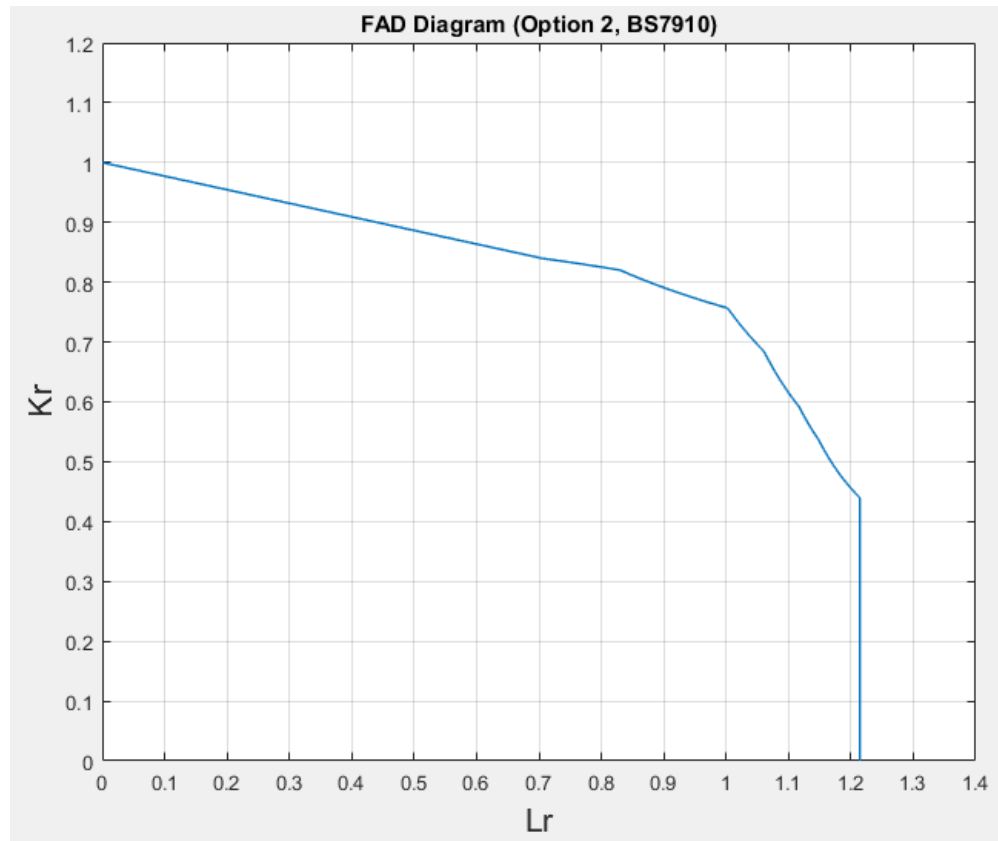
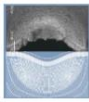


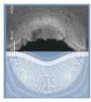
Figura A.8. Ejemplo de diagrama de fallo empleando la opción 2 para un material sin escalón de cedencia.

La selección de una de las dos opciones desbloquea las siguientes casillas:

- **“Subdivisions”**: hace referencia al número de puntos que forman la línea de fallo desde $L_r = 0$ a $L_r = 1$. Si no se especifica ningún valor, el número de subdivisiones tomado por defecto será 200.

NOTA: Cuanto mayor sea este valor, más tiempo requerirá el programa para poder ejecutar el cálculo. Si es excesivamente grande puede que el programa se bloquee.

- **“Maximum FS value”**: límite superior del factor de seguridad (“ FS_{max} ”) que se utiliza para determinar la longitud de grieta crítica (“ a_{cri} ”). Si no se especifica ningún valor, es seleccionado 1.005 por defecto.
- **“Minimum FS value”**: límite inferior del factor de seguridad (“ FS_{min} ”) que se utiliza para determinar la longitud de grieta crítica (“ a_{cri} ”). Si no se especifica ningún valor, es seleccionado 0.995 por defecto.



En la integración paramétrica que se realiza para obtener la longitud de grieta crítica, el valor de a y de c va variando manteniéndose la proporción a/c constante. El momento en el que el factor de seguridad se encuentre entre “ FS_{max} ” y “ FS_{min} ” el cálculo se detendrá.

Para finalizar, es necesario pulsar el botón “*Select option*” para que se extraigan los inputs y cerrar la interfaz.

A.5. Interfaz “*MATERIAL_SELECTOR*”

Property	Symbol	Unit
Yield Strength	(σ_y)	[MPa]
Tensile Strength	(σ_u)	[MPa]
Young Module	(E)	[MPa]
Temperature	(T)	[°C]
Fracture Toughness	(Kmat)	[MPa(m) ^{0.5}]
Poisson Ratio	(ν) *	

Yielding: Yes, No

Lower yield selector

Lower yield strength of discontinuously yielding material (R_{eL}) * [MPa]

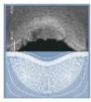
* It is taken by default if the value is not specified

Select material

Figura A.9. Interfaz gráfica “*MATERIAL_SELECTOR*”. En ella se introducen los datos del material.

En la Figura A.9 se representa la interfaz gráfica “*MATERIAL_SELECTOR*” donde se introducen los datos del material de análisis.

En las casillas “ σ_y ”, “ σ_u ”, “ E ”, “ T ”, “ $Kmat$ ” y “ ν ”, se introducen, respectivamente, los valores del límite elástico, la resistencia a tracción, el módulo de Young, la temperatura, la tenacidad a la fractura, y el coeficiente de Poisson. Este último, en caso de no especificar un valor, tomara por defecto el del acero (0.3).



Si se activa el checkbox “*Lower yield selector*”, se desbloquea la casilla “*R_eL*”, donde se puede introducir el valor del límite elástico inferior. Este dato sólo tiene sentido introducirlo si el material presenta escalón de cedencia. La BS 7910:2013 permite que esta propiedad tome el valor del límite elástico siempre que este sea inferior a 946 MPa. Por lo tanto, en caso de no especificar un valor concreto, el límite elástico inferior será igual al límite elástico.

A medida que se van introduciendo datos, se van desbloqueando las casillas siguientes. Para que se desbloquee el botón “*Select material*” que se encarga de generar los inputs, así como de volver al menú principal, es necesario introducir todos los datos del material.

En caso de haber seleccionado previamente la Opción 1 de cálculo, en la parte central de la interfaz aparecerá un pequeño panel, “*Yielding*” (ver Figura A.9), que te permite definir si el material objeto de evaluación posee escalón de cedencia o no. Si lo tiene, deberá seleccionarse la opción “*Yes*”, la cual se tomará por defecto en caso de no intervención. Si no lo tiene, deberá seleccionarse la opción “*No*”.

En el caso de haber seleccionado la Opción 2, en vez del panel “*Yielding*”, aparecerá el pulsador “*Select file*” (ver Figura A.10). Te da acceso a los directorios del ordenador para poder seleccionar los archivos de Excel que contengan los puntos de la curva tensión-deformación verdaderas.

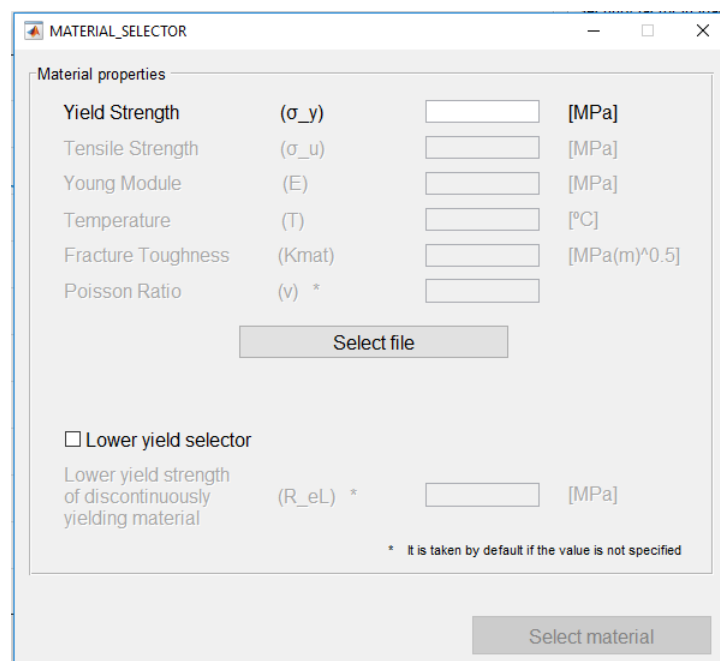
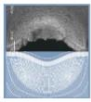


Figura A.10. Interfaz gráfica “*MATERIAL_SELECTOR*” tras haber escogido la Opción 2 de análisis.



La extensión del documento *Excel* ha de ser del tipo “*.xlsx”, y únicamente debe contener los puntos de la curva tensión-deformación verdaderas como se puede observar en la Figura A.11.

def_ver	ten_ver
0	0
0.00043514	51.5224147
0.00068428	100.068452
0.00117687	200.235512
0.00165844	290.481347
0.0023103	350.80954
0.00322775	371.1961
0.00487432	391
0.00627556	402
0.01085079	429
0.01544393	451
0.01664222	457
0.02346226	481
0.03120661	505
0.03465256	517
0.04543579	544
0.06810411	588
0.09570519	627
0.11697547	651
0.14665752	683
0.23241639	756

Figura A.11. Forma de introducir los datos a través de Excel en el programa.

Una vez acabada toda la selección de datos es necesario pulsar el botón “*Select material*” para que se generen todos los inputs y poder volver al menú principal.

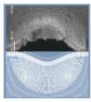
A.5.1. Interfaz “*LOAD_SELECTOR*”

Stress Type	Symbol	Unit
Primary membrane stress	(Pm)	[MPa]
Primary bending stress	(Pb)	[MPa]
Secondary membrane stress	(Qm)	[MPa]
Secondary bending stress	(Qb)	[MPa]

* It is taken by default if the value is not specified

Select loads

Figura A.12. Interfaz gráfica “LOADS_SELECTOR” para la introducción de las cargas.



