UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de ingeniería Mecánica

EJE FERROVIARIO “WHEELSET”: METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES USANDO ABAQUS I

Autor: Alejandro Pérez Rosco
Tutores: Juan Carlos García Prada
Zoser Kalengayi Tshilumbu

A Nerea, gracias por tu paciencia.

Resumen

Este trabajo fin de grado tiene como objetivo el estudio de un eje ferroviario completo (Wheelset) perteneciente a un tren de mercancías. Se pretende calcular el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en un eje con una fisura de frente recto a lo largo de un giro completo para nueve tamaños de grieta diferentes. Debido a la tipología del problema, la grieta se abre por tracción, siguiendo el Modo I de deformación, por lo que se va a estudiar el Factor de Intensidad de Tensiones para el Modo I, K_I.

Estos cálculos se han realizado con el código comercial del Método de Elementos Finitos (MEF), y más concretamente con el Método de Elementos Finitos Extendido (XFEM), utilizando el programa Abaqus, que permite calcular el FIT de una manera rápida y precisa.

Este estudio es el primer paso de una serie de estudios que se desean realizar en el departamento de Ingeniería Mecánica sobre el comportamiento de ejes ferroviarios. Por lo cual, este trabajo pretende ofrecer una base teórica sobre la Mecánica de la fractura, una guía para el modelado de ejes en Abaqus y la implementación de grietas en el modelo mediante el método XFEM; y obtener valores del FIT que sirvan de referencia para posteriores estudios.

Palabras clave: Eje completo, Eje fisurado, Wheelset, Método de Elementos Finitos, XFEM, Factor de Intensidad de Tensiones.

Índice General

Capítulo 1. Introducción ____ *11*

1.1 Objetivos ____ **12**

1.2 Estructura del Documento ____ **12**

Capítulo 2. Mecánica de la Fractura ____ *14*

2.1 Introducción ____ **15**

2.1.1 La rotura frágil ____ 15
2.1.2 Rotura dúctil ____ 15
2.1.3 Antecedentes históricos ____ 16
2.1.4 Accidentes Actuales ____ 17
2.1.5 Accidentes en el sector ferroviario ____ 18

2.2 Mecánica de la Fractura Elástica-Lineal (MFEL) ____ **20**

2.2.1 Modos de fractura ____ 20
2.2.2 Factor de Intensidad de Tensiones ____ 21

Capítulo 3. Método de Elementos Finitos (MEF) ____ *26*

3.1 Conceptos teóricos ____ **27**

3.2 Tipos de elementos en Abaqus ____ **28**

3.2.1 Características de los elementos ____ 28
3.2.2 Nomenclatura ____ 30

3.3 Método De Elementos Finitos Extendido (XFEM) ____ **31**

Capítulo 4. Abaqus 6.10-1 ____ *33*

4.1 Introducción ____ **34**

4.2 Aplicaciones ____ **34**

4.2.1 Abaqus/Standard ____ 34
4.2.2 Abaqus /Explicit ____ 35
4.2.3 Abaqus/CFD ____ 35
4.2.4 Abaqus /CAE ____ 35

4.3 Entorno de Abaqus ____ **35**

5.1 Descripción del problema ____ **55**

5.1.1 Geometría del eje ____ 55
5.1.2 Definición del material ____ 56
5.1.3 Restricciones y cargas ____ 56

5.2 Modelización del Eje ferroviario simplificado con Abaqus ____ **57**

5.2.1 Geometría del eje ____ 57
5.2.2 Creación del material ____ 59
5.2.3 Ensamblaje del eje ____ 61
5.2.4 Definición del paso ____ 61
5.2.5 Definición de los parámetros de salida ____ 62
5.2.6 Definición de las condiciones de contorno ____ 62
5.2.7 Mallado del conjunto ____ 64
5.2.8 Definición del trabajo ____ 66

5.2.9 Resultados 66
5.3 Análisis de convergencia de la malla 66
Capítulo 6. Estudio del eje ferroviario con fisura 68
6.1 Introducción 69
6.2 Conceptos básicos del modelado de grietas en Abaqus con XFEM 69
6.3 Descripción del problema 71
6.3.1 Geometría del eje y creación y asignación del material 72
6.3.2 Creación de la grieta 72
6.3.3 Creación de particiones 74
6.3.4 Ensamblaje de entre eje y grieta. 75
6.3.5 Definición de la grieta 78
6.3.6 Definición del paso 80
6.3.7 Definición de los parámetros de salida 81
6.3.8 Definición de las condiciones de contorno. 83
6.3.9 Mallado del conjunto. 83
6.3.10 Creación del trabajo. 84
6.4 Variaciones de la grieta 85
6.4.1 Variación de tamaño 85
6.4.2 Variación de posición 85
6.5 Obtención resultados 85
Capítulo 7. Resultados 91
7.1 FIT en función del frente de la grieta 92
7.1.1 Posición de 0° 92
7.1.2 Posición de 30° 95
7.1.3 Posición de 60° 99
7.1.4 Posición de 90° 102
7.1.5 Posición de 120° 105
7.1.6 Posición de 150° 108
7.1.7 Posición de 180° 111
7.2 FIT en función del ángulo de la grieta 115
7.2.1 Tamaño de grieta 1 115
7.2.2 Tamaño de grieta 2 116
7.2.3 Tamaño de grieta 3 116
7.2.4 Tamaño de grieta 4 116
7.2.5 Tamaño de grieta 5 117
7.2.6 Tamaño de grieta 6 117
7.2.7 Tamaño de grieta 7 118
7.2.8 Tamaño de grieta 8 118
7.2.9 Tamaño de grieta 9 119
Capítulo 8. Conclusión y trabajos futuros 120
8.1 Conclusión 121
8.2 Estudios Futuros 121
Capítulo 9. Presupuesto General 123

9.1 Presupuesto general detallado _____ 124

Capítulo 10. Bibliografía _____ 125

Anexo.Plano del eje ferroviario _____ 125

Índice de Figuras

Figura 1 Rotura frágil sin deformación 15
Figura 2 Fractura muy dúctil (a) y fractura moderadamente dúctil (b). 16
Figura 3 Fractura del casco de un buque Liberty. 17
Figura 4 Fractura del ala de un avión. 17
Figura 5 Descarrilamiento en Ontario, Canadá. 18
Figura 6 Accidente de tren de Versalles. 19
Figura 7 Uno de los vagones tras la explosión del tren en Viareggio. 19
Figura 8 Eje fracturado del tren accidentado en Viareggio. 20
Figura 9 Modos de fractura 21
Figura 10 Sistema de coordenadas y tensor de tensiones en el frente de la grieta. 23
Figura 11 Distribución de la tensión σy en el frente de la fisura 25
Figura 12 Proceso de Discretización. 27
Figura 13 Familias de elementos. 29
Figura 14 (a) Elementos lineales; (b) Elementos cuadráticos. 29
Figura 15 Ejemplo de nomenclatura 30
Figura 16 Nodos enriquecidos en XFEM 32
Figura 17 Relación de Abaqus con las etapas MEF 34
Figura 18 Interfaz de trabajo de Abaqus 36
Figura 19 Creación de una parte. 38
Figura 20 Entorno de dibujo. 38
Figura 21 Creación de materiales. 39
Figura 22 Creación de conjuntos. 40
Figura 23 Creación de Step. 41
Figura 24 Creación de interacciones. 42
Figura 25 Propiedades de la interacción. 43
Figura 26 Propiedades del contacto. 44
Figura 27 Creación de cargas (izquierda) y asignación de magnitudes (derecha). 45
Figura 28 Creación de condiciones de contorno. 46
Figura 29 Opciones de condiciones de contorno del tipo "Symmetry/Anstisymmetry/Encastre" (izquierda) y del tipo "Displacement/Rotation" (derecha) 47
Figura 30 Menú "Mesh Control" 48
Figura 31 Menú "Element Type" 49
Figura 32 Menú "Global Seeds" 50
Figura 33 Creación de un trabajo (Job). 51
Figura 34 Menú "Job Manager" 52
Figura 35 Eje ferroviario sometido a estudio 55
Figura 36 Modelo del Eje Ferroviario creado en Creo Parametric. 55
Figura 37 Detalle de los taladros y los chaflanes 56
Figura 38 Boceto del eje ferroviario. 57
Figura 39 Introducción del ángulo de creación. 58
Figura 40 Eje Ferroviario simplificado 58
Figura 41 Creación de material. 59
Figura 42 Crear sección. 60

Figura 43 Asignar sección. 60
Figura 44 Creación de Step. 61
Figura 45 Creación de fuerza externa. 62
Figura 46 Creación de restricción de simetría 63
Figura 47 Creación de restricción de encastre. 64
Figura 48 Menú Assign Mesh Control 65
Figura 49 Menú Global Seeds 66
Figura 50 Level set method 69
Figura 51 Dominio del contorno. 70
Figura 52 Posición longitudinal de la grieta. 71
Figura 53 Creación de la parte "Grieta". 73
Figura 54 Dibujo de la grieta. 74
Figura 55 Partición para la posición longitudinal de la grieta. 74
Figura 56 Eje Ferroviario con particiones angulares. 75
Figura 57 Crear instancias. 76
Figura 58 Instancias eje y grieta unidas. 77
Figura 59 Modificación de la pieza "Grieta". 78
Figura 60. Creación de grieta. 79
Figura 61 Definición de la grieta. 79
Figura 62 Creación de Step. 80
Figura 63 Creación de History Output para la grieta 82
Figura 64 Parámetros de salida en el árbol del modelo. 83
Figura 65 Conjunto mallado. 84
Figura 66 Menú Job Manager. 85
Figura 67 Resultados del History Output. 86
Figura 68 Selección de los parámetros. 87
Figura 69 Generación de tabla de datos. 88
Figura 70 Tabla de coordenadas de los puntos XFEM. 89
Figura 71 Obtención del factor de intensidad de tensiones. 90

Índice de gráficas

Gráfica 1 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 1 92
Gráfica 2 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 2 93
Gráfica 3 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 3 93
Gráfica 4 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 4 93
Gráfica 5 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 5 93
Gráfica 6 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 6 94
Gráfica 7 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 7 94
Gráfica 8 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 8 94
Gráfica 9 FIT para la posición de 0º y tamaño de grieta 9 95
Gráfica 10 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 1 95
Gráfica 11 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 2 96
Gráfica 12 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 3 96
Gráfica 13 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 4 96
Gráfica 14 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 5 97
Gráfica 15 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 6 97
Gráfica 16 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 7 97
Gráfica 17 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 8 98
Gráfica 18 FIT para la posición de 30º y tamaño de grieta 9 98
Gráfica 19 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 1 99
Gráfica 20 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 2 99
Gráfica 21 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 3 100
Gráfica 22 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 4 100
Gráfica 23 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 5 100
Gráfica 24 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 6 101
Gráfica 25 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 7 101
Gráfica 26 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 8 101
Gráfica 27 FIT para la posición de 60º y tamaño de grieta 9 102
Gráfica 28 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 1 102
Gráfica 29 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 2 103
Gráfica 30 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 3 103
Gráfica 31 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 4 103
Gráfica 32 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 5 104
Gráfica 33 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 6 104
Gráfica 34 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 7 104
Gráfica 35 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 8 105
Gráfica 36 FIT para la posición de 90º y tamaño de grieta 9 105
Gráfica 37 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 105
Gráfica 38 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 2 106
Gráfica 39 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 3 106
Gráfica 40 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 4 106
Gráfica 41 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 5 107
Gráfica 42 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 6 107
Gráfica 43 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 7 107
Gráfica 44 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 8 108
Gráfica 45 FIT para la posición de 120º y tamaño de grieta 9 108
Gráfica 46 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 1 108
Gráfica 47 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 2 109
Gráfica 48 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 3 109

Gráfica 49 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 4 _____ *109*
Gráfica 50 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 5 _____ *110*
Gráfica 51 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 6 _____ *110*
Gráfica 52 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 7 _____ *110*
Gráfica 53 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 8 _____ *111*
Gráfica 54 FIT para la posición de 150º y tamaño de grieta 9 _____ *111*
Gráfica 55 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 1 _____ *111*
Gráfica 56 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 2 _____ *112*
Gráfica 57 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 3 _____ *112*
Gráfica 58 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 4 _____ *112*
Gráfica 59 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 5 _____ *113*
Gráfica 60 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 6 _____ *113*
Gráfica 61 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 7 _____ *113*
Gráfica 62 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 8 _____ *114*
Gráfica 63 FIT para la posición de 180º y tamaño de grieta 9 _____ *114*
Gráfica 64 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 1 _____ *115*
Gráfica 65 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 2 _____ *116*
Gráfica 66 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 3 _____ *116*
Gráfica 67 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 4 _____ *117*
Gráfica 68 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 5 _____ *117*
Gráfica 69 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 6 _____ *118*
Gráfica 70 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 7 _____ *118*
Gráfica 71 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 8 _____ *119*
Gráfica 72 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 9 _____ *119*

Capítulo 1. Introducción

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este Proyecto es el estudio inicial del comportamiento de un eje ferroviario fisurado para su posterior utilización como base teórica y guía práctica para futuros proyectos relacionados con este tema.

Para la consecución de este objetivo principal se han debido superar antes otros importantes objetivos, los cuales se detallas a continuación:

- Aprendizaje del programa informático Abaqus.
- Diseño de un modelo virtual que reproduzca el comportamiento de un eje ferroviario sano en servicio.
- Diseño de un eje ferroviario fisurado y cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones a los largo del frente de la fisura.
- Creación de una guía para la introducción de grietas en modelos mediante el método XFEM en Abaqus.
- Obtención de la variación del Factor de Intensidad de Tensiones a lo largo de un giro completo del eje.

1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El primer paso que se debe realizar a la hora de empezar un nuevo proyecto es la definición de las fases de desarrollo para la obtención del objetivo. Con esto se puede planificar cada fase de manera independiente, o condicionada a una fase anterior, para conocer en cada momento cuál debe ser la siguiente fase que se debe realizar. En el caso de este proyecto, al tener gran parte de investigación, las fases son relativas, ya que pueden surgir problemas tanto en la fase de investigación como en la de desarrollo, provocando un cambio en las fases.

Para la consecución del objetivo perseguido se abordaron las siguientes fases:

- **Fase 1:** Definición de objetivos.

  En esta primera fase se definen los objetivos que se desean alcanzar con el proyecto. Para ello es necesario entender el funcionamiento de los elementos para fijar objetivos factibles.

- **Fase 2:** Búsqueda de información.

Una vez planteados los objetivos es necesario llevar a cabo una búsqueda de información tanto de la teoría sobre el tema en cuestión como de estudios realizados sobre el tema.

Además, es necesario estudiar el manejo del software que se va a utilizar, en este caso Abaqus, así como de las herramientas necesarias para la obtención de los resultados buscados.

- **Fase 3:** Diseño y simulación del modelo.

En esta etapa se busca la forma correcta de diseñar el modelo para evitar posibles errores de cálculo por parte del programa. Para ello primero se diseña el eje real y se estudia su comportamiento y si fuera necesario se le realizan simplificaciones.

- **Fase 4:** Obtención de los resultados.

Una vez realizados los cálculos por el software se deben extraer y analizar los parámetros buscados.

- **Fase 5:** Conclusiones.

Por último, tras analizar los resultados se deben obtener unas conclusiones en relación al trabajo realizado, así como ideas para posibles trabajos futuros.

Capítulo 2. Mecánica de la Fractura

2.1 INTRODUCCIÓN

La mecánica de la fractura ha sido impulsada por la necesidad del estudio del comportamiento de los materiales metálicos. Estos materiales poseen unas cualidades por las que son excelentes para crear con ellos componentes de máquinas y para ser utilizados como elementos estructurales. Pero también tienen inconvenientes, uno de los más importantes es que pueden sufrir importantes roturas frágiles, lo cual, se ha visto en a los largo de historia en numerosas ocasiones, provocando graves incidentes.

2.1.1 La rotura frágil

Se dice que un material es frágil cuando sufre una rotura tras una escasa deformación. Esta definición no está completa, ya que la ductilidad, que es la inversa de la fragilidad, se define como la capacidad de los materiales para sufrir deformaciones antes de romperse, y depende de las condiciones en las que se hayan producido las deformaciones, es decir a la velocidad a la que se ha deformado el material y la temperatura a la que se encontraba.

Por lo tanto se puede definir una rotura frágil como un tipo de fallo que se produce en materiales estructurales, el cual aparece sin una deformación plástica previa y ocurre a grandes velocidades.

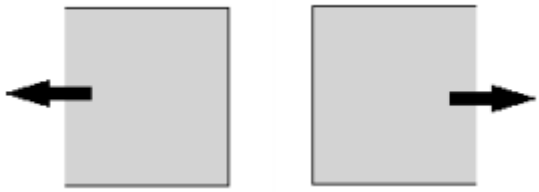


Figura 1 Rotura frágil sin deformación

La rotura frágil no es tan común como la fractura por fatiga pero normalmente suele provocar mayores daños materiales y en ocasiones personales.

2.1.2 Rotura dúctil

La rotura o fractura dúctil es aquella que se produce tras haber sufrido una gran deformación plástica el material. La fractura dúctil comienza con la formación de un cuello donde posteriormente se formarán cavidades dentro de la zona de estrangulamiento que provocaran la fractura.

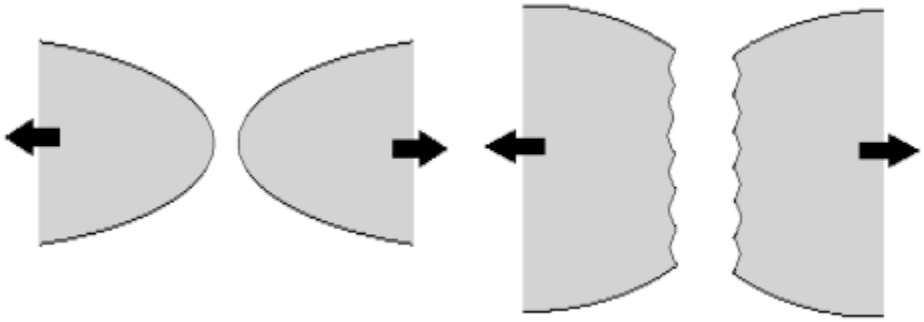


Figura 2 Fractura muy dúctil (a) y fractura moderadamente dúctil (b).