En la Figura A.12 se representa la interfaz gráfica “LOADS_SELECTOR”. En ella se introducen los datos referentes a las cargas primarias y secundarias definidas en el apartado 6.4 de la BS 7910:2013.

En las casillas “ P_m ”, “ P_b ”, “ Q_m ” y “ Q_b ” se introducen, respectivamente, los valores de la carga primaria de membrana, la carga primaria de flexión, la carga secundaria de membrana, y la carga secundaria de flexión. En caso de no especificar un valor en concreto adoptaran un valor igual 0.

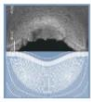
Una vez acabada toda la selección de datos es necesario pulsar el botón “Select loads” para que se generen todos los inputs y poder volver al menú principal.

A.6. Interfaz “GEOMETRY_SELECTOR”

The screenshot shows the 'GEOMETRY_SELECTOR' window. On the left, under 'Geometry parameters', there is a 'Geometry' button and a 'Show geometry' checkbox. Below these are several input fields with labels and units: 'Flaw length or half flaw length (a) [mm]', 'Half flaw length (c) [mm]', 'Section thickness in-plane of flaw (B) [mm]', 'Structure width in-plane of flaw (W) [mm]', 'Parametric angle (θ) [rad]', 'Shortest distance from material surface to embedded flaw (p) [mm]', 'Radius of round bar or bolt (r) [mm]', 'Internal radius (r_i) [mm]', 'External radius (r_o) [mm]', and 'Mean radius (r_m) [mm]'. There are also radio buttons for 'Position' (Interior/Exterior) and 'Restraint' (Normal/Negligible). At the bottom are 'Confirm geometry' and 'Select geometry' buttons. On the right, there is a 'Geometry scheme' area.

Figura A.13. Interfaz gráfica “GEOMETRY_SELECTOR” para la selección e introducción de los datos de la geometría y el defecto.

En la Figura A.13 se representa la interfaz gráfica “GEOMETRY_SELECTOR”. En ella se introducen todos los datos referentes a la geometría del componente objeto de la evaluación.

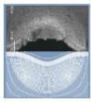


En el panel “Geometry parameters” se introducen los datos de la geometría seleccionada en las siguientes casillas:

- “**a**”: longitud o semi longitud del defecto (referido a la profundidad). En milímetros [mm].
- “**c**”: semi longitud del defecto. En milímetros [mm].
- “**B**”: espesor de la chapa o de la tubería en el plano del defecto. En milímetros [mm].
- “**W**”: ancho de la estructura en el plano del defecto. En milímetros [mm].
- “**θ**”: ángulo para identificar la posición a lo largo de un frente de defecto elíptico. En radianes [rad].
- “**p**”: menor distancia entre la superficie del componente y el defecto. En milímetros [mm].
- “**r**”: radio del redondo o tornillo. En milímetros [mm].
- “**ri**”: radio interior de chapa curvada, elementos tubulares y esferas. En milímetros [mm].
- “**re**”: radio exterior de chapa curvada, elementos tubulares y esferas. En milímetros [mm].
- “**rm**”: radio medio. En milímetros [mm].

El panel “Position”, en caso de estar disponible para la geometría seleccionada, permite escoger en qué punto se va a realizar el cálculo. Puede ser en el fondo de la grieta o interior del tubo o chapa curvada (si es grieta pasante), para lo que será necesario seleccionar la opción “Interior”, o puede ser en la superficie del componente o exterior del tubo o chapa curvada, para lo que será necesario seleccionar la opción “Exterior”.

El panel “Restraint” permite escoger el grado de embridamiento, grado de movilidad. La opción “Normal” considera un embridamiento medio, mientras que la opción “Negligible”



considera uno pequeño. Por defecto, en caso de seleccionar ninguno, se tomará un nivel de restricción medio.

El panel “*Geometry scheme*” muestra un esquema de la geometría seleccionada.

Como se puede observar al ingresar en la interfaz, todos los elementos se encuentran bloqueados a excepción de los pulsadores “*Geometry*” y “*Confirm geometry*”. Esto es debido a que aún no se ha seleccionado ninguna geometría. Para ello será necesario pulsar el botón “*Geometry*”. Esto le llevará a otras interfaces donde podrán seleccionarla. Estas se verán más adelante.

Una vez seleccionada esta, será necesario activar el checkbox “*Show geometry*” que mostrará el esquema de la geometría y desbloqueará las casillas necesarias para definirla. Para asegurar que se introduzcan todos los datos y que se cumplan todas las condiciones geométricas que impone la norma BS 7910:2013 en su anexo M, será necesario pulsar el botón “*Confirm geometry*”, causando dos posibles respuestas:

- En caso de existir algún tipo de error aparecerá en pantalla la interfaz gráfica de “*ERROR*”. En ella se indicará el tipo de error que hemos cometido. En la figura A.14 se muestra un ejemplo de la ventana de error.

NOTA: aunque se hayan incluido la detección de gran variedad de errores, tanto por falta de datos como por incumplimiento de alguna restricción geométrica, pueden surgir errores no tenidos en cuenta que conllevaran a la no activación del mensaje.

- En caso de no existir ninguno se desbloqueará el botón “*Select geometry*”.

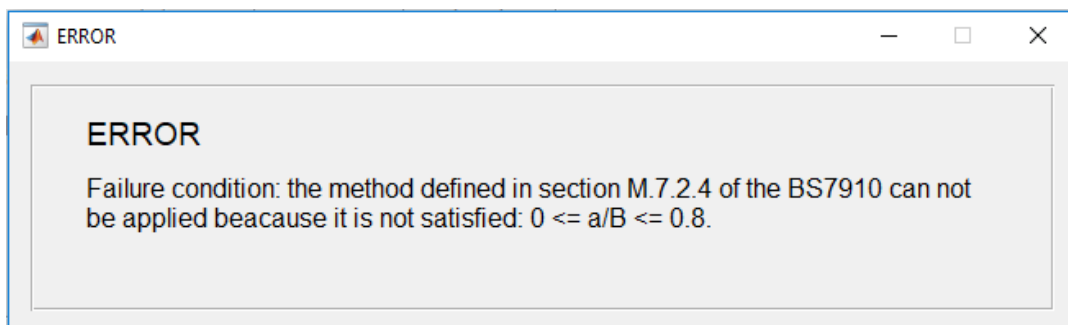
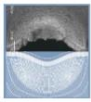


Figura A.14. Ejemplo de la ventana de error del programa.



Para generar los inputs y volver al menú principal es necesario pulsar el botón “*Select geometry*”.

A.6.1. Interfaz “ELEMENT TYPE”

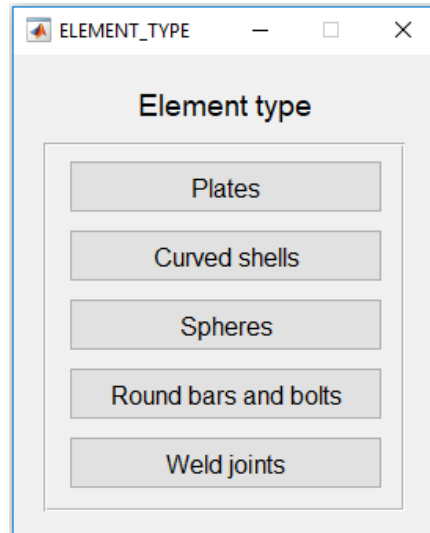


Figura A.15. Interfaz gráfica “ELEMENT_TYPE”. Paso intermedio para la selección de la geometría.

La Figura A.15 representa la interfaz gráfica “ELEMENT_TYPE”. Se trata de un menú de distribución hacia las interfaces encargadas de seleccionar el tipo de geometría. Los pulsadores “Plates”, “Curved shells”, “Spheres”, “Round bars and bolts” y “Weld joints”, le enviarán hacia a las interfaces de selección de geometría tipo placa, chapas curvas, recipientes o elementos esféricos, redondos y tornillos, y juntas soldadas, respectivamente.

A.6.2. Interfaz “PLATES”

La Figura A.16 representa la interfaz gráfica “PLATES”. Está formada por pulsadores gráficos que permiten seleccionar la geometría objeto de evaluación de forma muy intuitiva y visual. Además, bajo cada pulsador se puede observar la sección del Anexo M de la BS 7910:2013 donde se encuentra definida.

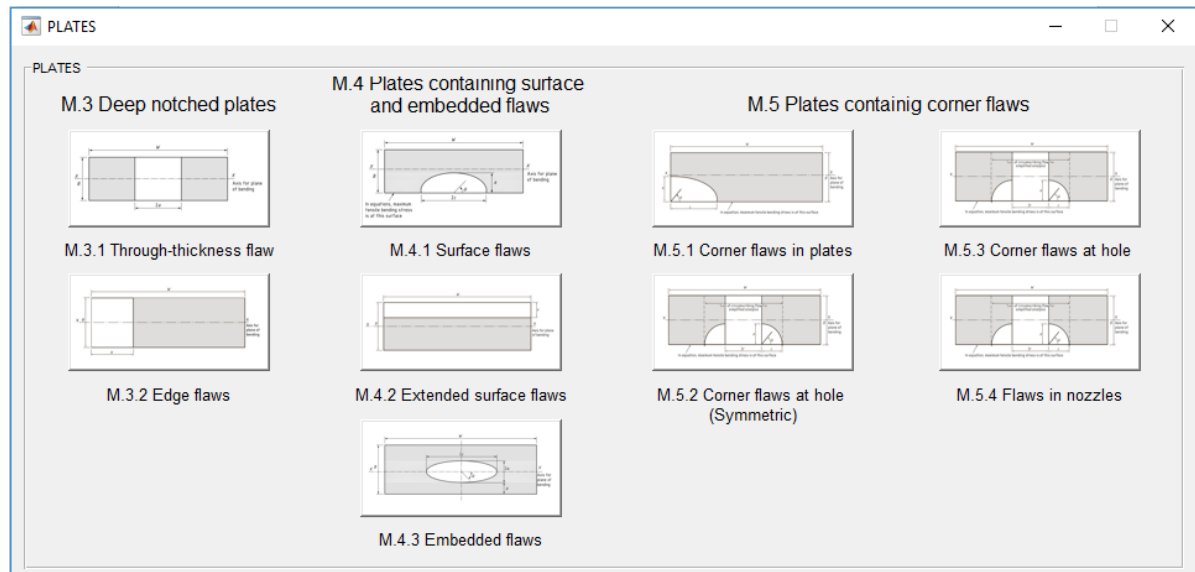
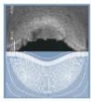
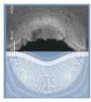


Figura A.16. Interfaz gráfica "PLATES" de selección de geometrías tipo chapa.

Se incluyen las siguientes geometrías:

- Muecas profundas (M.3):
 - Defecto pasante (M.3.1).
 - Defecto en borde (M.3.2).
- Defectos superficiales y embebidos (M.4):
 - Defecto superficial (M.4.1).
 - Defecto superficial extendido (M.4.2).
 - Defecto embebido (M.4.3).
- Defectos en esquina (M.5):
 - Defectos en esquina (M.5.1).
 - Defectos simétricos en agujero (M.5.2).
 - Defecto único en agujero (M.5.3).
 - Defectos en boquillas (M.5.4).

Al seleccionar la geometría se cerrará la interfaz directamente devolviéndole a la interfaz "GEOMETRY_SELECTOR" donde se realizarán los pasos mencionados con anterioridad.



A.6.3. Interfaz “CURVED SHELLS”

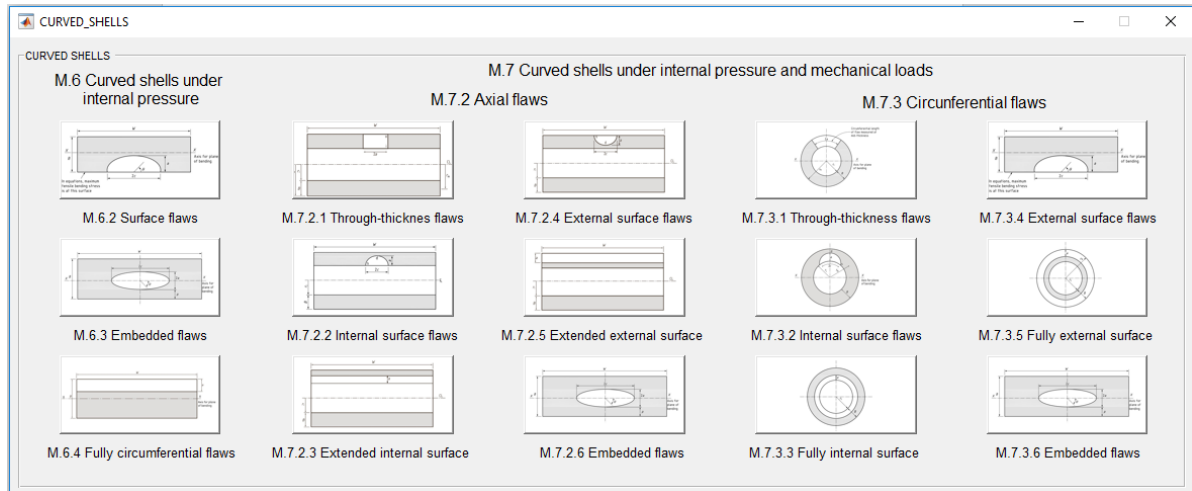
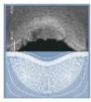


Figura A.17. Interfaz gráfica “CURVED_SHELLS” de selección de geometrías tipo chapa curvada.

La Figura A.17 representa la interfaz gráfica “CURVED_SHELLS”. Está formada por pulsadores gráficos que permiten seleccionar la geometría objeto de evaluación de forma muy intuitiva y visual. Además, bajo cada pulsador se puede observar la sección del Anexo M de la BS 7910:2013 donde se encuentra definida. Se incluyen las siguientes geometrías:

- Bajo presión interna (M.6):
 - Defectos superficiales (M.6.2).
 - Defectos embebidos (M.6.3).
 - Defectos circunferenciales extendidos (M.6.4).
- Bajo presión interna y cargas mecánicas (M.7):
 - Defectos axiales (M.7.2)
 - Defectos pasantes (M.7.2.1).
 - Defectos superficiales externos (M.7.2.2).
 - Defectos superficiales externos extendidos (M.7.2.3).
 - Defectos superficiales internos (M.7.2.4).
 - Defectos superficiales internos extendidos (M.7.2.5).
 - Defectos embebidos (M.7.2.6).
 - Defectos circunferenciales (M.7.3).
 - Defectos pasantes (M.7.3.1).
 - Defectos superficiales externos (M.7.3.2).



- Defectos superficiales externos extendidos (M.7.3.3).
- Defectos superficiales internos (M.7.3.4).
- Defectos superficiales internos extendidos (M.7.3.5).
- Defectos embebidos (M.7.3.6).

Al seleccionarla se cerrará la interfaz directamente devolviéndole a la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR” donde se realizarán los pasos mencionados con anterioridad.

A.6.4. Interfaz “SPHERES”

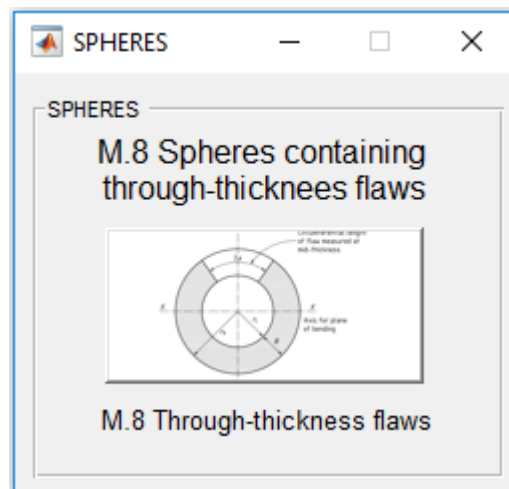
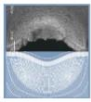


Figura A.18. Interfaz gráfica “SPHERES” para la selección de geometrías tipo esferas de pared delgada.

La Figura A.18 representa la interfaz gráfica “PLATES”. Está formada por pulsadores gráficos que permiten seleccionar la geometría objeto de evaluación de forma muy intuitiva y visual. Además, bajo cada pulsador se puede observar la sección del Anexo M de la BS 7910:2013 donde se encuentra definida. Se incluyen las siguientes geometrías:

- Defectos pasantes en elementos esféricos de pared delgada (M.8).

Al seleccionarla, se cerrará la interfaz directamente devolviéndole a la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR” donde se realizarán los pasos mencionados con anterioridad.



A.6.5. Interfaz “ROUND BARS AND BOLTS”

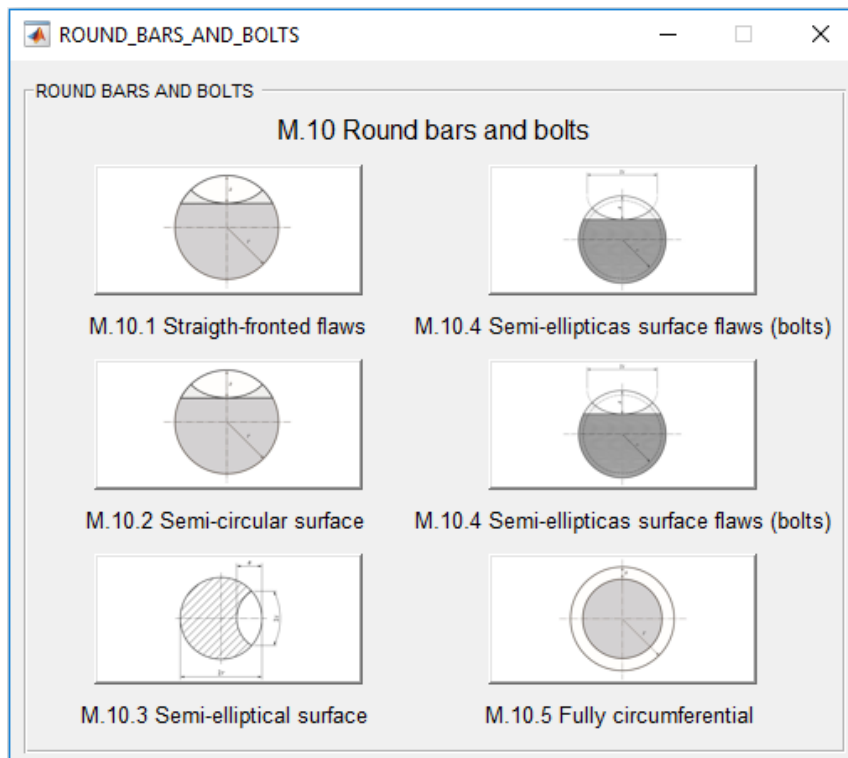
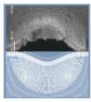


Figure A.19. Interfaz gráfica “ROUND_BARS_AND_BOLTS” para la selección de geometrías tipo redondos y tornillos.

La Figura A.19 representa la interfaz gráfica “PLATES”. Está formada por pulsadores gráficos que permiten seleccionar la geometría objeto de evaluación de forma muy intuitiva y visual. Además, bajo cada pulsador se puede observar la sección del Anexo M de la BS 7910:2013 donde se encuentra definida. Se incluyen las siguientes geometrías:

- Defectos de frente recto (M.10.1).
- Defectos semicirculares (M.10.2).
- Defectos semielípticos (M.10.3).
- Defectos semielípticos en tornillos mediante la solución 1 (M.10.4).
- Defectos semielípticos en tornillos mediante la solución 2 (M.10.4).
- Defectos circunferenciales completos (M.10.5).

Al seleccionarla, se cerrará la interfaz directamente devolviéndole a la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR” donde se realizarán los pasos mencionados con anterioridad.