En metales muy blandos se pueden obtener fracturas muy dúctiles, como se muestra en la Figura 2. También se puede obtener este tipo de fractura en metales menos blandos, polímeros y vidrios cuando se les somete a una deformación lenta a elevadas temperaturas.
La fractura moderadamente dúctil es la más común de los tipos. Se produce tras una moderada deformación del material.

2.1.3 Antecedentes históricos

Ya en el antiguo Egipto se buscaba la forma de crear estructuras de manera que se puedan evitar las fracturas, por lo tanto, este campo no es nuevo. Pero es en el siglo XX con la aparición de las estructuras metálicas donde adquiere un papel vital las investigaciones en este campo.
Las nuevas estructuras creadas de acero sufrían fallos a tensiones mucho menores sus límites de resistencia. Los ingenieros de la época no encontraban la causa de estos fallos y por lo tanto, para intentar evitarlos, se trabajaba con factores de seguridad de 10 o superiores.

Los Buques Liberty

La industria naval ha sido una de la más perjudicadas por la fractura frágil, en especial durante los años 40 y 50, ya que durante esta época aumento la demanda de barcos debido a la Segunda Guerra Mundial.

En Estados unidos se buscaron nuevas formas de disminuir los tiempos de construcción de los barcos y se pasó de unir las partes mediante remaches a hacerlos mediante soldadura. Estos barcos creados mediante esta técnica se conocieron como Liberty. También hay que debido al aumento de la producción también aumento el personal, contratando a nuevo personal de baja cualificación.

La acelerada construcción de los barcos por parte de este personal poco cualificado provocó que muchos de ellos fueran mal construidos. El caso más notorio fue el del buque SS Schenectady, cuyo casco se fracturo en el astillero., aunque no fue el único. Se estima que el 55% de los buques Liberty sufrió problemas de fracturas en mayor o menor grado.

Esto se asoció a las nuevas técnicas de soldadura, a la mano de obra poco cualificada y a la aleación de acero utilizada, que a bajas temperaturas tendía a sufrir fracturas frágiles.

Figura 3 Fractura del casco de un buque Liberty.

Estos problemas se resolvieron con la introducción de nuevas técnicas de soldadura y con la regulación de las especificaciones necesarias que debían cumplir los materiales utilizados para la construcción de los barcos.

2.1.4 Accidentes Actuales

Algunas de las estructuras que más sufren fractura frágil en la actualidad son los puentes, oleoductos, plataformas petrolíferas y los fuselajes de aviones. En la Figura 4 se muestra como ejemplo la fractura del ala de un avión.

Figura 4 Fractura del ala de un avión.

Con el desarrollo de la industria aeronáutica se han producido graves accidentes relacionados con fracturas. En los años 50 dos aviones Comet de Havilland fallaron catastróficamente a gran altitud debido a la aparición de grietas por fatiga. Otro ejemplo es el avión F-111 que sufrió fracturas frágiles que posteriormente se demostró que se debían a grietas preexistentes.

Otros sectores afectados por estos problemas son el Energético y el de Transporte y Distribución de gases, es especial los gases licuados a bajas temperaturas; el sector Químico y el Petrolero.

2.1.5 Accidentes en el sector ferroviario

El sector ferroviario es uno de los más perjudicados por los fallos por fracturas. Aunque las cifras de roturas de ejes al año no son muy elevadas hay que destacar que las fracturas en los componentes mecánicos de un tren, suelen ser principalmente en los ejes, y las consecuencias de un fallo en un eje suelen ser catastróficas.

Por ejemplo, en los últimos 25 años, en Reino Unido, ha habido una media de 1,6 fallos de ejes por año, teniendo en cuenta que la población de ejes en servicio es de 180.000 ejes, la cifra es muy pequeña. Otro ejemplo es Canadá, donde entre los años 1997 y 2007 se registraron 35 roturas de ejes, en todas de las cuales se produjo descarrilamiento.

Figura 5 Descarrilamiento en Ontario, Canadá.

En 1842 tuvo lugar Versalles el primer accidente ocurrido en Francia de la historia. Un tren que salía de Versales descarriló por la sobrecarga de pasajeros que transportaba. Investigaciones posteriores determinaron que uno de los ejes de la locomotora delantera se fracturó por fatiga lo que provocó que la locomotora trasera siguiera en funcionamiento hasta acabar encima de la primera y los coches acabaran esparcidos por las cercanías.

Figura 6 Accidente de tren de Versalles.

En Junio de 2009 tuvo lugar en Viareggio, Italia, uno de los accidentes ferroviarios más graves de la historia moderna. Un poco después de medianoche explotó un tren de cercanías que transportaba GLP (Gas Licuado de Petróleo) mientras pasaba por una estación que se encuentra en el centro de la ciudad. El tren sufrió la rotura de uno de sus ejes y descarriló, provocando la explosión de la mercancía. Decenas de viajeros resultaron heridos y 24 personal perdieron la vida a causa del accidente.

Figura 7 Uno de los vagones tras la explosión del tren en Viareggio.

Figura 8 Eje fracturado del tren accidentado en Viareggio.

2.2 MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICA-LINEAL (MFEL)

La teoría de la elasticidad trata de desarrollar ecuaciones constitutivas para predecir analíticamente el fallo de sólido que no tienen imperfecciones. Cuando el sólido tiene imperfecciones, como pueden ser fisuras o grietas, la teoría de la elasticidad no es válida ya que no tiene en cuenta el efecto de la concentración de tensiones en dichas imperfecciones. Por lo tanto en un sólido con imperfecciones es necesario aplicar los principios de la Mecánica de la Fractura.

En el año 1923 Griffith desarrolló la teoría inicial en la que se sustenta la Mecánica de la Fractura, con la cual se trataba de predecir la rotura de materiales frágiles sin casi plasticidad.

La Mecánica de la Fractura Elástica-Lineal relaciona el campo de tensiones en las proximidades del vértice de la grieta con la tensión aplicada sobre el sólido, así como con la forma de la grieta y las propiedades del material.

Para establecer esta relación se supone que las alteraciones se produces en las zonas cercanas al frente de la fisura, comportándose el resto del sólido de manera elástica lineal. Para caracterizar estas alteraciones en el frente de la fisura se utiliza el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), *K*. El FIT relaciona la tensión nominal a la que está sometido el sólido con el tamaño de la grieta.

2.2.1 Modos de fractura

Existen tres tipos de movimientos relativos entre las superficies de la grieta que permiten establecer tres métodos diferentes para el análisis de esfuerzos en busca de grietas en sólidos, llamados Modos de fractura.

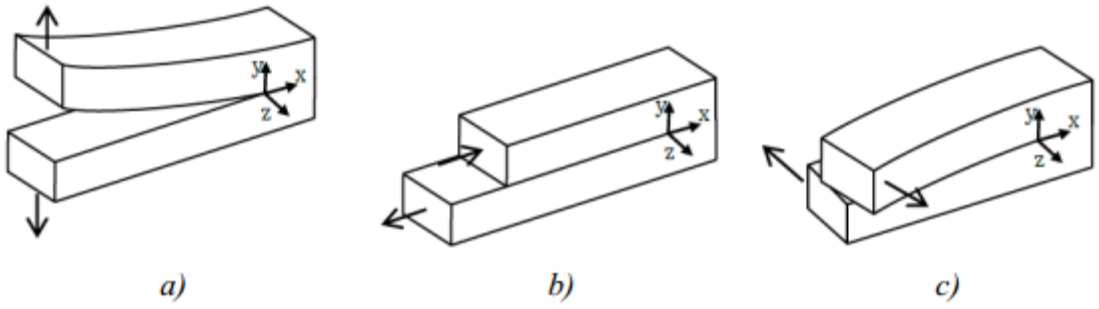


Figura 9 Modos de fractura

a) Modo I: Los esfuerzos tensionales son perpendiculares al plano de la fisura, produciéndose la apertura de la grieta.
b) Modo II: Los esfuerzos son paralelos a las caras de la fisura con sentidos opuestos en cada una de ellas y perpendicular al frente de la fisura, produciendo un movimiento de cizallamiento.
c) Modo III: Los esfuerzos son paralelos tanto a las caras como al frente de la fisura, produciendo un movimiento de rasgadura.

Estos son los tres modos básicos de la fractura que se pueden encontrar en cualquier problema de un sólido con una grieta. Se puede encontrar uno solo de estos sólidos o una combinación de varios. La mayoría de fallos en componentes mecánicos con grietas se deben al Modo I y por esto es este modo el que se estudia en este proyecto. Además, como se explicará a continuación, por la disposición de las fuerzas sobre el modelo de estudio los lados de la fractura sufren un desplazamiento correspondiente al Modo I.

2.2.2 Factor de Intensidad de Tensiones

Para cada Modo de Fractura explicado anteriormente se define un Factor de Intensidad de Tensiones específico, K_I , K_{II} y K_{III} , los cuales caracterizan completamente los campos de tensiones y desplazamientos en las zonas próximas al frente de la fisura. Los valores de estos parámetros dependerán tanto de la tensión aplicada en el sólido, como de su geometría y del tamaño de la grieta.

2.2.2.1 Tensiones y desplazamientos en el frente de la grieta

A partir de los estudios de Westergaard e Irwin se relacionaron los campos de tensiones y desplazamientos en las zonas adyacentes al frente de una fisura que sufre una apertura según el Modo I con el valor del factor de intensidad de tensiones, K_I , mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{pmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \tau_{xy}\end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\begin{pmatrix}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1-sen\left(\frac{\theta}{2}\right)sen\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]\\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1+sen\left(\frac{\theta}{2}\right)sen\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right]\\ sen\left(\frac{\theta}{2}\right)cos\left(\frac{\theta}{2}\right)cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\end{pmatrix} \tag{2.1}$$

Nos encontramos en un estudio de deformación plana, por lo tanto:

$$\sigma_{Z=\upsilon(\theta_x+\theta_y)} \tag{2.2}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \tag{2.3}$$

La ecuación se puede escribir como:

$$\begin{pmatrix}u_x\\ u_y\end{pmatrix} = \frac{K_I}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\begin{pmatrix}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[1-2\nu+sen^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]\\ \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)\left[2-2\nu-cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)\right]\end{pmatrix} \tag{2.4}$$

$$u_z = 0$$

En la Figura 10 se muestra el sistema de coordenadas y el tensor de tensiones correspondiente a un elemento cualquiera situado en el frente de la grieta.

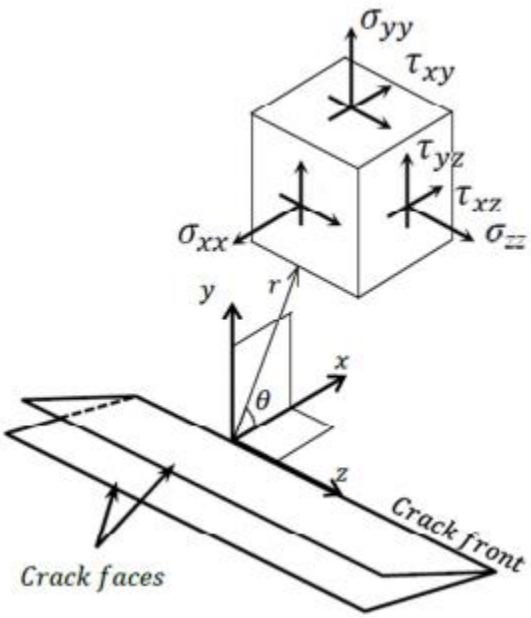


Figura 10 Sistema de coordenadas y tensor de tensiones en el frente de la grieta.

Donde el tensor de tensiones estaría formado por las tensiones σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{xz} y τ_{yz} ; los valores de u_x, u_y y u_z se corresponden a los desplazamientos en los ejes x, y, z, respectivamente; r y θrepresentan las coordenadas polares; K_I es el FIT en el Modo I; ν es ek coeficiente de Poisson y G el módulo de elasticidad transversal

Estas ecuaciones demuestran que las tensiones elásticas y las deformaciones en las proximidades del frente de la grieta no varían en todos los elementos sometidos a un determinado modo de deformación. Por lo tanto, dependiendo de cuál sea el modo de deformación al que están sometidos los elementos, se podrá relacionar la magnitud del campo de tensiones con un solo parámetro: el Factor de Intensidad de Tensiones, K_I , K_{II} o K_{III} dependiendo del modo en el que nos encontremos. Por lo tanto, el valor del FIT variará en función de parámetros como la geometría del sólido y de la grieta, de la tensión aplicada o del material del sólido, pero la distribución del campo de tensiones no variará. El análisis dimensional de las ecuaciones indica que el FIT debe ser linealmente proporcional a la tensión y estar directamente relacionado con la raíz cuadrada de la longitud característica de la grieta. Por lo tanto la expresión del factor de intensidad de tensiones para cualquier caso tiene la siguiente forma:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot f(g) \tag{2.5}$$

Siendo a la longitud característica de la grieta, σ la tensión nominal aplicada y $f(g)$ un parámetro geométrico adimensional que depende de la geometría del elemento de estudio y de la grieta.

Unos de los aspectos más importantes del factor de intensidad de tensiones es que relaciona el campo de esfuerzos en los elementos cercanos al frente de la fisura con la tensión nominal aplicada sobre los mismos elementos sin fisura. La mayoría de fracturas frágiles se producen en condiciones de Modo I por lo tanto la tensión más relevante es σ_{YY}. Para que σ_{YY} sea máxima se debe cumplir que en la ecuación $\theta = 0$, y por lo tanto la ecuación quedaría:

$$\sigma_{YY} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \tag{2.6}$$

K_I describe el campo de tensiones alrededor de una fisura y como se ha explicado anteriormente debe permanecer constante. En este caso se cumple que K_I es contante ya que a medida que aumenta r (alejamiento del frente de la fisura) disminuye el valor de la tensión σ_{YY}.
A partir de la ecuación se puede expresar el valor del factor de intensidad de tensiones, para una apertura en un el Modo I, como:

$$K_I = \sigma_{yy}\sqrt{2\pi r} \tag{2.7}$$

Por lo tanto, K_I describe la intensidad del campo de tensiones en una fisura en cualquier elemento siempre y cuando se haya determinado el parámetro geométrico $f(g)$.
Las unidades en las que se expresa el factor de intensidad de tensiones son $[Pa \cdot \sqrt{m}]$, es decir, unidades de tensión multiplicadas por la raíz cuadrada de la distancia.

2.2.2.2 Deformación en el frente de la fisura

Las ecuaciones del campo de tensiones y desplazamientos [2.1-2.5] muestran que la tensión elástica en las cercanías del frente de la fisura (r<<a) puede ser muy grande. Pero en realizad en estas regiones no se llegan a producir estas grandes tensiones ya que el material en estas zonas sufre una deformación plástica, creando una zona plástica alrededor del frente de la fisura.

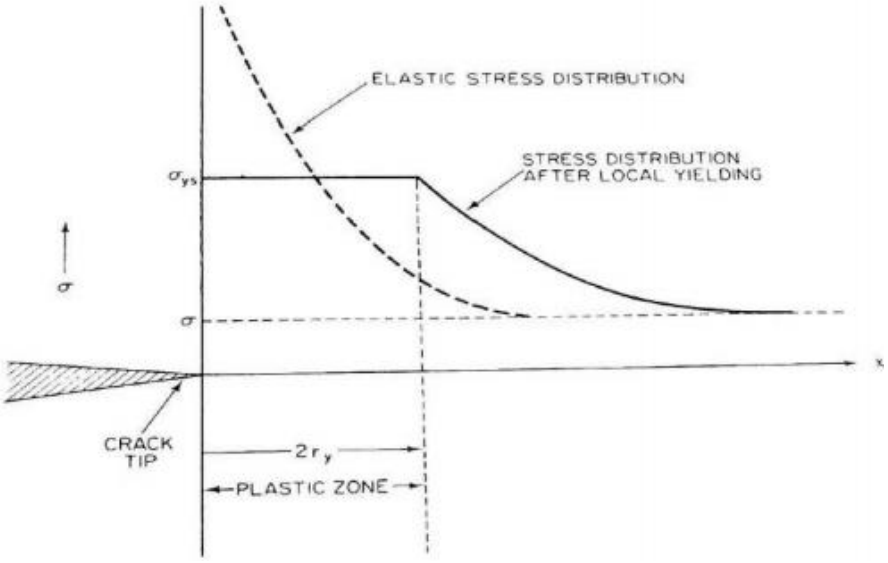


Figura 11 Distribución de la tensión σ_y en el frente de la fisura

En la Figura 11 se puede observar el cambio en la distribución de la componente y de la tensión causada por la zona plástica cercana al frente de la fisura. La longitud de esta zona plástica, r_y, puede calcularse a partir de las ecuaciones del campo de tensiones. Para ello se debe tratar el problema en un solo plano de tensión y suponer que la tensión σ_y es igual a su límite elástico,σ_{ys}. Por lo que la ecuación quedaría:

$$r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{\sigma_{ys}}\right)^2$$

2.2.2.3 Tenacidad de la fractura

La mecánica de la fractura nos dice que una fractura es inestable cuando el factor de intensidad de tensiones, *K*, alcanza un valor crítico. Para el Modo I de deformación y para fisuras pequeñas con deformación plástica, es factor de intensidad de tensiones crítico se denomina K_{IC}. Este factor determina la capacidad de un material para soportar un campo de tensiones en el frente de la fisura y para resistir la extensión progresiva debido a la tracción. Por lo tanto K_{IC} representa la Tenacidad de la Fractura de un material, mientras que K_I representa la intensidad de la tensión de una fisura en cualquier material.