A.6.6. Interfaz “WELD JOINTS”

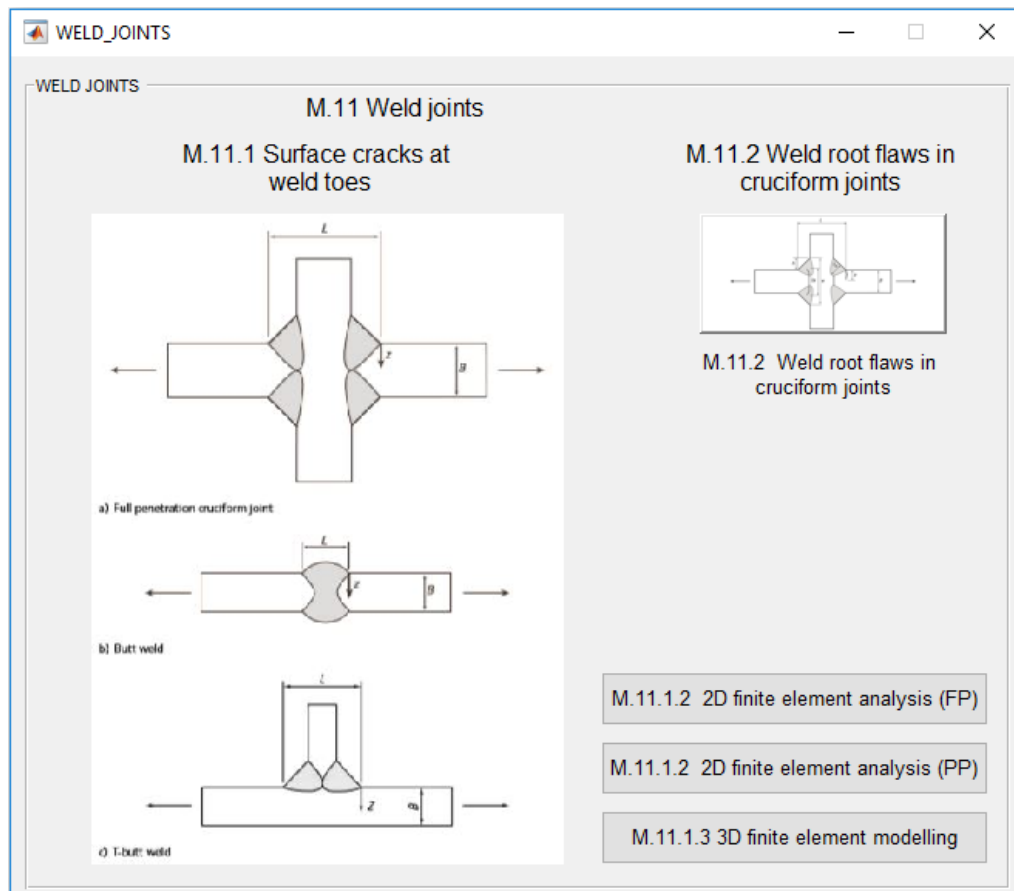
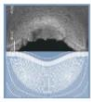


Figura A.20. Interfaz gráfica “WELD_JOINTS” para la selección de geometrías soldadas.

La Figura A.20 representa la interfaz gráfica “PLATES”. Está formada por un pulsador gráfico asociado a su propia imagen y tres pulsadores de texto asociados a la imagen de la parte izquierda de la interfaz. Cada pulsador trae asociado la referencia a la sección del Anexo M de la BS 7910:2013 donde se encuentra definida. Se incluyen las siguientes geometrías:

- Grietas superficiales en el pie del cordón soldado (M.11.1):
 - Análisis por elementos finitos 2D. Penetración completa (M.11.1.2).
 - Análisis por elementos finitos 2D. Penetración parcial (M.11.1.2).
 - Modelado 3D en elementos finitos (M.11.1.3).
- Grietas en raíz del cordón de soldadura en uniones cruciformes (M.11.2).

Al seleccionar el pulsador gráfico, se cerrará la interfaz directamente devolviéndole a la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR” donde se realizarán los pasos mencionados con anterioridad. Sin embargo, al seleccionar los tres pulsadores de la parte inferior le llevarán a



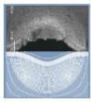
la interfaz “WELDING_DATA” (ver Figura A.21) en la que se introducen datos específicos de los conjuntos soldados no incluidos en la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR”. Tras introducirlos y pulsar el botón “Select geometry” volverá a la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR”.

Figura A.21. Interfaz gráfica “WELDING_DATA” para la introducción de los datos específicos de los conjuntos soldados.

Al activar el checkbox “Show geometry” aparecerá el esquema de la geometría en el panel de la derecha y se desbloquearán las casillas de los datos necesarios para realizar la evaluación.

A.7. Interfaz “INTENSIFICATION_FACTORS”

En la Figura A.22 se representa la interfaz gráfica “INTENSIFICATION_FACTORS” donde se introducen de forma manual los valores de los distintos coeficientes de intensificación de cargas.



Intensification factors		
Bulging correction factor	(M)	<input type="text"/>
Finite width correction factor	(fw)	<input type="text"/>
Stress intensity magnification factors	(Mm)	<input type="text"/>
- m: membrane load	(Mb)	<input type="text"/>
- b: bending load	(Mkm)	<input type="text"/>
- k: product of the ratio of K	(Mkb)	<input type="text"/>
Membrane stress concentration factor	(ktm)	<input type="text"/>
Bending stress concentration factor	(ktb)	<input type="text"/>
Stress intensity factor due to misalignment	(km)	<input type="text"/>
Flaw length or half flaw length	(a)	<input type="text"/> [mm]

* Except a, all values are taken by default if the value is not specified

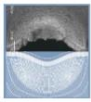
Select factors

Figura A.22. Interfaz gráfica “MANUAL” para la selección manual de los factores de intensificación.

Se pueden introducir, en su casilla correspondiente, los siguientes factores y datos:

- “**M**”: factor de corrección abultada.
- “**fw**”: factor de corrección de ancho finito.
- “**Mm**” y “**Mkm**”: factores de intensificación de la carga de membrana.
- “**Mb**” y “**Mkb**”: factores de intensificación de la carga de flexión.
- “**ktm**”: factor de concentración de la carga de membrana.
- “**ktb**”: factor de concentración de la carga de flexión.
- “**a**”: longitud o semilongitud del defecto. En milímetros [mm].

En caso de no especificar el valor de ninguno de los factores se tomará por defecto que este sea igual a uno. La longitud del tamaño de defecto es obligatoria indicarla. Su introducción desbloqueará el botón “*Select factors*” que tendrá que ser pulsado para generar los inputs y volver al menú principal.



A.8. Cálculo y resultados

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores de este manual, una vez introducidos todos los datos necesarios para ejecutar nuestra evaluación, es necesario lanzar los cálculos. Para ello debe de pulsarse el botón “PLOT”.

Los datos obtenidos aparecerán en los paneles “*Failure Analysis Diagram (FAD)*”, “*Security factor in loads*” y “*Additional data*”. Hay que tener en cuenta, que el programa tiene en cuenta que la relación a/c se mantiene siempre constante, es decir, a y c crecen proporcionalmente.

La Figura A.23 muestra un ejemplo de evaluación realizada por el programa.

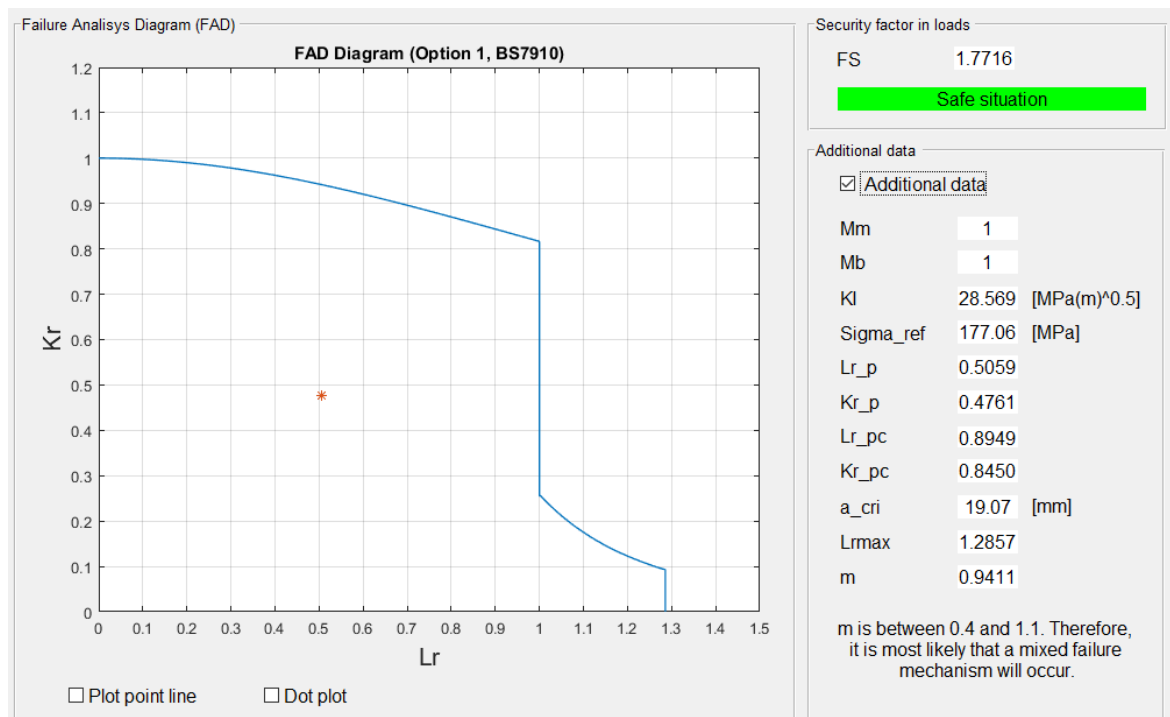


Figura A.23. Ejemplo de resultados obtenidos mediante el programa.

Los checkbox “*Plot point line*” y “*Dot plot*” se utilizan, respectivamente, para representar la recta $K_r = mL_r$ que pasa por el punto de análisis y corta a la línea de fallo, y obtener la representación de la línea de fallo mediante los puntos que la componen. Ambos modos de visualización pueden observarse en la Figura A.24.

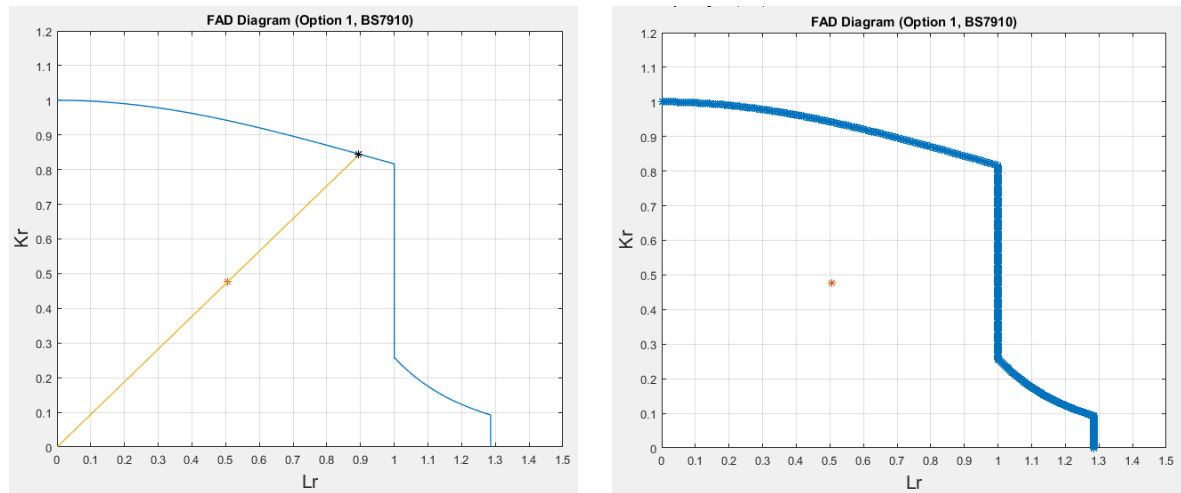
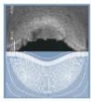
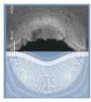


Figura A.24. Modos de visualización activados por los checkboxes "Plot point line" y "Dot plot".

¡Muchas gracias por usar nuestro programa! Esperamos que le haya ayudado a simplificar y optimizar el proceso de evaluación de la integridad estructural a fractura y que este manual le haya guiado de forma sencilla y eficaz a través de las distintas opciones que ofrece, facilitando y mejorando su uso. Esperamos poder ofrecerle mejoras y ampliaciones que le permitan seguir desarrollando de manera fluida evaluaciones de integridad estructural.



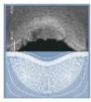
ANEXO B. MANUAL DEL PROGRAMADOR

El siguiente manual pretende ser una guía para programadores futuros sobre cómo se ha programado la primera versión de esta herramienta informática. De esta forma, un nuevo programador que busque la mejora, corrección, actualización o ampliación del programa, podrá seguir la forma de proceder y el código existente para mantener la coherencia sin que se produzcan variaciones que conlleven a un mal funcionamiento del mismo.

B.1. Distribución de carpetas

La carpeta principal que contiene al programa se denomina *“BS7910_FRACTURE”*. Esta a la vez se subdivide en las siguientes carpetas:

- **“INTERFACES”**: contiene los archivos *“*.fig”* y *“*.m”* que conforman las distintas interfaces gráficas que contiene el programa.
- **“OPCIONES”**: contiene los códigos (archivos *“*.m”*) que ejecutan los cálculos de las opciones 1 y 2 descritas en los apartados 7.3.3 y 7.3.4 de la BS 7910, respectivamente. También se incluyen los códigos de dichas opciones si se varía la condición de constraint.
- **“GEOMETRÍAS”**: contiene los códigos (archivos *“*.m”*) que se utilizan para obtener los factores de intensificación de tensiones según la geometría analizada (Anexo M de la BS 7910). En esta carpeta también se almacenan las tablas del Anexo M, en formato *“*.xlsx”*, de las que se hace uso.
- **“TENSIONES REFERENCIA”**: contiene los códigos (archivos *“*.m”*) que se utilizan para obtener las tensiones de referencia según la geometría analizada (Anexo P de la BS 7910).
- **“OTRAS FUNCIONES”**: contiene el resto de las funciones y códigos (archivos *“*.m”*) que utiliza el programa. Por ejemplo, incluye la función para el cálculo del punto de análisis, la que se usa para detectar posibles errores en la



introducción de datos, la que permite obtener el valor de la longitud crítica de grieta...

- **“IMÁGENES”**: contiene todas las imágenes y figuras que pueden visualizarse en el programa.

B.2. Principios de diseño del programa

En este apartado se describen las ideas claves y las líneas generales de diseño en las que se basa el programa.

B.2.1. Distribución general del programa

Una de las ideas claves para distribuir y estructurar el programa fue la sencillez y la claridad. Se ha pretendido realizar un programa intuitivo, de fácil visualización, en la que los resultados se puedan observar claramente. Por lo tanto, se ha decidido dividir el programa en función de las siguientes funciones: introducción de datos (en verde), procesado de los datos (en rojo), y visualización de los resultados (en azul). A todo ello se tiene acceso desde el menú principal “MENU” (ver Figura B.1).

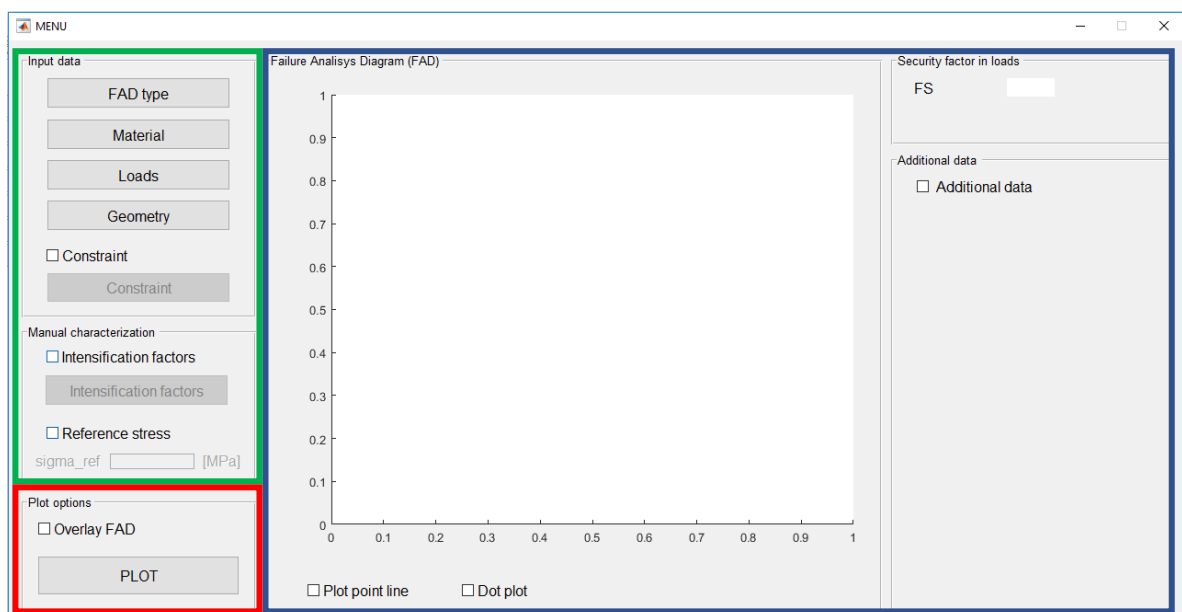
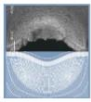


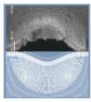
Figura B.1. Interfaz gráfica del menú principal “MENU”.



B.2.2. Líneas de diseño del programa

El programa, compuesto por distintas interfaces, está formado por los siguientes objetos:

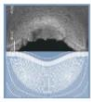
- **Paneles (*Panel*):** se utilizan como elementos estéticos, diferenciando conjuntos de objetos con finalidades distintas en una misma interfaz.
- **Paneles de selección (*Group panel*):** se utiliza en combinación con los botones de selección o los botones de activación para que únicamente seleccione una de las posibles opciones a elegir. Por ejemplo, en la interfaz de introducción de las propiedades del material ("*MATERIAL_SELECTOR*"), en el panel de selección "*Yielding*", si no se hubiera utilizado este tipo de elemento se podrían seleccionar las dos opciones a la vez, cosa que no tiene sentido. Este panel permite que, si se escoge una, la otra no se selecciona.
- **Cuadros de texto estáticos (*Static text*):** se usan para nombrar y definir objetos, exponer resultados... en resumen, añadir información que no será manipulada durante el uso del programa.
- **Cuadros de texto editables (*Edit text*):** se usan para introducir los datos de entrada.
- **Pulsadores (*Push button*):** este tipo de objetos se utilizan para las siguientes funciones:
 - Abrir la interfaz relacionada con la descripción del pulsador.
 - Confirmar que no existen errores en la introducción de los datos de la geometría.
 - Cerrar las interfaces de la introducción de datos una vez acabado dicho proceso. Al pulsar el botón se extraen los datos incorporados en los textos editables, convirtiéndolos en variables globales, y se cierra la interfaz.
 - Lanzar los cálculos en el botón "*PLOT*" de la interfaz "*MENU*".



- **Checkboxes (*Checkbox*):** se utilizan para las dos siguientes funciones:
 - Activar o desactivar algunas funciones adicionales del programa como, por ejemplo, la opción de introducción manual de los factores de intensificación o los resultados adicionales.
 - Para manipular o variar la visualización del diagrama de fallo.
- **Botones de selección (*Radio button*):** vinculados a los paneles de selección, se usan para escoger unas opciones de análisis sobre otras.
- **Botones de activación (*Toggle button*):** se usan para escoger el conjunto geometría-defecto deseado. En este caso se trata de botones gráficos donde se representa la geometría a seleccionar. También se utilizan para escoger la opción de cálculo deseada.
- **Gráficos (*Axes*):** en el gráfico de la interfaz “MENU” se representa el diagrama FAD, el punto de análisis, la recta de pendiente m que pasa por el origen y el punto de análisis, y el punto de corte. También se utiliza este objeto para visualizar el esquema de la geometría en la interfaz “GEOMETRY_SELECTOR”.