Resumiendo, para evitar la fractura en componentes con defectos el K_I debe ser inferior en todo momento que K_{IC}, al igual que en los elementos sin fisuras la tensión nominal debe mantenerse por debajo de σ_{IC}.

De modo que el criterio local de fractura para el Modo I de deformación es el siguiente:

$$K_I \geq K_{IC}$$

Capítulo 3. Método de Elementos Finitos (MEF)

3.1 CONCEPTOS TEÓRICOS

El Método de Elementos Finitos (MEF), en ingles conocido como Finite Elements Method (FEM), es una de las herramientas más usadas para la resolución de problemas tanto en el campo de la Física como en el de la Ingeniería. Es un método muy utilizado ya que gracias a él permite resolver una gran cantidad de problemas de diferentes campos (mecánica, estructuras, fluidos, térmica, etc.) de forma teórica que de otro modo solo se podrían resolver mediante el ensayo en modelos reales, lo cual puede tener un coste muy elevado.

Este método permite aproximarse a la solución de ecuaciones diferenciales de modelos que por su complicada geometría de otra manera serían muy difíciles o imposibles de resolver. Para resolver esta estas ecuaciones el método transforma un cuerpo continuo en un modelo discreto aproximado, a este proceso se le denomina discretización del modelo.

La discretización del modelo consiste en descomponer el cuerpo en un número finito de pequeñas partes denominadas elementos. Los vértices de los elementos se denominan nodos y, al estar los elementos en contacto, un mismo nodo puede pertenecer a varios elementos. La unión de todos los nodos forma la malla y es sobre esta malla de puntos (nodos) sobre la que se realizan los cálculos.

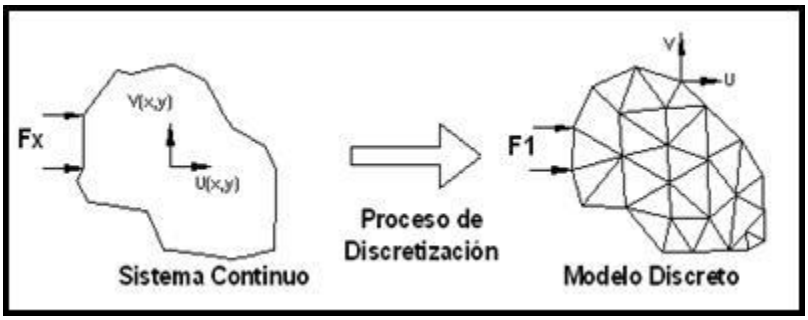


Figura 12 Proceso de Discretización.

En todos los sistemas analizados mediante MEF se pueden distinguir:

- Dominio: es el espacio geométrico que ocupa el modelo.
- Condiciones de contorno: son las condiciones específicas del problema que se deben conocer de antemano, como por ejemplo fuerzas externas, apoyos, etc.
- Incógnitas: son los resultados que se desean obtener con el método de elementos finitos.

Todos los sistemas que se estudian mediante MEF tiene definidas tres etapas:

- Preproceso: es la parte encargada del diseño del modelo así como las condiciones de contorno. Se deben definir los siguientes parámetros para tener un modelo funcional:
    - Diseño de la geometría del modelo.
    - Creación y asignación de los materiales.
    - Fuerzas externas.
    - Condiciones de contorno.
    - Discretización del modelo.

- Resolución: en esta etapa se especifican los cálculos que se van a realizar y se definen parámetros como el número de iteraciones o los intervalos de tiempo. No solo se especifican los parámetros de los cálculos sino que también se realizan.

- Postproceso: es la etapa encargada del tratamiento de los resultados obtenidos. Los resultados se nos pueden mostrar numéricamente o gráficamente. Además en esta etapa se engloban los resultados indirectos que se puedan obtener a partir de los resultados obtenidos del programa.

3.2 TIPOS DE ELEMENTOS EN ABAQUS

Como se ha explicado anteriormente, el Método de Elementos Finitos discretica un sólido continuo dividiéndolo en un número finito de elementos. Abaqus tiene una gran librería de elementos finitos, lo que proporciona una gran herramienta para la solución de una gran variedad de problemas.

3.2.1 Características de los elementos

Cada elemento tiene un nombre diferente que se le asigna en función de una serie de características, que se explican a continuación.

3.2.1.1 Familia

La diferencia entre las familias reside en las geometrías que cada una asume. A continuación se muestra una imagen con las diferentes familias.

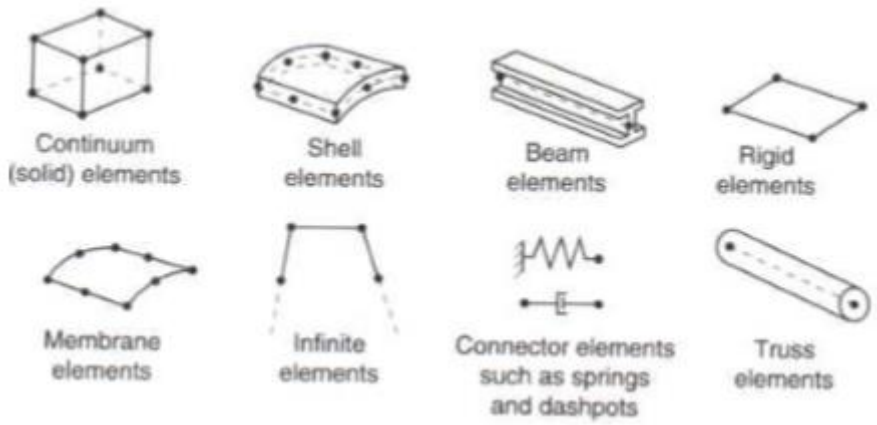


Figura 13 Familias de elementos.

3.2.1.2 Grados de libertad

Los grados de libertad son las variables que se calculan durante un análisis y están muy relacionados con la familia del elemento.

3.2.1.3 Número de nodos y Orden de Interpolación

El orden de interpolación viene determinado por el número de nodos que contenga un elemento. Los elementos con nodos únicamente en los vértices se denominan lineales o de primer orden, ya que utilizan interpolación lineal. Los elementos que contienen nodos en la mitad de cada arista se denominan cuadráticos o de segundo orden ya que usan interpolación cuadrática.

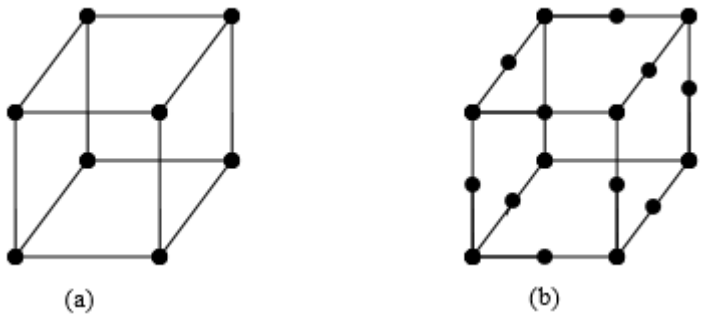


Figura 14 (a) Elementos lineales; (b) Elementos cuadráticos.

3.2.1.4 Formulación

Esta característica hace referencia al tipo de ecuaciones utilizadas para realizar los cálculos. En el caso de Abaqus pueden ser dos opciones, los problemas de esfuerzos y desplazamientos que se calculan con la teoría Lagrangiana y los problemas de fluidos que se resuelven con ecuaciones de Euler.

3.2.1.5 Integración

Abaqus utiliza técnicas numéricas para integrar el volumen de cada elemento para posteriormente evaluar la respuesta del material en cada una de estas integraciones. Abaqus permite elegir si se desea integración completa o reducida, pudiendo afectar a los resultados dependiendo de la opción elegida. La letra R al final del nombre del elemento indica que se utiliza integración reducida.

3.2.2 Nomenclatura

La denominación de los elementos de tipo sólido sigue la pauta mostrada en la Figura 15. A continuación se explica el significado de cada apartado.

Figura 15 Ejemplo de nomenclatura

Posición 1: Continúo para esfuerzos y desplazamientos (C), transferencia de calor o difusión de masa (DC), acústicos (AC), elemento continúo infinito (CIN).

Posición 2: Deformaciones planas (PE), esfuerzos planos (PS), deformaciones planas generalizadas (PEG), una dimensión (1D), dos dimensiones (2D), tres dimensiones (3D), axisimétricos (AX), cilíndricos (CL).

Posición 3: Número de nodos.

Posición 4: integración reducida (R), modo incompatible (I) o modificado (M). Es opcional seleccionar alguna de estas opciones.

Posición 5: Hibrido (H). Este apartado también es opcional.

Posición 6: Transferencia de calor con control de dispersión (D), temperatura – desplazamiento (T), presión de poros (P). Apartado opcional.

Posición 7: Número de modos de Fourier.

3.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO (XFEM)

Este método fue desarrollado por Ted Belvtschko, y otros colaboradores, en el año 1999 para solventar errores que surgen en el método general de elementos finitos cuando en el modelo se encuentran discontinuidades, como por ejemplo grietas.

Antes de desarrollarse el método XFEM las discontinuidades en el modelo se resolvían mediante el afinamiento de la malla en las zonas cercanas a estas. Esto era un proceso muy ineficaz ya que los resultados no eran precisos y los cambios en el modelo significaban volver a realizar el mallado. La principal ventaja del método XFEM es que no es necesario tener en cuenta la discontinuidad a la hora de mallar el modelo. Por lo tanto, no es necesario cambiar la malla cuando se realizan cambios en la discontinuidad o en el modelo.

El método se basa en aumentar las ecuaciones del MEF general, dotando de grados de libertad adicionales a los elementos geométricamente intersecados por la grieta. Es por esto por lo que no es necesario modificar la discretización del modelo ya que la malla se genera sin considerar la posición de la discontinuidad. Obviamente, para modelizar la discontinuidad se debe conocer la posición de la discontinuidad.

Para caracterizar los elementos y nodos que son afectados por la discontinuidad se utiliza la técnica Level Set Method (LSM). Esta técnica es la que dota a los nodos de grados de libertad adicionales, por lo que se llaman nodos enriquecidos. En la Figura 16 se muestran rodeados con un círculo los nodos enriquecidos con 2 gdl adicionales y con cuadrados los que han sido enriquecidos con 8 gdl. Un elemento enriquecido es aquel que posee al menos un nodo enriquecido.

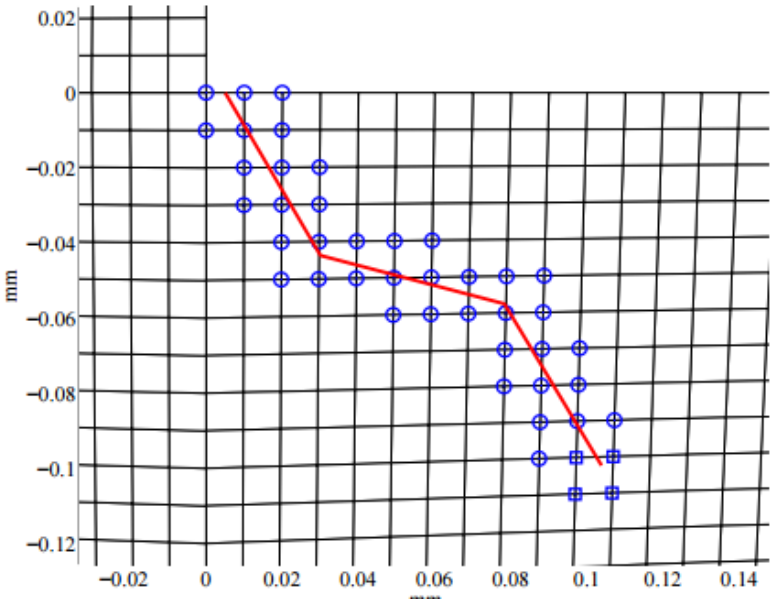


Figura 16 Nodos enriquecidos en XFEM

Capítulo 4. Abaqus 6.10-1

4.1 INTRODUCCIÓN

Abaqus es propiedad de la empresa Dassault Systemes y es unos de los programas que usa el Método de Elementos Finitos más utilizado tanto por la gran cantidad de problemas de diferentes campos que puede resolver como por la facilidad de su uso.

4.2 APLICACIONES

Abaqus integra cuatro productos o aplicaciones básicas, las cuales permiten realizar las tres etapas que debe contener todo estudio realizado con el Método de Elementos Finitos, como se ha explicado anteriormente.

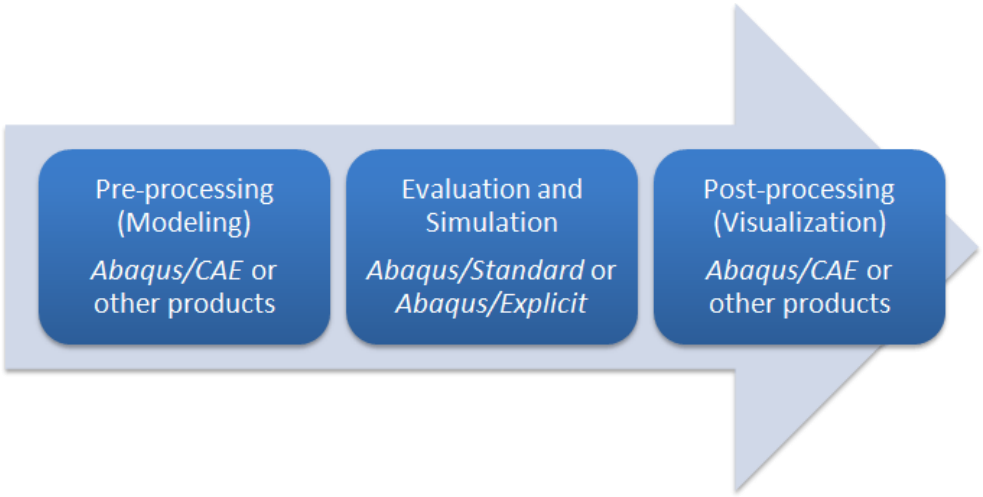


Figura 17 Relación de Abaqus con las etapas MEF

4.2.1 Abaqus/Standard

Esta aplicación, al igual que Abaqus/Explicit y Abaqus /CFD, es la encargada de la etapa de resolución, ya que con ella se pueden realizar ensayos, mediante integración implícita, sobre problemas estáticos, y dinámicos a bajas velocidades, donde el cálculo de las tensiones es un factor muy importante.

4.2.2 Abaqus /Explicit

Esta aplicación particularmente adaptada para resolver mediante integración explicita eventos dinámicos breves como choques o impactos, sistemas no lineales con contactos y problemas con cargas transitorias.

Abaqus permite utilizar las soluciones de un estudio realizado con Abaqus /Standard como condiciones de partida de una simulación con Abaqus /Explicit y de la misma forma, un análisis que comienza con Abaqus /Explicit se puede continuar con Abaqus /Standard. Permitiendo de esta manera unificar en un solo programa una gran cantidad de análisis diferentes que de otra forma seria necesario analizar con varios programas, lo que conlleva un aumento de la ineficiencia y los costes.

4.2.3 Abaqus/CFD

Se encarga de la resolución de problemas de mecánica de fluidos. Puede resolver los siguientes tipos de problemas de flujo incompresible: flujo laminar y turbulento, problemas de convección térmica y problemas con malla de deformación ALE (Arbitrary Langrangian and Eulerian).

4.2.4 Abaqus /CAE

Es la interfaz del programa encargada de la modelización de los sistemas para su posterior estudio. Para facilitar Además integra un sub-producto llamado Abaqus /Viewer que permite ver y analizar los resultados. Por lo tanto, esta aplicación (junto con sus Sub-productos) es la encargada de la etapa de Preproceso y Postproceso.

4.3 ENTORNO DE ABAQUS

Como se ha explicado anteriormente la interfaz encargada tanto del diseño del sistema como de la visualización de los resultados es la aplicación Abaqus /CAE, por lo que se va a proceder a su explicación.

En la Figura 18 siguiente se muestra una imagen del programa Abaqus /CAE en la cual se ha rodeado con colores las partes más importantes, las cuales se va a proceder a su explicación.

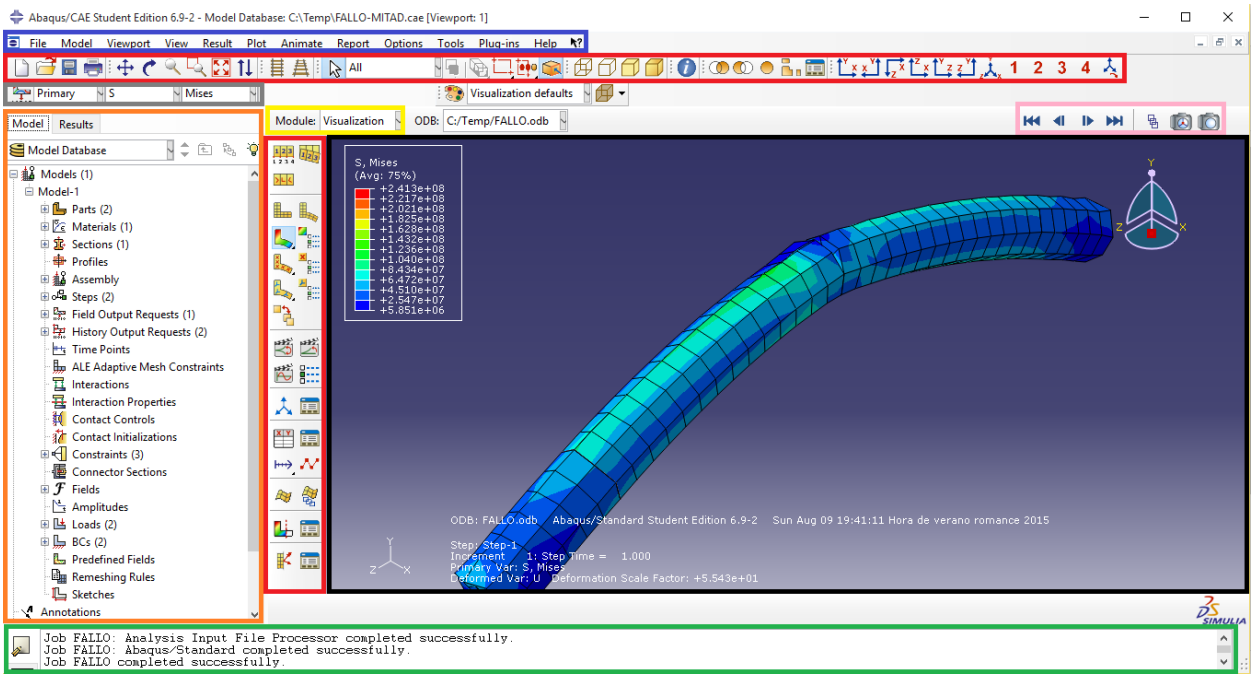


Figura 18 Interfaz de trabajo de Abaqus

- **Color Azul:** Barra Menú Principal. Aquí tenemos las funciones básicas de todo programa como crear modelos nuevos, guardar el modelo actual, abrir modelos guardados, etc., y funciones específicas como son cambiar las vistas, realizar gráficas, etc. Estas funciones dependen del módulo del programa en el que nos encontremos, los cuales se explicaran a continuación.