En resumen, los pulsadores nos envían a las interfaces de selección y de introducción de los datos de entrada. Dentro de estas interfaces se seleccionan las rutas de análisis y la geometría mediante botones de selección y se introducen los datos en los textos editables. Se confirma la selección mediante pulsadores que registran los datos introducidos y te devuelven al menú principal. Mediante los checkboxes se pueden desbloquear opciones de cálculo adicionales, como la variación de la condición de confinamiento o la introducción manual de los factores de intensificación o la tensión de referencia. Mediante el pulsador “PLOT” se ejecutan los cálculos y se representan las soluciones en el gráfico y en los paneles dedicados a esta función.

Esta es la línea general de actuación seguida durante la creación del programa que le otorga un manejo simple, estructurado y rápido.



B.3. Formato de los objetos

Con objeto de cuidar la estética de la aplicación, se han decidido seguir ciertas pautas, en cuanto a formato se refiere. En la Tabla B.1 se muestran las propiedades que se pueden cambiar en la paleta de cada objeto.

Propiedad	Casilla
Texto	String
Tipo de texto	FontName
Tamaño del texto	FontSize
Posición del texto	HorizontalAlignment
Longitud del objeto	width
Altura del objeto	height
Nombre del objeto	Tag
Valor del objeto	Value
Datos almacenados en el objeto	UserData

Tabla B.1. Propiedades de los objetos gráficos que se modificaran en MATLAB GUI.

El tipo de fuente siempre es “MS Sans Serif”. El tamaño de fuente variará en función del elemento y situación.

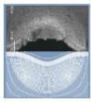
- **Paneles**

Como base para la colocación de los objetos se ha decidido colocar siempre un panel, es decir, los elementos no se colocan sobre el propio fondo de la interfaz. De esta forma se pueden agrupar objetos cuyas funciones sigan los mismos principios. El título de cada panel se coloca en la parte superior izquierda. El tamaño de la fuente es de 10 puntos. Únicamente en mayúscula la letra inicial.

El tamaño de los paneles varía en función del contenido, pero tiene que ser el suficiente para que los elementos se encuentren bien distribuidos y se interpreten fácilmente.

- **Pulsadores y botones de activación de las opciones**

El texto está centrado y será de tamaño 12 puntos. Únicamente la letra inicial en mayúsculas, salvo casos especiales como el pulsador “PLOT”.



Sus dimensiones son 40 puntos de largo y 2.6 puntos de alto.

- **Botones de activación de las geometrías**

No llevan texto, sino que su *“String”* es una imagen de la geometría seleccionada. Existe la excepción de los botones que seleccionan las geometrías representadas en los apartados M.11.1.2 y M.11.1.3 del Anexo M de la BS 7910. En este caso debido al gran tamaño del esquema, este se pone a parte, y en el *“String”* de cada elemento se coloca el título del apartado del procedimiento al que hace referencia. Tamaño 12 puntos y centrado.

Sus dimensiones son 32 puntos de largo y 6 de alto. En los casos excepcionales mencionados en el párrafo anterior, las dimensiones son las del punto superior.

- **Textos editables**

El texto incorporado estará centrado y será de tamaño 12 puntos.

Sus dimensiones son 19 puntos de largo y 1.5 puntos de alto.

- **Textos estáticos**

La mayoría de los texto estáticos del programa están alineados a la izquierda y tienen un tamaño de fuente de 12 puntos. Existen varias excepciones debido a la necesidad de optimizar espacio. Por ejemplo, los textos bajo los botones gráficos de selección de la geometría tienen un tamaño de 10 puntos y están centrados.

Las dimensiones de los cuadros varían en función de la longitud del texto.

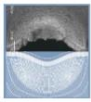
- **Checkboxes y botones de selección**

Alineados a la izquierda dejando un par de espacios por el medio y de tamaño de fuente de 12 puntos.

Las dimensiones de los cuadros varían en función de la longitud del texto.

- **Combinación de objetos**

Cuando varios objetos se agrupan en un mismo panel de forma próxima, se deja una distancia entre ellos de, como mínimo, 8 puntos. Los pulsadores que dan acceso a las



interfaces de selección de datos de entrada se encuentran separados unos 10 puntos y están alineados.

Los botones de selección de las geometrías y sus respectivos texto de descripción se encuentran separados 10 puntos y alineados por el centro.

Los textos estáticos y editables que definen una variable de entrada se encuentran horizontalmente alineados y verticalmente separados por 10 puntos.

B.4. Variables

En este apartado se describen algunas de las variables que se utilizan en la programación de la herramienta. No solo se trabajan con las variables que vienen indicadas en la norma (límite elástico, longitud de grieta...) y a partir de las cuales se pueden obtener otras variables. Para poder ejecutar el programa paso a paso y utilizar todas las funciones u opciones que este nos permite manejar, es necesario establecer una serie de variables relacionadas con el funcionamiento del programa y no con procedimiento de evaluación.

Únicamente se hará referencia a las variables denominadas *globales*. Son aquellas que *MATLAB* almacena en su memoria interna y se encuentran accesibles en todo momento. Hay que tener cuidado con su uso puesto que pueden afectar a varias partes del código al mismo tiempo.

B.4.1. Variables globales

A estas variables se les otorgado el rango de globales puesto que no solo tiene su uso en el código o en la interfaz en las que se crean. Esto puede ser debido a que intervienen en varios procesos de cálculo, a que influyen en el desarrollo del programa en otras interfaces, o que se pretende hacerlas visibles como parte del resultado finales en las partes del código dedicadas a la visualización de los resultados.

En la Tabla A.2 se incluyen las variables globales a las que hace referencia la BS 7910, tanto datos de entrada como resultados de los cálculos establecidos.



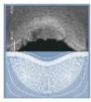
Nombre	Tipo	Descripción
Lr ; f_Lr ; Lr_max	Numérica	Vector de valores de Lr, vector de valores de f_Lr y valor límite de Lr, respectivamente.
Lrp ; Krp	Numérica	Valor de abscisas (Lrp) y ordenadas (Krp) que definen la situación del punto de análisis.
Lrc ; Krc	Numérica	Valor de abscisas (Lrc) y ordenadas (Krc) que definen el punto de corte de la recta de pendiente <i>m</i> que pasa por el origen del diagrama de fallo y el punto de análisis (Lrp y Krp), y la línea de fallo (FAL).
sigma_y ; sigma_u ; E ; Kmat ; v ; R_eL	Númerica	Propiedades del material. Son el límite elástico, la resistencia a tracción, el módulo elástico, la tenacidad a la fractura, el coeficiente de Poisson y el límite elástico inferior, respectivamente.
a ; c ; B ; W ; theta ; p ; r ; rm ; ri ; ro ; L ; z ; h ; w ; tw	Numérica	Dimensiones de los distintos conjuntos geométría-grieta que se detallan en el Anexo M de la BS 7910 (ver desde Figura M.1 a Figura M.26).
sigma_ref	Numérica	Tensión de referencia (Anexo P de la BS 910).
Mm ; Mb	Numérica	Factores de intensificación de la carga de membrana y flexión, respectivamente.
Mmma ; Mbma ; Mma ; fwma ; ktmma ; ktbma ; kmma ; Mkmma ; Mkbma	Numérica	Factores de intensificación de tensiones introducidos manualmente.
Pm ; Pb ; Qm ; Qb	Numérica	Tensiones primarias de membrana y flexión, y tensiones secundarias de membrana y flexión, respectivamente.
KI	Numérica	Factor de intensidad de tensiones.
beta ; alpha ; kappa	Numérica	Coefficiente de confinamiento y parámetros del material α y κ obtenidos desde la Tabla N.12 a la Tabla N.43 del Anexo N de la BS 7910.

Tabla A.2. Listado, tipo y definición de las variables globales relacionadas directamente con la BS 7910.

En la Tabla B.3 se incluyen las variables que son necesarias incorporar para el correcto desarrollo del programa, a pesar de que no vengan especificadas en el procedimiento.



Nombre	Tipo	Descripción
option	Numérica	Valor igual a 1 si se selecciona la Opción 1, y 2 si se selecciona la Opción 2.
curva_ver	Numérica (vector de valores)	Valores de la curva de tensión-deformación verdadera.
yielding	Booleana	Toma el valor 0 si el material tiene escalón de cedencia, y el valor 1 si no lo tiene.
subdivisions	Numérica	Indica el número de puntos que conforman la línea de fallo del FAD. Es decir, la densidad de los puntos que conforman la FAL.
position	Booleana	Toma el valor 0 si se calcula en el interior o en fondo de grieta, y 1 si se hace en la superficie o exterior.
restraint	Booleana	Toma el valor 0 si el nivel de confinamiento es normal, y 1 si es pequeño.
fs_max	Numérica	Límite superior del intervalo de valores del factor de seguridad para el cálculo de la longitud de grieta crítica.
fs_min	Numérica	Límite inferior del intervalo de valores del factor de seguridad para el cálculo de la longitud de grieta crítica.
value	Numérico	<p>A cada geometría le corresponde un valor determinado de <i>value</i>. Toma el valor asociado a la geometría seleccionada. A partir de este el programa realiza, para la geometría seleccionada, las siguientes operaciones:</p> <ul style="list-style-type: none">• Cálculo de los factores de intensificación de tensiones.<ul style="list-style-type: none">• Cálculo de la tensión de referencia.• Desbloqueo de las casillas de introducción de datos geométricos necesarios para el análisis.• Selección de las condiciones geométricas que se han de cumplir para el análisis, y en caso de no cumplirlas, emitir el mensaje de error.
manualfactor	Booleana	Toma el valor 0 si no se ha activado el <i>checkbox</i> “ <i>Intensification factors</i> ”, y 1 si sí es activado. En el código permite escoger aquellas rutas donde los



		factores de intensificación de tensiones y la tensión de referencia son introducidos manualmente.
constraint	Booleana	Toma el valor 0 si no se ha activado el <i>checkbox</i> "Constraint", y 1 si sí es activado. En el código permite elegir aquellas rutas donde las condición de confinamiento en el punto de la grieta varía respecto a la obtenida en un ensayo normalizado.
m	Numérica	Pendiente de la recta que pasa por el origen del diagrama de fallo y el punto de análisis (Lrp, Krp).

Tabla B.3. Listado, tipo y definición de las variables globales no relacionadas directamente con la BS 7910.

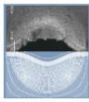
B.5. Ejemplos de estructuras de código complejas

En este apartado se desarrollan de forma más detallada algunas de las estructuras de código más complejas del programa, permitiendo una mejor comprensión del proceso de programación realizado.

B.5.1. Código de interpolación de la Tabla M.2 del Anexo M (Parte principal del código).

En la Figura B.2 se representa la parte principal de uno de los códigos de interpolación de las tablas que forman parte del Anexo M de la BS 7910. La dificultad presentada por este tipo de código fue crear un proceso de barrido celda a celda de la tabla de estudio (en este caso la Tabla M.2), permitiendo detectar, según las condiciones geométricas que tengamos, los valores entre los que se tiene que interpolar.

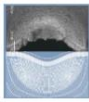
Uno de los aspectos más importantes en este código son las variables i , h y j . La dos primeras delimitarán entre que valores tabulados se encontrará el valor a/c que tengamos. Para ello se utiliza el contador n que aumenta con cada paso del bucle *for*. Si en un primer barrido el valor de a/c no se encuentra entre $i(n)$ y $h(n+1)$, para n igual a 1, n aumentará una unidad y se volverá a realizar el mismo proceso para n igual a 2. Este se repetirá hasta que el valor de a/c que tengamos se encuentre en uno de los rangos, actuando de esta forma el



comando *break* que rompe el ciclo *for*. *j* realiza la misma función, pero para los valores B/ri que tengamos.

Tras obtener los valores entre los que interpolar, se utilizara la función interna de *Matlab*, *interp1*. Esta función realiza una interpolación lineal entre los valores indicados en su formulación. El proceso se encuentra mejor explicado en el propio código (partes en verde).

```
39 - aB = xlsread('M.7_TABLAS.xlsx','Hojal','A3:A7'); % Vector con los valores de a/B definidos en la Tabla M.2.
40 - % Ms coge los valores de la Tabla M.2, tabulados en la Hojal del documento
41 - % Excel M.7_TABLAS.xlsx.
42 - Ms = xlsread('M.7_TABLAS.xlsx','Hojal');
43 - % Se eliminan las filas que no queremos. En este caso son aquellas
44 - % referentes a los títulos marcados para los distintos valores de a/c.
45 - Ms([6 12 18 24],:) = [];
46 - % Se eliminan las columnas que no queremos. En este caso son aquellas
47 - % referentes a los valores de a/B ya definidos en el vector aB.
48 - Ms(:,[1 6]) = [];
49 - n = 1;
50 -
51 - % Con la variación de n se cogerá cada uno de los valores de i.
52 - % En este caso se ha excluido el valor de 0.05, puesto que este es el valor
53 - % límite.
54 -
55 - for i = [1 0.4 0.2 0.1]
56 -     h = [1 0.4 0.2 0.1 0.05];
57 -     % Delimitará entre el valor de i(n) y el valor de h(n+1). Es decir, cogerá
58 -     % el rango de columnas en el que se cumpla la condición impuesta.
59 -     if a/c <= i && a/c > h(1,n+1)
60 -         % j está formado por los dos valores de B/ri de referencia de la
61 -         % Tabla M.2 (0.1 y 0.25). Como necesitaremos las columnas correspondientes
62 -         % a ambos valores, el bucle for hace que se analicemos ambas.
63 -         for j = [0.1 0.25]
64 -             % El vector filas marca la fila de inicio para cada valor de
65 -             % a/c dentro de la matriz Ms. Así seleccionaremos sólo las
66 -             % partes de Ms que se encuentre dentro del rango de a/c real que
67 -             % tengamos.
68 -             filas = [1 6 11 16 21];
69 -             % Para la superficie.
70 -             if position == 1
71 -                 if j == 0.1
72 -                     % Interpolación lineal vertical de los valores de Mm y Mb para
73 -                     % la parte de B/ri=0.1 y para los distintos valores entre
74 -                     % los que se encuentra nuestra a/c, en función de a/B.
75 -                     % - a/B(Tabla) <= a/B(Real)
76 -                     Mm01 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],3),a/B,'linear');
77 -                     Mb01 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],4),a/B,'linear');
78 -                     % - a/B(Tabla) >= a/B(Real)
79 -                     Mm0lnext = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],3),a/B,'linear');
80 -                     Mb0lnext = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],4),a/B,'linear');
81 -                     % Interpolación lineal vertical entre los resultados de
82 -                     % la anterior interpolación. Con esto conseguimos el
83 -                     % valor de Mm y Mb para B/ri=0.1.
84 -                     Mm1 = interp1([i h(1,n+1)], [Mm01 Mm0lnext],a/c,'linear');
85 -                     Mb1 = interp1([i h(1,n+1)], [Mb01 Mb0lnext],a/c,'linear');
86 -                 elseif j == 0.25
87 -                     % Interpolación lineal vertical de los valores de Mm y Mb para
88 -                     % la parte de B/ri=0.25 y para los distintos valores entre
89 -                     % los que se encuentra nuestra a/c, en función de a/B.
90 -                     % - a/B(Tabla) <= a/B(Real)
```



```
91 - Mm02 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],7),a/B,'linear');
92 - Mb02 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],8),a/B,'linear');
93 - % - a/B(Tabla) >= a/B(Real)
94 - Mm02next = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],7),a/B,'linear');
95 - Mb02next = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],8),a/B,'linear');
96 - % Interpolación lineal vertical entre los resultados de
97 - % la anterior interpolación. Con esto conseguimos el
98 - % valor de Mm y Mb para B/ri=0.25.
99 - Mm2 = interp1([i h(1,n+1)], [Mm02 Mm02next],a/c,'linear');
100 - Mb2 = interp1([i h(1,n+1)], [Mb02 Mb02next],a/c,'linear');
101 - end
102 - % Para el fondo.
103 - % Mismo procedimiento que el realizado para posicion=1.
104 - elseif position == 0
105 -     if j == 0.1
106 -         Mm01 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],1),a/B,'linear');
107 -         Mb01 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],2),a/B,'linear');
108 -         Mm01next = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],1),a/B,'linear');
109 -         Mb01next = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],2),a/B,'linear');
110 -         Mm1 = interp1([i h(1,n+1)], [Mm01 Mm01next],a/c,'linear');
111 -         Mb1 = interp1([i h(1,n+1)], [Mb01 Mb01next],a/c,'linear');
112 -     elseif j == 0.25
113 -         Mm02 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],5),a/B,'linear');
114 -         Mb02 = interp1(aB,Ms([filas(1,n):filas(1,n)+4],6),a/B,'linear');
115 -         Mm02next = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],5),a/B,'linear');
116 -         Mb02next = interp1(aB,Ms([filas(1,n+1):filas(1,n+1)+4],6),a/B,'linear');
117 -         Mm2 = interp1([i h(1,n+1)], [Mm02 Mm02next],a/c,'linear');
118 -     end
119 - end
120 - end
121 - end
122 - % Interpolación lineal horizontal para los valores de Mm y Mb
123 - % obtenidos para los diferentes valores de B/ri (0.1 y 0.25).
124 - % Estos ya son los valores finales de Mm y Mb.
125 - Mm = interp1([0.1 0.2], [Mm1 Mm2],B/ri,'linear');
126 - Mb = interp1([0.1 0.2], [Mb1 Mb2],B/ri,'linear');
127 - end
128 - % n tiene que ir creciendo para que compruebe todos los valores de i
129 - % y haga un barrido por toda la tabla.
130 - n = n+1;
131 - end
```

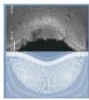
Figura B.2. Parte del código de interpolación de la Tabla M.2 del Anexo M de la BS7910.

B.5.2. Código de ejecución de la Opción 1 de la BS 7910

En la Figura B.3 se muestra la parte del código de la función “BS7910_Option1” que se utiliza en el código de ejecución de los cálculos para obtener los vectores que L_r , $f_{-}L_r$ y $L_{r,max}$ que configuran la línea de fallo. En este caso, por resumir, únicamente se incorporará la parte del código dedicada a los materiales con escalón de cedencia.

En primer lugar, es necesario definir el vector de valores de L_r . Según el valor que le hayamos dado a la variable *subdivisiones* tendremos una mayor o menor cantidad de puntos que definen la línea de fallo. Hay que diferenciar entre distintos rangos de valores de L_r puesto que no se utiliza la misma ecuación siempre. Si se realizase un cálculo estándar, únicamente tendríamos un punto en el que L_r sería igual a 1. Esto no es óptimo por los siguientes motivos:

- El escalón del diagrama no sería vertical puesto que únicamente uno de los dos puntos extremos que definen la recta tendría un valor de L_r igual a 1.

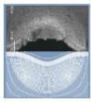


- Si damos valores continuos al vector L_r , por ejemplo, desde 0 hasta 1.5, el escalón del diagrama (que tiene gran influencia, gran dimensión) estaría definido únicamente por los dos puntos extremos. Debido a la no existencia de puntos intermedios que definan dicha recta vertical, y al método de cálculo del punto de corte de la recta de pendiente m que pasa por el origen del diagrama y el punto de análisis, con la línea de fallo, no podríamos obtener dicho punto de corte y, por lo tanto, no se podría calcular el factor de seguridad y el tamaño de grieta crítico.