- **Color Rojo:** Barra de Herramientas y Caja de Herramientas. En la Barra de Herramientas (parte superior) encontramos accesos rápidos a funciones más utilizadas de la Barra de Menú Principal. Y en la Caja de Herramientas (parte inferior) encontramos funciones características de cada módulo. Estas funciones y más también las podremos encontrar en las nuevas funciones que aparecen en la Barra de Menú Principal al cambiar de módulo.

- **Color Naranja:** Árbol del Modelo y Árbol de Resultados. Aquí podemos encontrar un desglose de todas las partes que componen el modelo así como de todos los resultados que nos da el programa una vez hechos los cálculos.

- **Color Negro:** Viewport. En esta área se muestran las imágenes de las piezas y del conjunto.

- **Color Verde:** Área de Mensajes. Aquí Abaqus nos muestra mensajes de lo que está haciendo actualmente y también podemos ver que hemos hecho. También por aquí nos muestra

información sobre los elementos del modelo. Además podemos utilizar esta área para programar manualmente comandos.

- **Color Rosa:** Área Prompt. Esta parte es específica del módulo "Visualization" y nos permite cambiar entre los frames y así ir viendo la evolución del modelo.

- **Color Gris:** Visualización de Resultados. Esta función es propia del módulo "Visualization" y nos permite ver en el conjunto los resultados que ha calculado el programa, como por ejemplo la tensión de Von Mises, la de Tresca o el desplazamiento.

- **Color Amarillo:** Área de Módulos. Aquí podemos cambiar el módulo del programa en el que nos encontramos.

4.3.1 Módulos de Abaqus

Para facilitar la creación de los modelos de estudio Abaqus divide las fases de creación en diferentes módulos. Desde cada uno de estos módulos podremos acceder a herramientas y aplicaciones específicas. A continuación se va a proceder a explicar cada uno de estos módulos, así como las acciones que se pueden realizar desde ellos.

4.3.1.1 Part

En este módulo se crean las diferentes partes de las que se va a componer el modelo. A la hora de crear una nueva parte se deben especificar diferentes parámetros que definirán el tipo de pieza creada: el espacio geométrico (2D o 3D), el tipo de piza (si es deformable o indeformable), la forma de la pieza: sólida (Solid), placa (Shell), viga (Wire) o punto (Point) y por último el método de creación de la pieza: extrusión, revolución o barrido (Sweep)

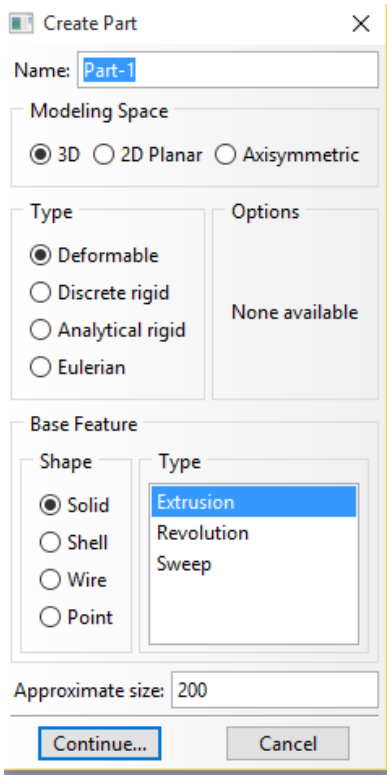


Figura 19 Creación de una parte.

Una vez seleccionados los parámetros de la pieza se debe crear la geometría. Para ello entramos en un entorno de dibujo 2D. Como se puede observar en la Figura 20,a la izquierda de esta pantalla se encuentran las herramientas de dibujo que permiten crear nuevos bocetos o importar bocetos guardados.

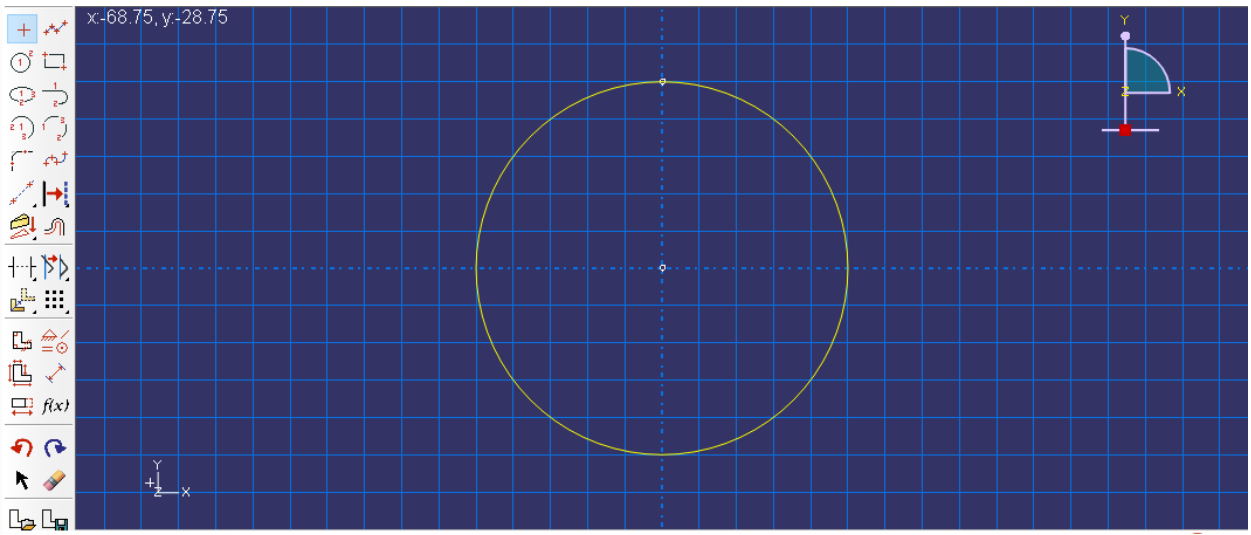


Figura 20 Entorno de dibujo.

Desde este módulo también es posible, una vez creada la parte, redondear las aristas, crear particiones en la pieza y crear extrusiones, desde cualquier cara de la pieza creada, de tipo sólido, placa o viga.

4.3.1.2 Property

En este módulo se crean los materiales de los que están constituidas las diferentes partes del modelo. Cuando se crea un nuevo material se le pueden asignar características generales (densidad), mecánicas, térmicas, acústicas, eléctricas, etc. Dentro de las características mecánicas se puede definir si el material es elástico, plástico, metal dúctil, etc.

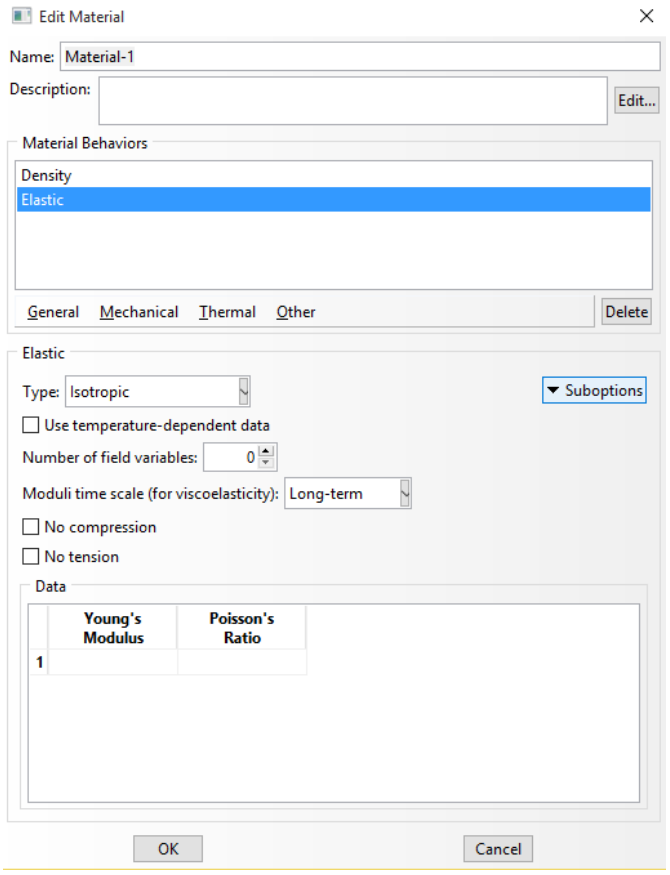


Figura 21 Creación de materiales.

Una vez creado el material se deben crear las secciones, que pueden ser divididas en dos tipos:

- Solido o Placa, en las cuales se puede especificar si la sección es homogénea o tiene otra distribución no homogénea
- Viga (beam), donde nos encontramos dos sub-tipos: “beam”, con esta opción se puede elegir la forma de la sección transversal de la viga (cuadrada, rectangular, circular, T, doble T, etc.); o “truss”, donde no es posible seleccionar la forma de la sección transversal.

Por último se deben asignar las secciones creadas a cada pieza, así como su orientación en caso de ser necesario.

4.3.1.3 Assembly

En este módulo se crean los conjuntos de estudio a partir de las partes creadas. Los conjuntos pueden estar formados por una o más partes. Las partes pueden introducirse en el modelo como partes dependientes, las cuales se deben mallar por separado, o independientes, las cuales se mallan todas juntas.

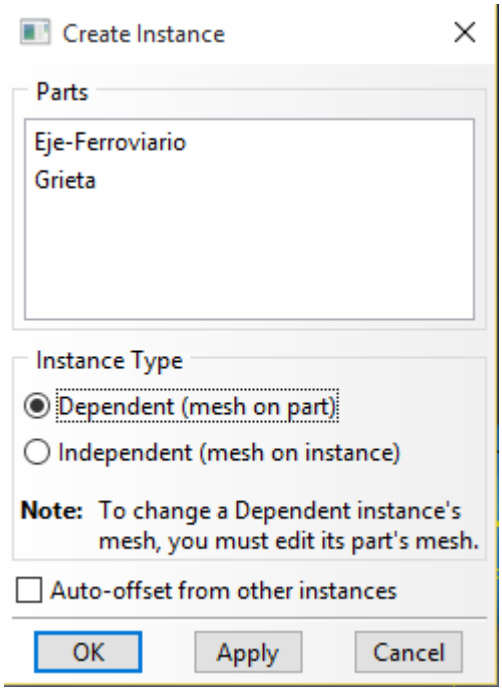


Figura 22 Creación de conjuntos.

En este módulo también se encuentran funciones para trasladar y rotar las partes para colocarlas en la posición que se desee.

4.3.1.4 Step

Un estudio puede constar de un solo paso (*Step*) o etapa, o puede constar de diferentes etapas, un ejemplo seria: carga + reposo + descarga. Para simular estos casos tenemos el módulo Step, en el cual se debe crear un Step diferente para cada etapa diferente del modelo. Los más típicos son los estáticos o dinámicos, aunque existen varios tipos más.

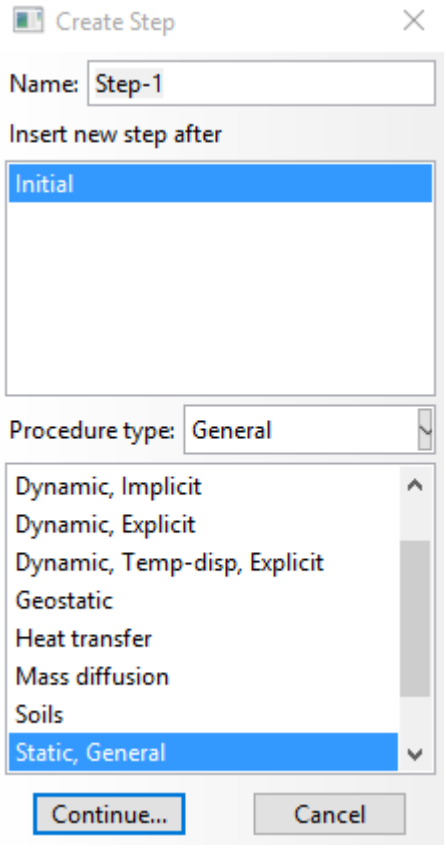


Figura 23 Creación de Step.

En este módulo también se deben seleccionar los resultados que se desea que Abaqus calcule y muestre. Esto se selecciona a en las dos funciones siguientes que se explican a continuación:

- Field Output: desde aquí se pueden seleccionar los parámetros que queremos que Abaqus muestre sobre la geometría del modelo una vez realizados los cálculos.
- History Output: los valores seleccionados en la salida histórica no se mostraran sobre la geometría del modelo sino que al seleccionar uno o varios elementos Abaqus nos

devolverá una lista con los valores de los parametros que se le han pedido en el History Output.

4.3.1.5 Interaction

En este módulo se pueden crear interacciones entre las diferentes partes creadas. A continuación se muestran las diferentes interacciones que se pueden seleccionar.

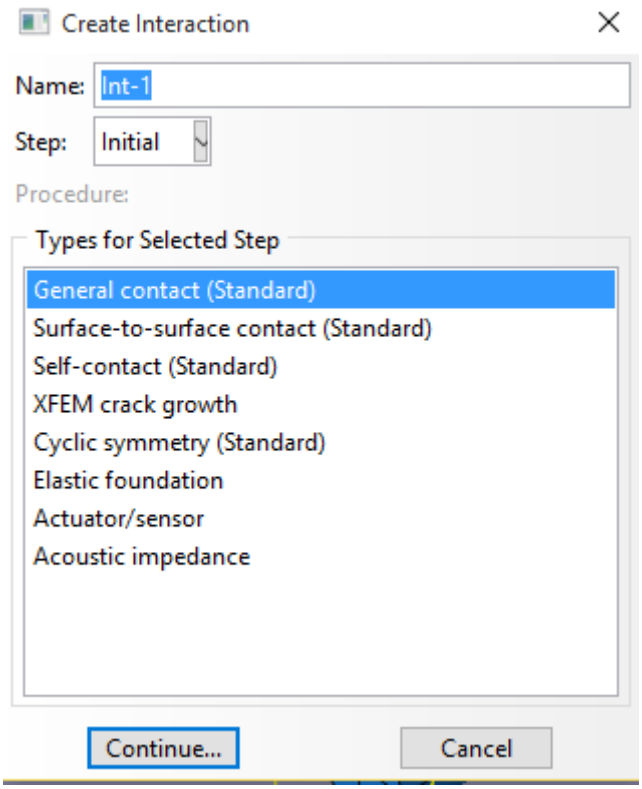


Figura 24 Creación de interacciones.

Una vez seleccionada la interacción se debe especificar la clase de relación que tienen las diferentes superficies que intervienen en esta interacción, para ello se deben introducir las propiedades de la interacción (*Interaction Property*). Las opciones se muestran a continuación:

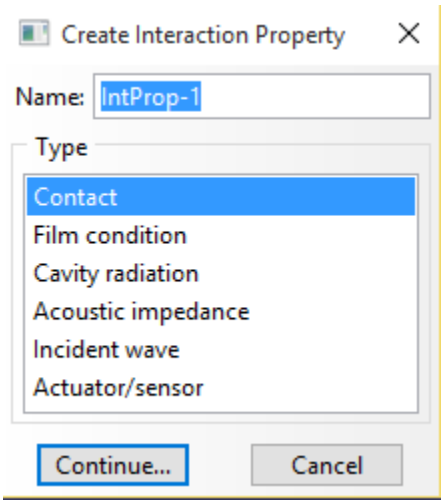


Figura 25 Propiedades de la interacción.

Una de las interacciones más usada es la tipo "Contact" que indica a Abaqus que las superficies seleccionadas están en contacto o lo estarán en algún momento del estudio. En este tipo de interacción se debe indicar el comportamiento que van a tener las superficies tanto en su componente tangencial como en su componente normal. En el caso de la componente normal se suele utilizar la condición "Hard Contact" que indica que las superficies involucradas en la interacción no se pueden atravesar. En el caso de la componente normal nos encontramos tres opciones:

- Frictionless: este contacto se selecciona cuando entre las superficies no hay rozamiento, es decir, seleccionar este contacto es como especificar que el coeficiente de rozamiento tiene un valor de cero ($\mu=0$).
- Penalty: seleccionando este contacto podemos especificar un coeficiente de rozamiento determinado ($\mu>0$)
- Rough: al seleccionar este contacto el coeficiente de rozamiento que tomara Abaqus será infinito, es decir, se selecciona este contacto cuando queremos unir dos partes. Aunque este tipo de contacto no es el más recomendado para unir dos partes ya que a altas tensiones sufre fallos.

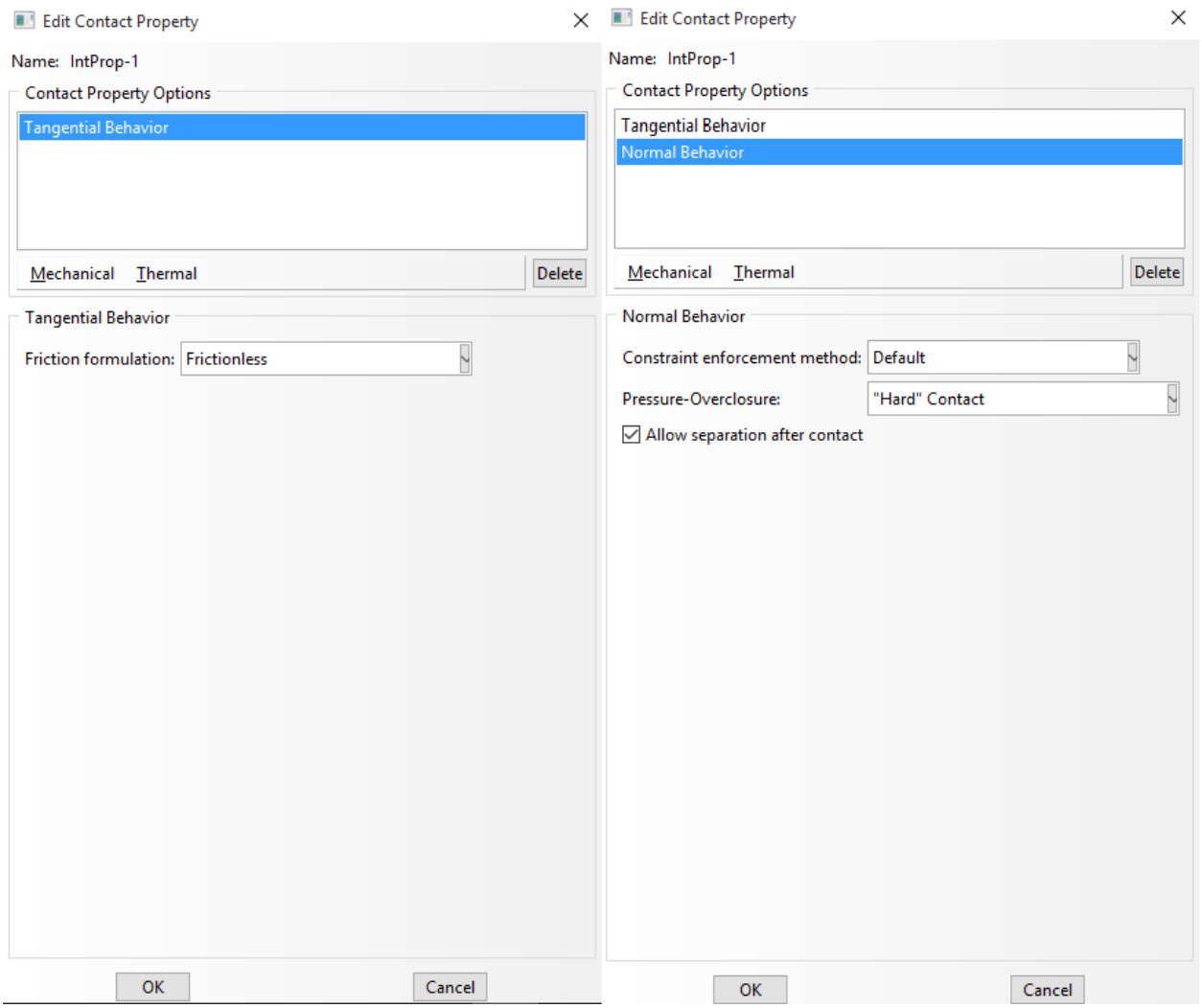


Figura 26 Propiedades del contacto.

En este módulo también se encuentra la herramienta necesaria para crear grietas, que se explicará en el capítulo siguiente.

4.3.1.6 Load

En este módulo se crean las fuerzas que actúan sobre el modelo. Podemos elegir entre una gran variedad de categorías diferentes de fuerzas: fuerzas mecánicas, térmicas, acústicas, de fluidos, eléctricas, de difusión de masa, etc. Además, dentro de cada categoría de fuerzas, se pueden elegir fuerzas específicas de dicho tipo, en el caso de las fuerzas mecánicas (que son las que se usan en este proyecto) se pueden elegir fuerzas concentradas, momentos, presiones, gravedad, etc.

Lo primero que se debe seleccionar a la hora de crear una fuerza es sobre que Step actúa y a continuación elegir la categoría y el tipo de la fuerza que se va a crear. Por último se debe seleccionar el punto, la línea o la superficie sobre la que actúa (dependiendo de que fuerza se haya seleccionado) y la dirección y magnitud de la fuerza, siendo CF1 la dirección X, CF2 la dirección Y y CF3 la dirección Z.

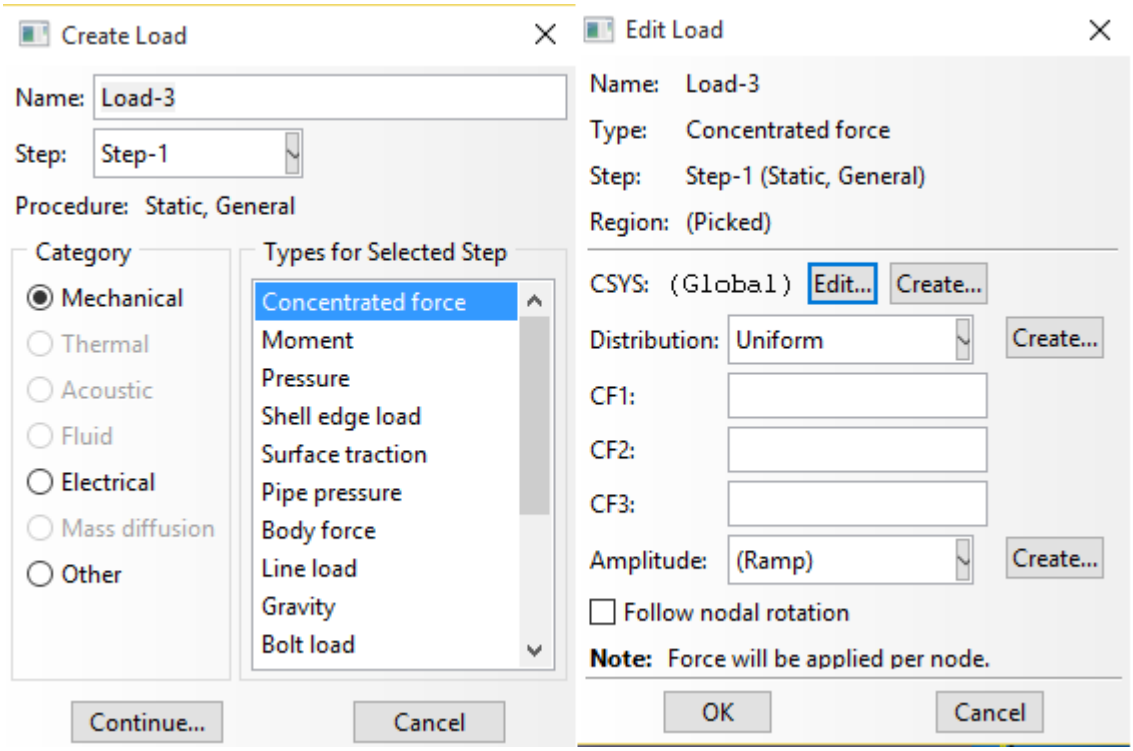


Figura 27 Creación de cargas (izquierda) y asignación de magnitudes (derecha).

También se crean en este módulo las condiciones de contorno (Boundary Condition). Podemos elegir entre las opciones que se muestran a continuación.

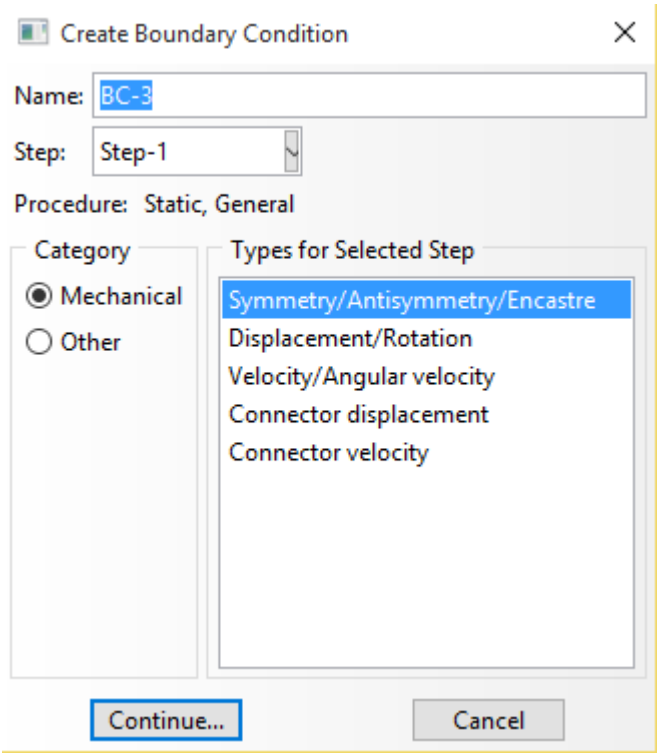


Figura 28 Creación de condiciones de contorno.

Estas condiciones de contorno se pueden aplicar a nodos, aristas o superficies. A continuación se explicar las condiciones de contorno más utilizadas.

La primera opción que se muestra en la Figura 28(Symmetry/Anstisymmetry/Encastre) permite simular condiciones de simetría, permitiendo así reducir el tamaño de las piezas que son simétricas respecto a algún eje, ya que solamente es necesario dibujar la mitad de la pieza, aumentando la precisión de la malla al reducir el tamaño de los nodos. También permite restringir el movimiento en los tres ejes, permitiendo la rotación, con la opción “PINNED” y restringir tanto los movimientos como la rotación en todos los ejes con la opción “ENCASTRE”.

El segundo caso (Displacement/Rotation) permite dar valores específicos de desplazamientos y rotación en los tres ejes a cualquier punto, línea o superficie del modelo.

El tercero (Velocity/Angular Velocity) es similar a la opción anterior, pero permite dar valores de velocidad y velocidad angular.

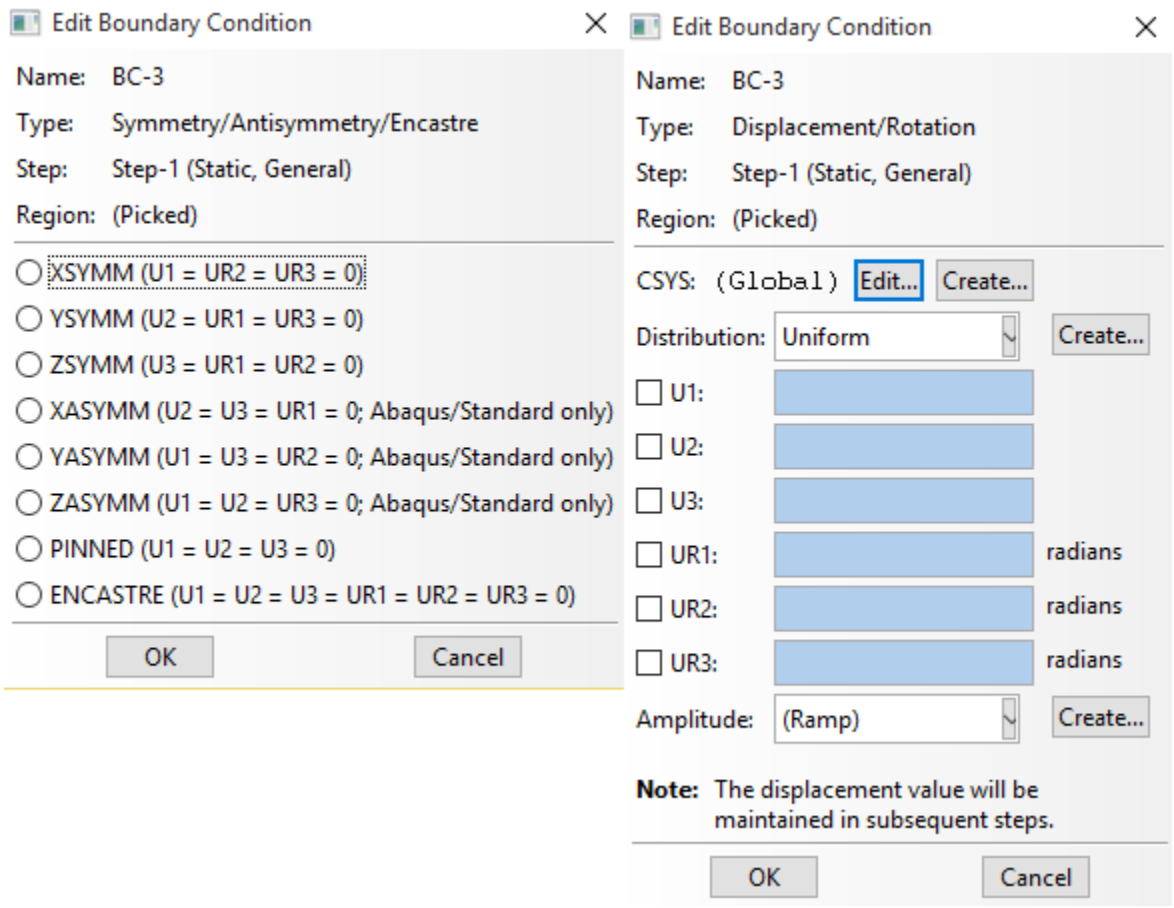


Figura 29 Opciones de condiciones de contorno del tipo "Symmetry/Anstisymmetry/Encastre" (izquierda) y del tipo "Displacement/Rotation" (derecha)

4.3.1.7 Mesh

Este módulo es el encargado de realizar la discretización del modelo, que como se ha explicado anteriormente consiste en transformar el modelo continuo en un modelo discreto formado por un número finito de elementos.

Primero se debe definir la forma y el tamaño de los elementos. Para ello en el menú "Mesh Control" se define la forma de los elementos, pudiendo ser de forma hexaédrica, tetraédrica o una combinación de ambas. También es posible elegir la técnica de mallado por la que se crearan los elementos, que pueden ser:

- Structured, con esta opción todos los elementos tendrán el mismo tamaño y forma.

- Free, con la cual el programa crea los elementos de diferentes tamaños y formas, dependiendo de las necesidades de la geometría.
- Sweep, está opción hará que la malla se cree con un patrón circular, por lo que es recomendable para piezas cilíndricas.
- Bottom-up, con esta opción se empezaría a mallar de abajo a arriba, por lo tanto los elementos de más abajo se acercarán más al tamaño establecido y a medida que subimos en el modelo se irá ajustando el tamaño a las necesidades de la geometría.

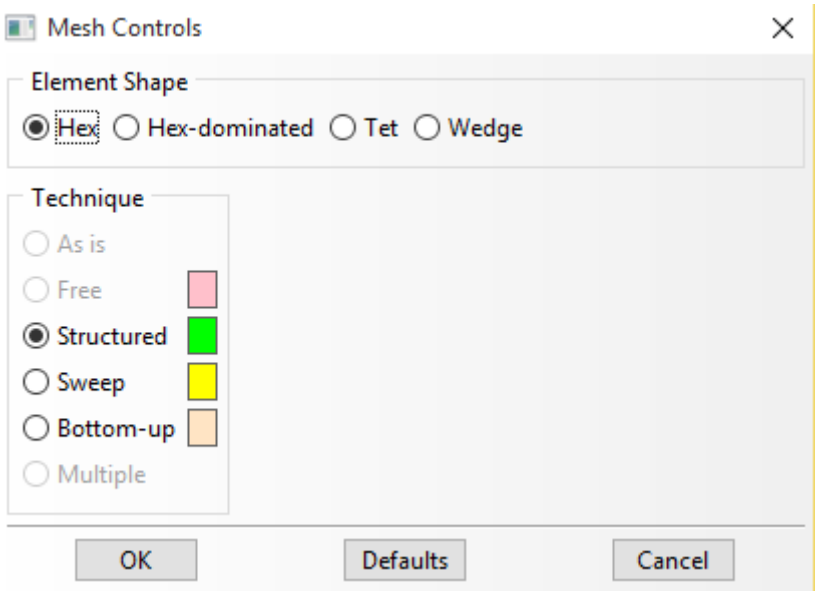


Figura 30 Menú "Mesh Control"

Como se puede observar en la imagen, a la derecha de cada técnica hay un color, esto sirve para que Abaqus indique cual es la técnica de mallado más indicada para cada pieza, pintándola del color correspondiente cada pieza.

Posteriormente se deben especificar, o dejar por defecto, factores característicos de cada forma, esto se hace en el menú "Element Type". Además se debe seleccionar en qué clase de ensayo nos encontramos, por ejemplo si el modelo se encuentra sometido a flexión o deformación plana, o como en el caso de este proyecto es un modelo en tres dimensiones por lo que se debe seleccionar "3D Stress". Desde este menú también se puede seleccionar si se quieren utilizar elementos lineales o cuadráticos.