Parte del vector L_r está compuesto por un vector de unos con una tamaño igual al valor de *subdivisiones*. Así se garantiza que la recta vertical este compuesta por varios puntos. A cada uno de estos puntos le corresponde un valor de f_{L_r} distinto. Para ello se define la variable *salto* que divide la longitud del escalón en porciones proporcionales al número de subdivisiones empleado. Así, para cada valor de L_r igual a 1 que va pasando debido al bucle *for*, se le va restando la variable *salto* al valor de f_{L_r} del punto anterior. Como el valor de la variable *salto* se debe de mantener constante, usamos un contador n que evita que se modifique.

```
68 - Lr = [0:0.9999/subdivisiones:0.9999 ones(1,subdivisiones) 1:0.5/subdivisiones:Lrmax Lrmax]'; % Valores del vector Lr.
...
79 - f_Lr = []; % Iniciación del vector f(Lr).
...
106 - n = 1;
107 -
108 - for i = 1:length(Lr)
109 -     if Lr(i) < 1
110 -         valor_Lr = (1+0.5*Lr(i)^2)^-0.5; % (eq 29)
111 -         if Lr(i) == 0.9999 % esto es para el truco posterior (línea vertical).
112 -             posicion = i;
113 -         end
114 -     elseif Lr(i) == 1
115 -         if n == 1
116 -             primervalor = f_Lr(i-1);
117 -             salto = (primervalor-f_1)/subdivisiones;
118 -         end
119 -         valor_Lr = f_Lr(i-1)-salto;
120 -         n = n+1;
121 -     else
122 -         valor_Lr = f_1*Lr(i)^((N-1)/(2*N)); % (eq 31)
123 -     end
124 -     f_Lr = [f_Lr;valor_Lr];
125 - end
126 -
127 - Lr(posicion) = 1; % Truco para que quede línea vertical en 1.
128 -
129 - end
130 -
131 - % Añadimos la línea vertical que cierra el diagrama:
132 - f_Lr = [f_Lr;(f_Lr(i):-f_Lr(i)/subdivisiones:0)'];
133 -
134 - % Ajustamos para que haya una línea vertical en 1
135 - Lr = [Lr;(ones(subdivisiones+1,1)*Lrmax)];
```

Figura B.3. Parte del código que ejecuta el cálculo de los puntos que generan la línea de fallo.



Finalmente se añade la línea vertical que cierra el diagrama (valor de L_r igual a $L_{r,max}$).

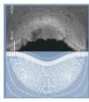
B.5.3. Código de procesado asociado al pulsador "PLOT".

En la Figura B.4 se muestra parte del código que se ejecuta al pulsar el botón "PLOT" de la interfaz "MENU". Extrae parte de los datos de entrada, selecciona el sistema de ecuaciones a utilizar en función de la opción de cálculo seleccionada, la geometría y la condición de confinamiento si es que varía. También tiene en cuenta si la entrada de los factores de intensificación de tensiones y la tensión de referencia se introducen de forma manual o de forma automática mediante la selección de la geometría. Representa el FAD y genera los resultados.

La variable *value*, obtenida en la interfaces correspondientes a la selección de la geometría, adquiere un valor determinado para cada conjunto geometría-defecto. A partir de ese valor, el código selecciona de forma automática las ecuaciones que permiten el cálculo de los factores de intensificación de tensiones y la tensión de referencia.

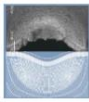
En el caso de no haber seleccionado ninguna geometría debido a que no aparece en el procedimiento, habría que seleccionar la ruta de introducción manual de los datos. Este código identifica si se ha seguido dicha ruta y emplea las ecuaciones pertinentes.

Se puede observar en la Figura B.4 con más detalle lo incluido en esta parte del código y un breve explicación de cada línea generada (partes en verde).



Programación de una herramienta para el análisis de la integridad estructural para el sector eólico onshore

```
395 % Selección de la opción de cálculo utilizada.
396 if option == 1 % Opción 1.
397     if constraint == 0
398         [Lr, f_Lr, Lrmax] = BS7910_Option1(sigma_y, sigma_u, E, R_eL, yielding, temperature, subdivisions);
399     elseif constraint == 1 % Se ejecuta si se selecciona la opción constraint.
400         [Lr, f_Lr, Lrmax] = BS7910_Option1_constraint(sigma_y, sigma_u, E, R_eL, yielding, temperature, beta, alpha, kappa, subdivisions);
401     end
402 elseif option == 2 % Opción 2.
403     if constraint == 0
404         [Lr, f_Lr, Lrmax] = BS7910_Option2(sigma_y, sigma_u, E, curva_ver, temperature, subdivisions);
405     elseif constraint == 1 % Se ejecuta si se selecciona la opción constraint.
406         [Lr, f_Lr, Lrmax] = BS7910_Option2_constraint(sigma_y, sigma_u, E, curva_ver, temperature, beta, alpha, kappa, subdivisions);
407     end
408 end
409
410 % Toma de los valores de los checkboxes de selección manual (factores de
411 % intensificación y tensión de referencia).
412 manualfactor = handles.manualfactor;
413 manualsigma = get(handles.manualsigma, 'Value');
414
415 % Selección de las ecuaciones de cálculo de los factores de intensificación
416 % de tensiones y tensión de referencia en función de la geometría
417 % seleccionada.
418 if manualfactor == 0 % Si se ha escogido geometría. No introducción manual.
419     if value < 32 % NO soldaduras. Incluye cálculo de tensión de referencia.
420         if value == 1
421             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M31(a, W);
422             [sigma_ref] = P51(Fm, Pb, a, W);
423         elseif value == 2
424             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M32(a, W);
425             [sigma_ref] = P52(Fm, Pb, a, W);
426
427         ...
428
429         elseif value == 31
430             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M105(a, r);
431             [sigma_ref] = P132(Fm, Pb, a, r);
432         end
433     elseif value >= 32 && value <= 35 % Con soldaduras. No incluye el cálculo de la tensión de referencia.
434         if value == 32
435             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M112FP(z, L, B);
436         elseif value == 33
437             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M112PP(z, L, B, tw);
438         elseif value == 34
439             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M113(a, c, L, B, position);
440         elseif value == 35
441             [M, fw, ktm, Mkm, Mm, ktb, Mkb, Mb, km] = M112(a, h, B, w);
442         end
443     end
444
445     % Si se requiere la introducción manual de la tensión de referencia.
446     if manualsigma == 1
447         sigma_ref = str2double(get(handles.sigmaref, 'String'));
448     end
449
450     % Función para el cálculo del punto de análisis si los factores no han
451     % sido introducido manualmente.
452     [Lrp, Krp, KI] = PUNTO(M, fw, ktm, Mkm, Mm, Fm, ktb, Mkb, Mb, Pb, km, Qm, Qb, a, sigma_ref, sigma_y, Kmat);
453
454 elseif manualfactor == 1 % Si no se ha escogido geometría. Introducción manual de los factores de intensificación.
455     if manualsigma == 1 % Introducción manual de la tensión de referencia.
456         sigma_ref = str2double(get(handles.sigmaref, 'String')); % Extracción del valor de la tensión de referencia.
457     end
458 end
```



```
540
541     % Función para el cálculo del punto de análisis si los factores han
542     % sido introducido manualmente.
543     [Lrp,Krp] =PUNTO_manual(Mma,fwma,ktmma,Mkmma,Mmma,Pm,ktbma,Mkbma,Mbma,Pb,kmma,Qm,Qb,a,sigma_ref,sigma_y,Kmat);
544
545 end
546
547 % Extracción del valor del checkbox Overlay FAD.
548 overlayfad = get(handles.overlayfad,'Value');
549
550 % Si el checkbox Overlay FAD no esta seleccionado, las gráficas no se
551 % superponen.
552 if overlayfad == 0
553     hold off
554 end
555
556 % Graficar figura.
557 plot(handles.fadaxes,Lr,f_Lr,'LineWidth',1);
558
559 % Crear titulo.
560 if option == 1     % Opción 1.
561     title('FAD Diagram (Option 1, BS7910)');
562 elseif option == 2     % Opción 2.
563     title('FAD Diagram (Option 2, BS7910)');
564 end
565
566 % Rotulación del ejes x.
567 xlabel('Lr','FontSize',16);
568
569 % Rotulación del eje y.
570 ylabel('Kr','FontSize',16);
571
572 % Limitación de los ejes.
573 if constraint == 0
574     ylim([0 1.2]);
575 elseif constraint == 1
576     ylim([0 1.5]);
577 end
578
579 xlim([0 round(Lrmax+0.2,1)]);
580 box('on');
581
582 % Establecer las propiedades de los ejes restantes.
583 set(handles.fadaxes,'XGrid','on','XTick',...
584     0:0.1:round(Lrmax+0.2,1),'YGrid','on',...
585     'YTick',[0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5]);
586
587 % Representar y superponer el punto de análisis.
588 hold on
589 plot(handles.fadaxes,Lrp,Krp,'*');
590
591 % Función para la obtención del punto de corte y el factor de seguridad.
592 [FS,Lrc,Krc,m] = FSC(Lr,f_Lr,Lrmax,Lrp,Krp);
593
594 set(handles.fsdata,'String',FS);
595
596 % Seleccionar la condición de seguridad en función del FS.
597 if FS >= 1.2
598     set(handles.txtsecurityfactor,'String','Safe situation');
599     set(handles.txtsecurityfactor,'BackgroundColor',[0 1 0]);
600 elseif FS < 1.2 && FS >= 1.
601     set(handles.txtsecurityfactor,'String','Safe but dangerous situation');
602     set(handles.txtsecurityfactor,'BackgroundColor',[1 1 0]);
603 else
604     set(handles.txtsecurityfactor,'String','Unsafe situation');
605     set(handles.txtsecurityfactor,'BackgroundColor',[1 0 0]);
606 end
607
608 % Tomamos como la grieta inicial el valor de a introducido.
609 ao = a;
610
611 % Cálculo del tamaño de grieta crítico.
612 if manualfactor == 0     % Selección de geometría. No introducción manual.
613     sigma_refma = sigma_ref;
614     [a_cri] = a_limit(ao,c,B,W,theta,D,E,xi,ro,rm,position,h,L,Pm,Pb,Qm,Qb,...
615         sigma_y,v,sigma_refma,Kmat,Lr,f_Lr,Lrmax,value,manualsigma,restraint,fs_max,fs_min);
616 elseif manualfactor == 1     % Introducción maual de los factores. No selección de geometría.
617     [a_cri] = a_limit_manual(ao,Mma,fwma,ktmma,Mkmma,Mmma,ktbma,Mkbma,...
618         Mbma,kmma,Pm,Pb,Qm,Qb,sigma_y,sigma_ref,Kmat,Lr,f_Lr,Lrmax,fs_max,fs_min);
619 end
620
621 set(handles.ac,'String',a_cri);
```

Figura B.4. Parte de la función del pulsador “PLOT” que se encuentra dentro del código de la interfaz “MENU”.