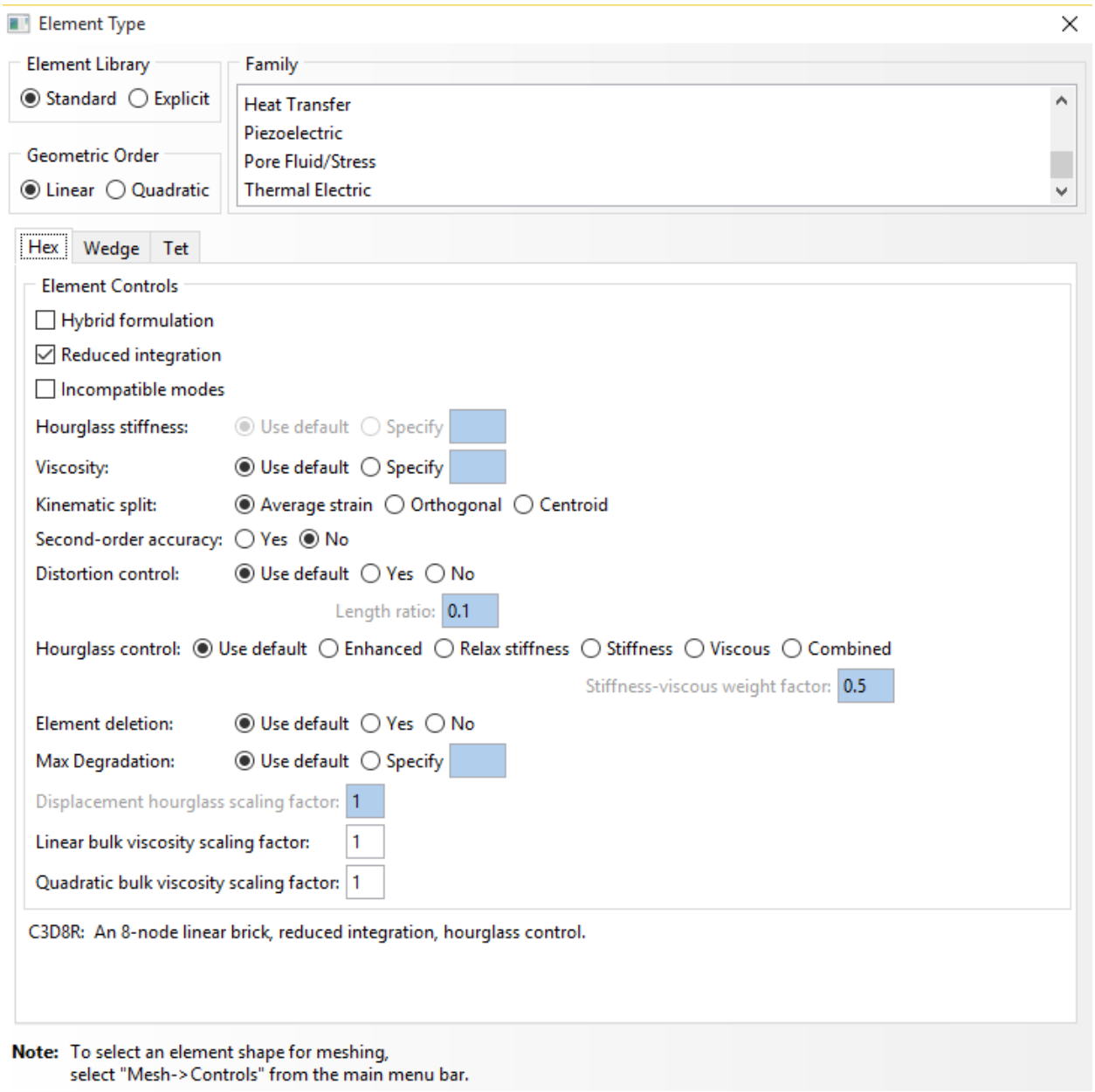


Figura 31 Menú "Element Type"

Y por último se debe seleccionar el tamaño aproximado que deben tener los elementos para que el modelo tenga el número de elementos que se desee. A menor tamaño de elemento mayor numero habrá y más preciso será el cálculo. El tamaño de los elementos se especifica en "Global Seeds", en el apartado "Approximate global size"

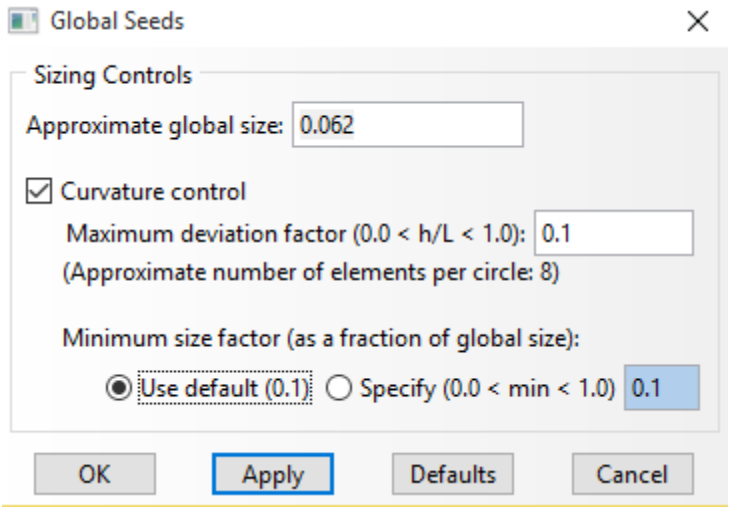


Figura 32 Menú "Global Seeds"

Cabe destacar que no todo el modelo tiene que tener la misma malla, se pueden crear mallas diferentes para cada parte que forme el modelo. Incluso una misma parte puede tener forma y tamaño de malla diferente realizando particiones.

Hasta este momentos se han explicados los módulos correspondientes a la etapa de Preproceso, exceptuando el módulo Step, el cual pertenece a la etapa de Resolución. A continuación se explica el módulo Job que, al igual que Step, pertenece a la etapa de Resolución.

4.3.1.8 Job

El modulo "Job" es el encargado de realizar los cálculos que anteriormente le hemos pedido al programa. Para ello debemos crear un nuevo trabajo en el menú "Create Job" y posteriormente se pueden variar parámetros como la memoria que va a ocupar el trabajo o la precisión que va a tener en el menú "Edit Job". Una vez creado el trabajo Abaqus genera de forma automática unos archivos con los todos los datos del problema. Los archivos más relevantes son los de extensión ".cae", los cuales guardan toda la información del Preproceso y del Postproceso, y los archivos con extensión ".odb", los cuales guardan la información del Postproceso.

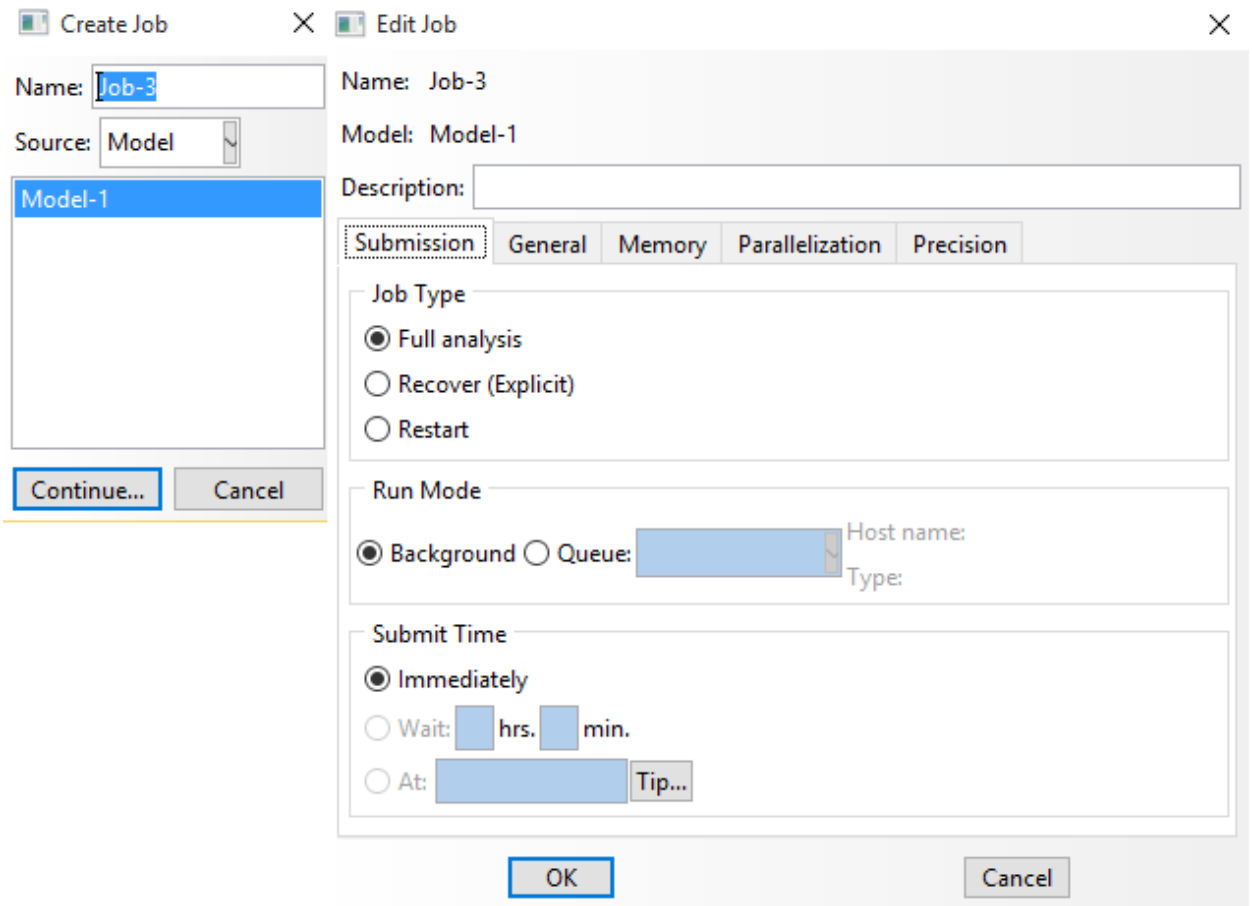


Figura 33 Creación de un trabajo (Job).

Para que Abaqus realice los cálculos se debe entrar en el menú "Job Manager" y seleccionar la opción "Submit". Es posible observar el avance de los cálculos a través de los mensajes que va mostrando el programa en el Área de Mensajes, donde iremos viendo una visión muy general, si se quiere ver una información más específica se debe seleccionar el botón "Monitor…" donde se puede ir observando el avance de todos los incrementos de tiempo. En esta ventana de "Monitor…" se pueden ver los errores que hayan surgido al realizar los cálculos. Si estos problemas son tan graves como para que Abaqus no pueda terminar los cálculos, mostrara el estado (Status) "Aborted", por el contrario, si no surge ningún problema grave nos indicara el estado de "Completed" y podremos ir al módulo de "Visualization" para observar los resultados a través del botón "Results".

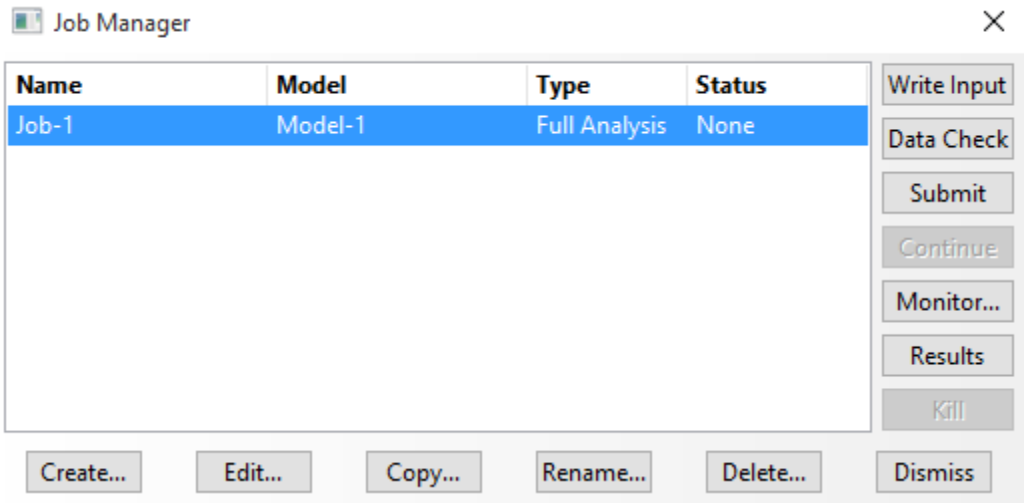


Figura 34 Menú "Job Manager"

4.3.1.9 Visualization

Este módulo es el encargado del Postproceso ya que este módulo permite ver los resultados obtenidos de varias maneras.

Se pueden ver los resultados de los parámetros seleccionados en el "Field Output" sobre la geometría del modelo en una escala de colores y aparecerá una leyenda que nos indicara el valor de cada color. No solo mostrara los valores sino que mostrara una simulación de los resultados, pudiendo ver el resultado final o el avance de los resultados "frame a frame", es decir, observando los cambios que se producen en el modelo en cada incremento de tiempo que ha realizado en los cálculos Abaqus.

Como se ha explicado anteriormente los parámetros seleccionados en el "History Output" no se mostraran sobre la geometría, si no que se debe seleccionar un elemento o nodo y se mostraran los valores de dicho parámetro en cada "frame" en dicha selección. Estos resultados se presentan como una lista de valores indicando para cada valor el elemento seleccionado y el "frame" al que corresponde.

A parte de mostrar los resultados en la geometría del modelo o como una lista de datos también es posible ver los resultados en forma de gráfica, pudiendo seleccionar los parámetros que se deseen en cada eje.

4.3.1.10 Sketch

Este módulo está relacionado con el modulo “Part” ya que en este módulo se pueden crear bocetos de geometrías para más tarde utilizarlo para realizar partes con ellos. Este módulo es útil si se van a crear piezas de formas diferentes (extrusión, placa, revolución) las cuales tienen la misma geometría.

Se debe crear una geometría con el botón “Create Sketch” y para utilizar este Sketch, en el módulo “Part”, cuando se cree una pieza nueva, en la barra de herramientas del entorno de dibujo de Abaqus, aparecerá el botón “Add Sketch”, desde donde seleccionaremos la geometría deseada.

Capítulo 5. Estudio del eje ferroviario

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se va a proceder a estudiar el comportamiento del eje ferroviario simplificado en función del número de nodos de la malla para realizar un análisis de convergencia y extrapolar estos resultados al estudio del eje ferroviario con grieta.

5.1.1 Geometría del eje

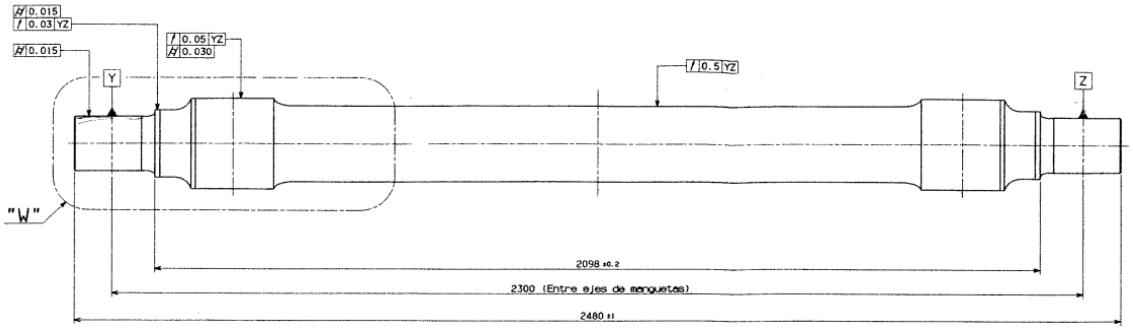


Figura 35 Eje ferroviario sometido a estudio

5.1.1.1 Geometría real del eje

En la Figura 36 se muestra el diseño en 3D del eje ferroviario creado a partir del plano (ANEXO A). El eje tiene una geometría compleja que dificulta su estudio.

Figura 36 Modelo del Eje Ferroviario creado en Creo Parametric.

Los taladros laterales y los chaflanes son los elementos que mas complican la geometría y el estudio de eje ferroviario. En la Figura 37 se muestra en detalle estos elementos.

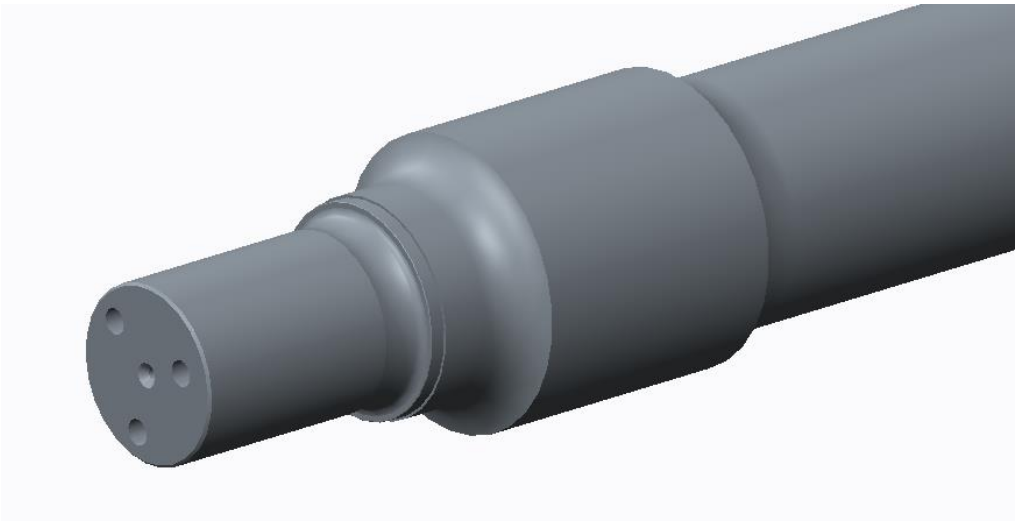


Figura 37 Detalle de los taladros y los chaflanes

5.1.1.2 Geometría del eje simplificada

Para facilitar el estudio y reducir al máximos lo posibles errores de cálculo derivados de la geometría se han eliminado los taladros, los chaflanes y los pequeños cambios de diámetros que por tolerancias Abaqus no permite crear ya que son demasiado pequeños (0.2 mm).

Para poder utilizar una malla de menor tamaño únicamente se ha modelizado la mitad del eje ya que es una pieza simétrica.

5.1.2 Definición del material

El material utilizado ha sido un acero Cromo-Manganeso, que es uno de los materiales más utilizados para la fabricación de eje ferroviarios. Sus propiedades son:

- Densidad = 7850 Kg/m^3
- Módulo de Young = 205 GPa
- Coeficiente de Poisson = 0.27

5.1.3 Restricciones y cargas

Para crear las restricciones se ha supuestos que en la superficie en contacto con las ruedas no existe posibilidad de desplazamiento en ningún eje. Tampoco hay momentos en esta superficie, ya que el único momento que podría haber sería el que permitiría el giro del eje, pero al realizarse un estudio estático, este momento también se ha suprimido.

Para la asignación de las cargas se ha supuesto que el eje soporta 12,5 toneladas de peso en cada extremo del eje.

5.2 MODELIZACIÓN DEL EJE FERROVIARIO SIMPLIFICADO CON ABAQUS

En este apartado se va a proceder a explicar cómo se ha realizado la modelización del eje ferroviario simplificado en Abaqus.

Cabe destacar que en este proyecto se ha trabajado con las unidades del Sistema Internacional:

Longitud: m
Masa: Kg
Fuerza: N
Densidad: Kg/m3
Tensión: Pa
Módulo de Elasticidad: Pa

5.2.1 Geometría del eje

La creación del eje ferroviario se realiza desde el módulo Part. Se crea como una pieza 3D, deformable, sólida y creada por revolución. Para ello se debe utilizar el botón Create Part y seleccionar las opciones que se han descrito. Tras esto aparecerá la interfaz de dibujo, en la cual se crea la sección transversal del eje.

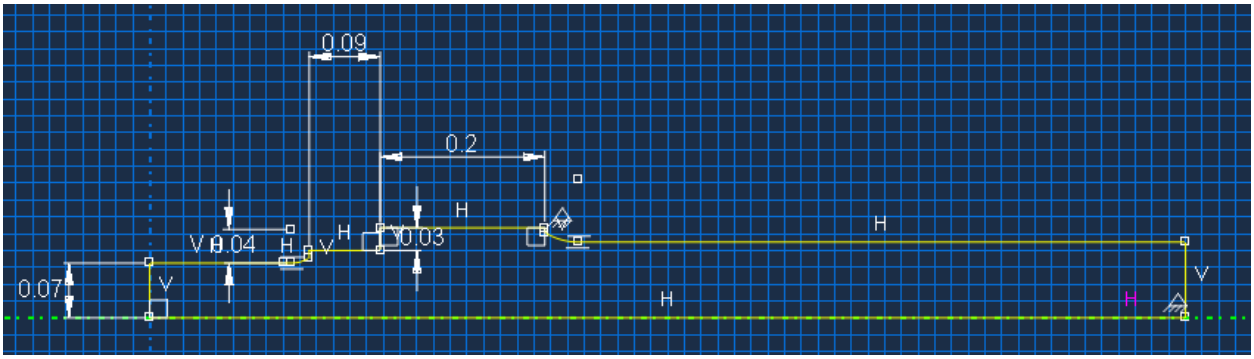


Figura 38 Boceto del eje ferroviario.

Una vez creada la sección se debe indicar el ángulo que se desea que abarque, en el caso de este estudio se quiere el cilindro completo, por lo que se indica un ángulo de 360º.

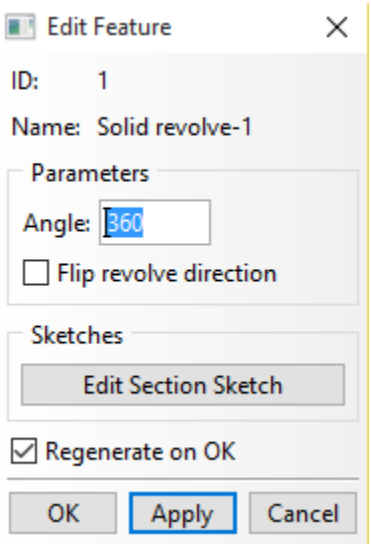


Figura 39 *Introducción del ángulo de creación.*

En el boceto no se han introducido los ángulos de redondeo puesto que suele provocar errores. Es más eficaz hacerlo con la herramienta *Create Round or Filet* con la cual se debe seleccionar la arista que desea redondear e indicar el ángulo de redondeo.

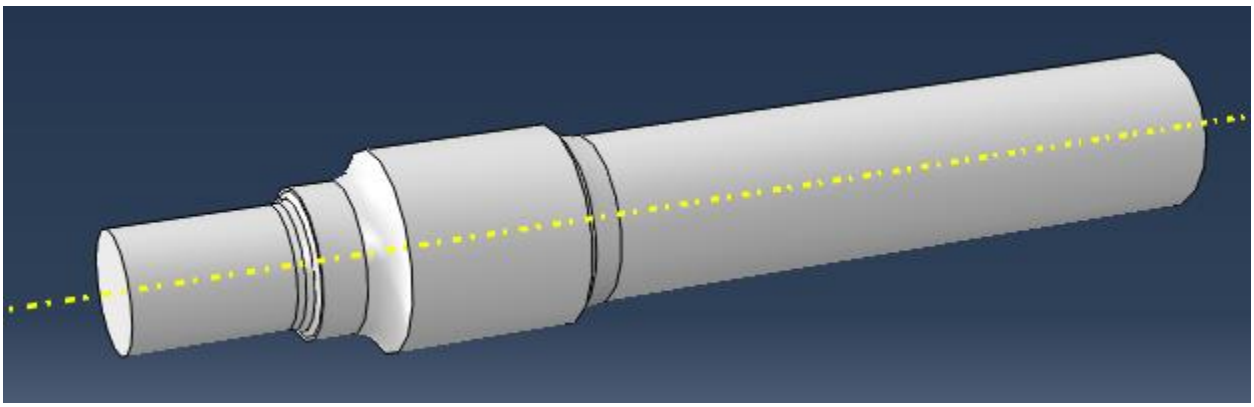


Figura 40 Eje Ferroviario simplificado

5.2.2 Creación del material

El siguiente paso es crear el material, en nuestro caso Acero Cr-Mn (Cromo – Manganeso), para ello se debe ir al módulo Property y seleccionar el botón Create Material . Tras lo cual se deben introducir las propiedades del material, para ello se selecciona General > Density y se introduce el valor en Mass Density y para terminar se deben introducir las propiedades elásticas, para ello se debe ir a Mechanical > Elasticity > Elastic e introducir los valores correspondientes del coeficiente de Poisson y el módulo de Young.

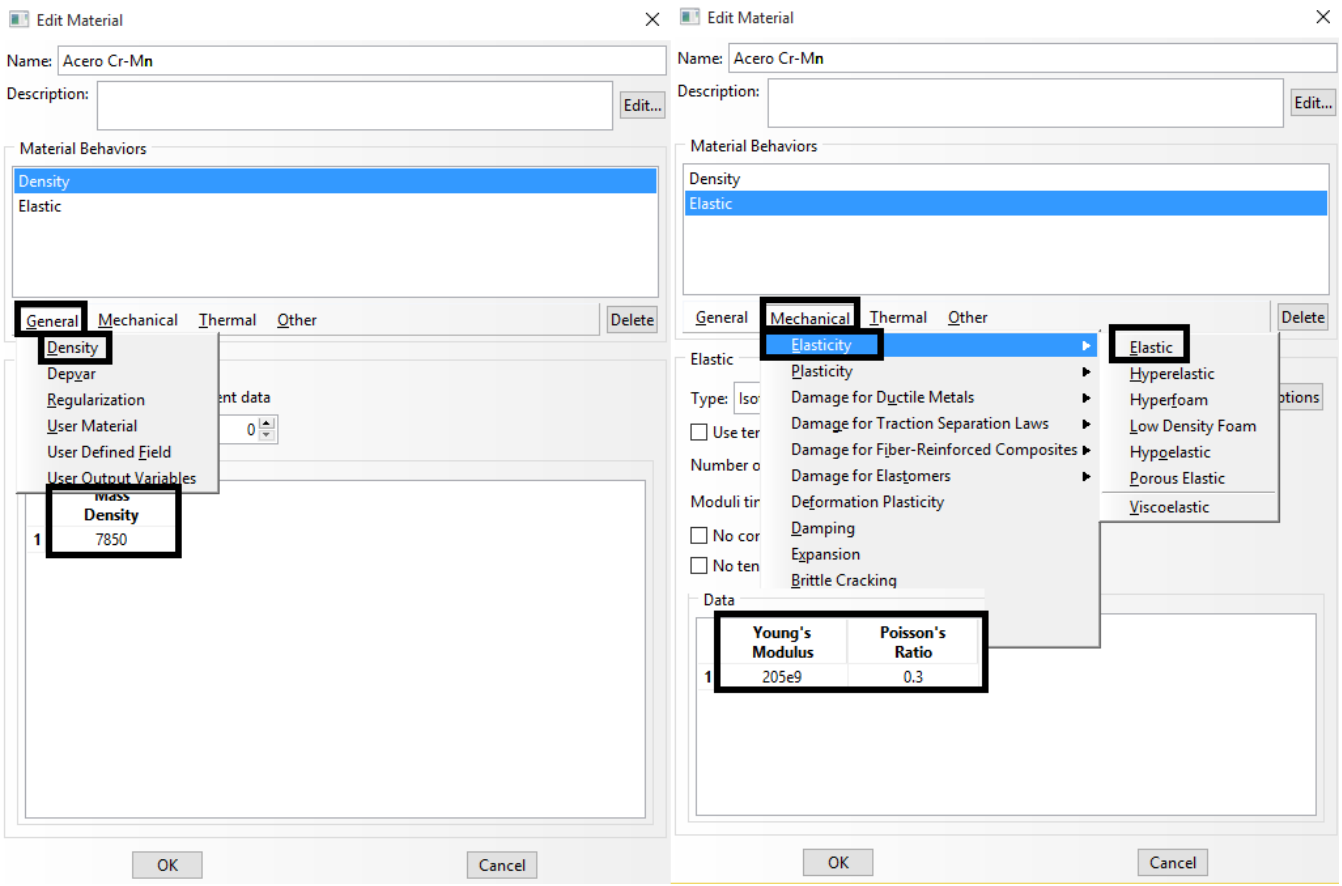


Figura 41 Creación de material.

Una vez creado el material se deben crear las secciones que serán de ese material. En este caso solamente al eje se le asignara material, ya que la grieta, a ojos del programa, solo será una falta de material en el eje. Como solo el eje va a tener material solo ha de crearse una sección y debe ser de tipo sólido (igual que la piza "Eje-Ferroviario"), para ello se debe seleccionar el botón Create Section tras lo cual se debe seleccionar el tipo de sección que se quiere crear.

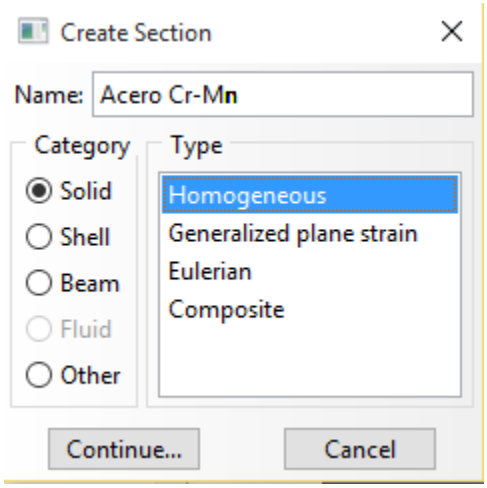


Figura 42 Crear sección.

Por último se le debe asignar a las piezas las diferentes secciones, pero como se ha dicho únicamente el eje tendrá sección. Por lo tanto, se selecciona el botón Assign Section , seleccionar la pieza "Eje-Ferroviario" y asignarle la sección creada.

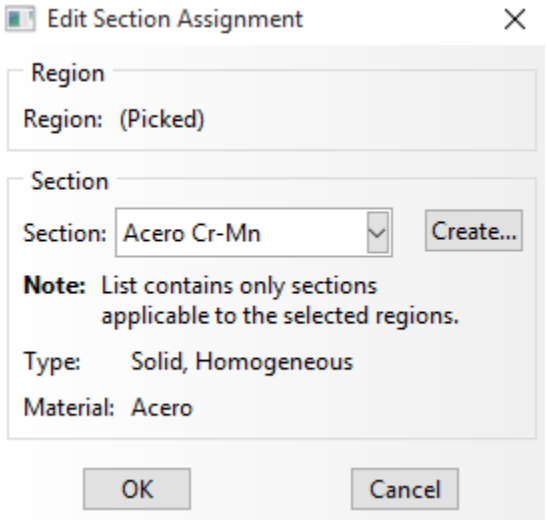


Figura 43 Asignar sección.

5.2.3 Ensamblaje del eje

Una vez asignado el material al eje se debe crear el conjunto de estudio. En este caso está formado por una sola pieza. Para crear el conjunto se pulsa el botón *Instance Part* y se selecciona el eje. Antes de introducirlo dándole al botón "Aceptar" se debe indicar que es una parte independiente.

5.2.4 Definición del paso

Para crear un nuevo paso se debe pulsar el botón Create Step . En el caso de este proyecto se ha seleccionado un estudio estático, para ello se selecciona la opción Static General.
Posteriormente se debe editar este Step para ayudar a la convergencia. Para ello se debe aumentar el número mínimo de incrementos y disminuir el tamaño mínimo de los incrementos, como se muestra en la Figura 44.

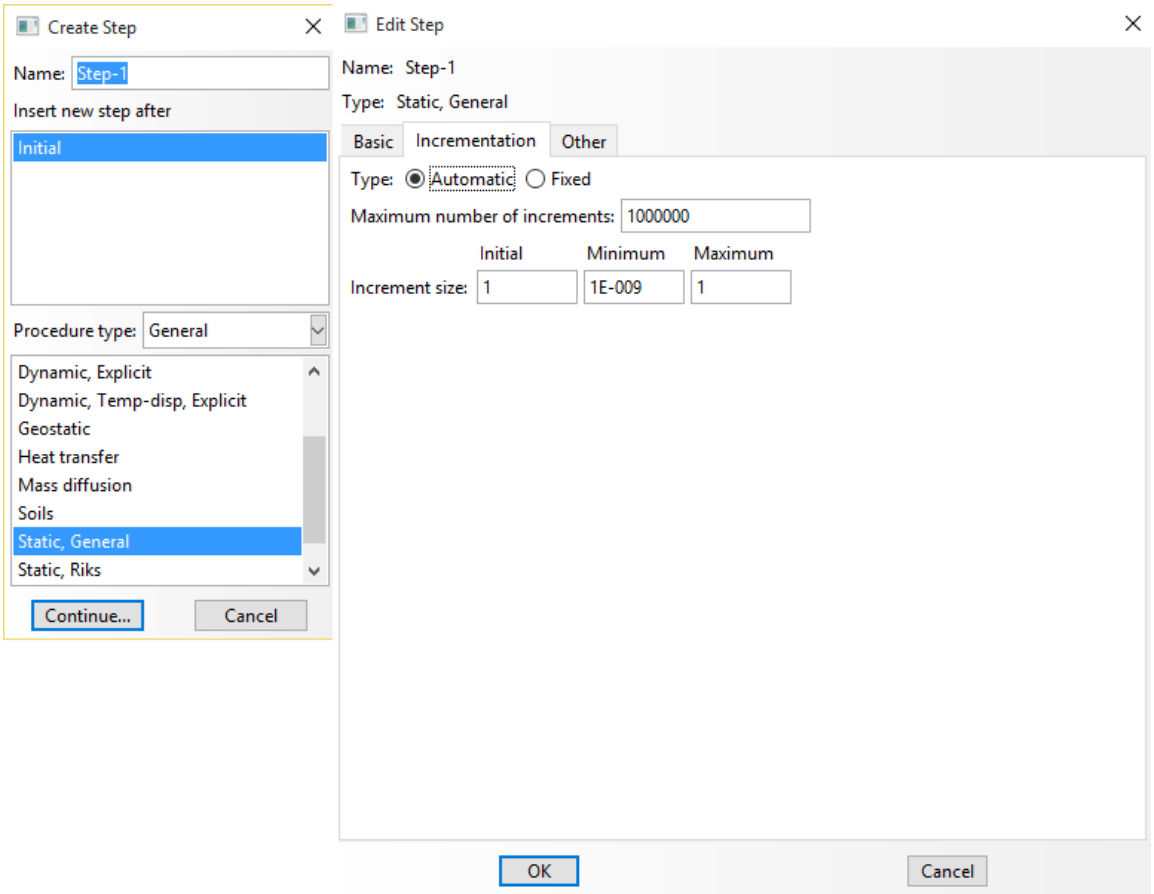


Figura 44 Creación de Step.

5.2.5 Definición de los parámetros de salida

En este caso únicamente queremos calcular la tensión máxima en el eje por lo que no es necesario variar los parámetros de salida predefinidos por Abaqus.

5.2.6 Definición de las condiciones de contorno

Para definir las condiciones de contorno se debe ir al módulo Load en el cual se especificaran cuáles son las fuerzas que actúan sobre el modelo y cuáles son las restricciones a las que está sometido.

Para crear una nueva fuerza se debe pulsar el botón Load , tras lo cual se debe elegir qué tipo de fuerza se desea crear. En el caso de este proyecto, el eje se ha sometido a una fuerza distribuida en la superficie superior de su extremo, como se muestra en la Figura 45. Para crear este tipo de fuerza se debe seleccionar *Surface Traction*. Después se debe seleccionar la superficie sobre la que va a actuar dicha fuerza y especificar la magnitud de la fuerza y la dirección en la cual se va a distribuir.

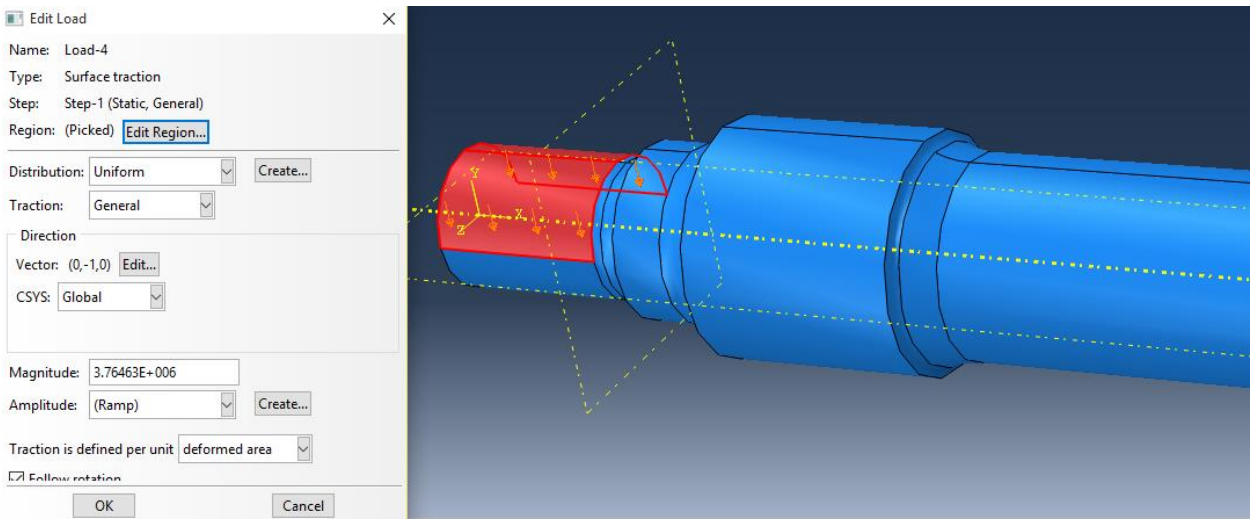


Figura 45 Creación de fuerza externa.

El valor de la fuerza distribuida se calcula dividiendo la fuerza que genera la masa de 12,5 toneladas que soporta el extremo del eje entre el área que soporta dicha fuerza. La fuerza que genera la masa de 12,5 toneladas es:

$$F = M \cdot a = 12500\ Kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} = 122625\ N$$

Y el área sobre la que está distribuida es la mitad superior del extremo del eje. Teniendo en cuenta que este tramo mide 0.16 m y tiene un radio de 0.065 m, el área es:

$$A = \frac{2\pi R}{2} \cdot L = \pi \cdot R \cdot L = \pi \cdot 0.065 \cdot 0.16 = 0.0326726\, m^2$$

Por lo tanto la fuerza distribuida es:

$$F_{distribuida} = \frac{F}{A} = \frac{122625\ N}{0.0326726\ m^2} = 3753145\ Pa = 3.75\ Mpa$$

Una vez creada la fuerza a la que está sometida el eje hay que especificar las restricciones que tiene. Para crear una nueva restricción se debe seleccionar el botón Create Boundary Condition y posteriormente elegir el tipo de restricción que se desea crear. En este caso se han creado dos restricciones:

La primera es una restricción de simetría ya que únicamente se ha dibujado la mitad del eje. Por lo tanto en la superficie donde debería continuar la otra mitad del eje hay que crear una restricción de simetría en la dirección en la que continuaría el eje, en este caso el eje Z. Para crear esta restricción se debe seleccionar Symmetry/Antisymmetry/Encastre, después seleccionar la superficie y por ultimo indicar el eje de simetría.

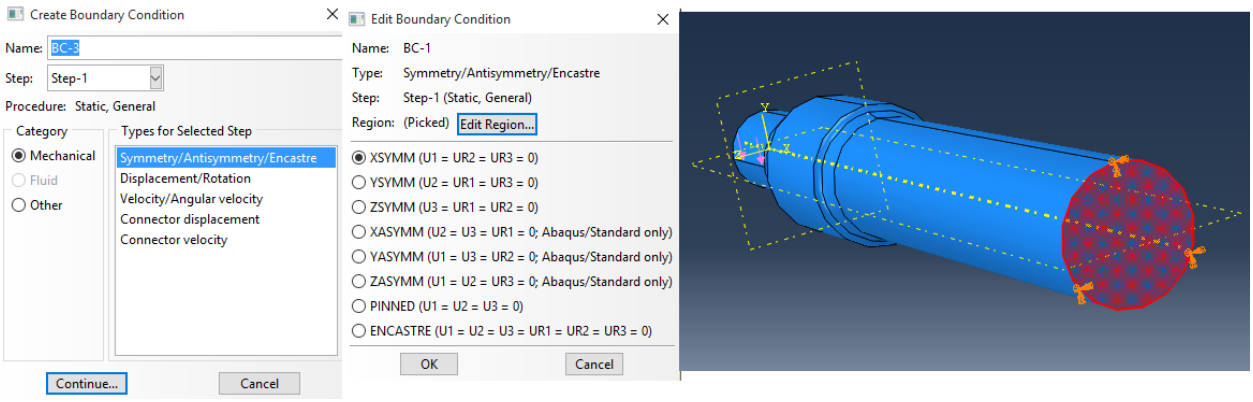


Figura 46 Creación de restricción de simetría

La segunda restricción que se debe crear es el encastre en la zona de las ruedas. Para ello se vuelve a seleccionar la opción Symmetry/Antisymmetry/Encastre, se selecciona la superficie que iría en contacto con las ruedas y se selecciona la opción “ENCASTRE”, tal y como se muestra en la Figura 47.

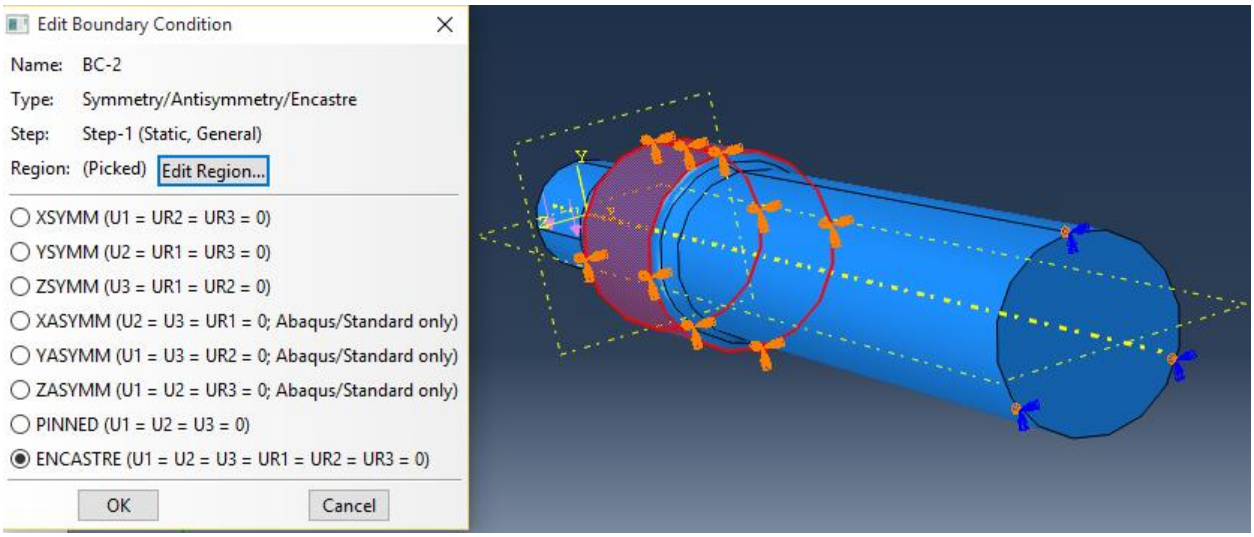


Figura 47 Creación de restricción de encastre.

5.2.7 Mallado del conjunto

El último paso antes de realizar los cálculos consiste en discretizar el modelo. Esto se realiza desde el módulo Mesh.

Primero se debe definir qué tipo de elementos se van a utilizar para el mallado. Para seleccionar el tipo de elemento que se desea utilizar y la técnica de mallado se debe pulsar el botón Assign Mesh Controls . Debido a la geometría del eje Abaqus no permite mallar todo el modelo con la misma técnica de mallado. Esto puede provocar errores en las zonas de unión de las diferentes técnicas, por lo que es mejor mallar todo el modelo con una sola técnica. Para encontrar una técnica común para todo el modelo se deben seleccionar elementos del tipo tetraédricos y la técnica de mallado será "Free".

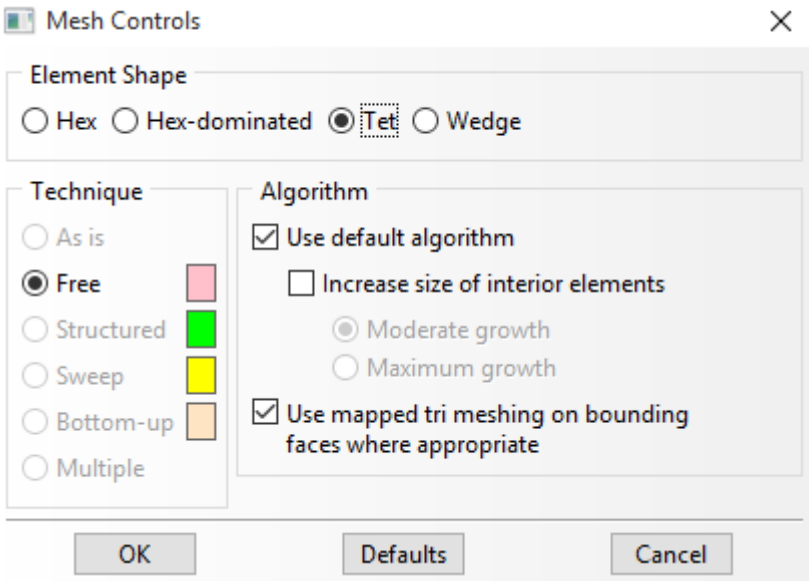


Figura 48 Menú Assign Mesh Control

Por lo tanto los elementos utilizados se denominan C3D4, ya que son de tipo continuos (C), de tres dimensiones (3D) y lineales, ya que cada elemento tiene 4 nodos y los elementos de forma tetraédrica tienen cuatro vértices.

Una vez definido el tipo de elemento que se va a utilizar para el mallado se debe definir el tamaño de dichos elementos. Para el análisis de la convergencia de la malla se irá variando el tamaño de estos elementos para obtener un número diferente de nodos y así observar la variación de la tensión máxima en función del número de nodos de la malla.

Para definir el tamaño de los elementos se debe pulsar el botón *Seed Part Instance* e introducir el tamaño deseado en el apartado *Approximate global size.*

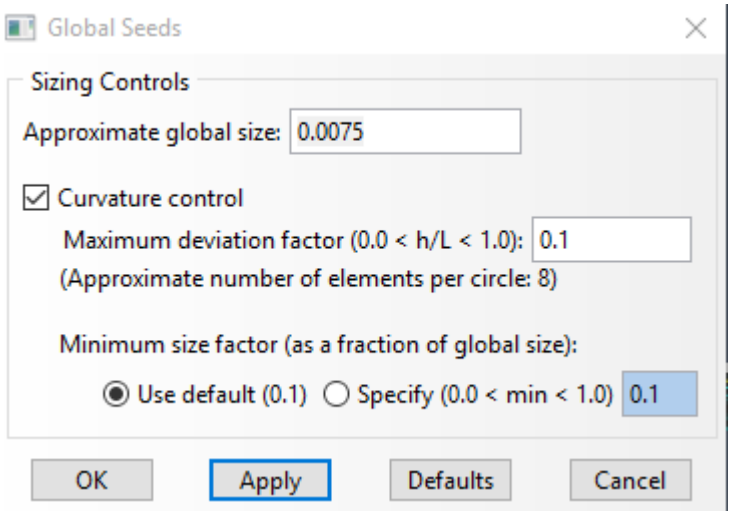


Figura 49 Menú Global Seeds

5.2.8 Definición del trabajo

Para que Abaqus comience a realizar los cálculos debemos crear un nuevo trabajo. Esto se realiza desde el módulo Job. Para ello se debe pulsar el botón Create Job desde donde se pueden definir propiedades del análisis tales como la memoria consumida, precisión, etc.

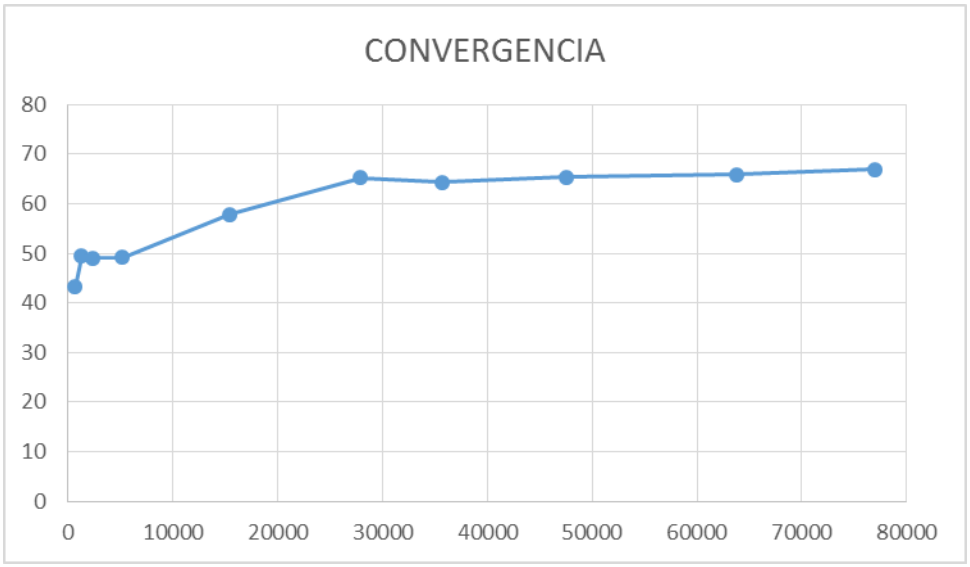
Una vez creado el trabajo, para que Abaqus proceda a la resolución del problema se debe seleccionar el botón *Job Manager* y pulsar el botón *Submit.*

5.2.9 Resultados

Para observar los resultados se debe pulsar el botón *Results* una vez Abaqus incida que ha terminado de realizar los cálculos. Eso hará que nos muestre el módulo Visualization. Para ver los valores de tensión debemos pulsar el botón *Deformed Shape* tras lo cual se mostrará en la leyenda el valor máximo de la tensión.

5.3 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE LA MALLA

A continuación se muestra la gráfica obtenida tras haber variado el número de nodos y calculada la tensión máxima.



Gráfica. Convergencia de la malla.

En la gráfica se puede observar como a partir de los 35000 nodos la malla ya alcanza la convergencia. Por lo tanto una malla eficiente estará entre los 35000 y 40000 nodos. Utilizar una malla más precisa únicamente utilizaría más memoria y ralentizaría los cálculos, sin obtener por ello un resultado más preciso.

Capítulo 6. Estudio del eje ferroviario con fisura

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a estudiar el comportamiento de un eje ferroviario cuando tiene una grieta superficial de frente recto. Se estudiará la grieta en diferentes tamaños y posiciones para obtener la variación del factor de intensidad de tensiones *K* en función de estos parámetros. Para ello se va a utilizar el método XFEM.

6.2 CONCEPTOS BÁSICOS DEL MODELADO DE GRIETAS EN ABAQUS CON XFEM

En el capítulo 3 se hizo una breve introducción al método XFEM que se ampliará en este apartado focalizando en la aplicación de este método para el cálculo del FIT en Abaqus.

Como se explicó en el capítulo 3 a la hora de mallar el modelo el método XFEM en general, y Abaqus en particular, no tiene en cuenta la grieta, pero aun así hay que definir su tamaño y posición, así como el dominio en el que se encuentra y el radio de enriquecimiento.

La grieta en Abaqus debe ser creada como una parte plana sin espesor y por eso se crea como tipo Shell. Abaqus detecta automáticamente la posición de la grieta utilizando el *Level set Method.* El Level set method de una función real es el conjunto de todos los puntos en el que la función alcanza un valor determinado. Por ejemplo, el valor cero del Level set method de la función $f(x,y) = x^2 + y^2 - r^2$es un circulo centrado en el origen y de radio r.

El Level set method utiliza dos tipos isoplanos para definir la grieta. El isoplano ϕ define las caras de la grieta y el isoplano ψ define el frente de la grieta. Ambos isoplanos son perpendiculares entre sí. En Abaqus estos isoplanos se denominan PHILSM (PHI (letra grieta) – LSM (Level set method)) y PSILSM respectivamente. En la Figura 50 se muestra un ejemplo de como Abaqus utiliza estos parámetros para calcular la posición de la grieta.

Nodo	ϕ	ψ
1	+0.25	-1.5
2	+0.25	-1.0
3	-0.25	-1.5
4	-0.25	-1.0

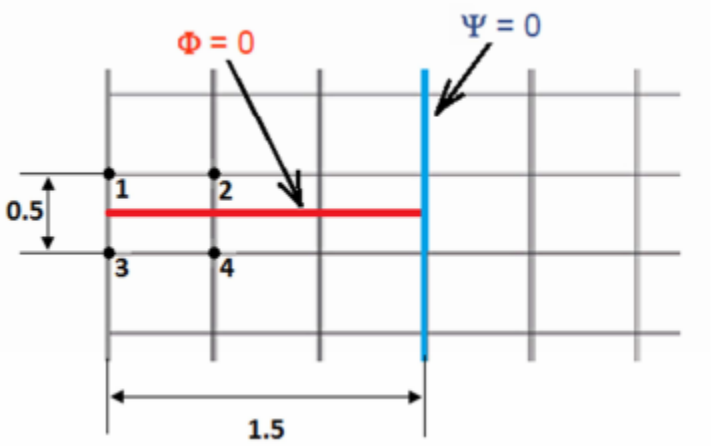


Figura 50 Level set method

El dominio de la grieta define la posición donde las características de enriquecimiento se pueden añadir a la aproximación por elementos finitos, es decir, la región en la que una grieta se puede describir con XFEM. Este debe ser especificado por el usuario y para grietas estacionarias el análisis de grietas debe contener una grieta existente.

El radio de enriquecimiento es el radio de la punta de la grieta y define los nodos que actuaran como punta de la grieta. En Abaqus el valor del radio puede especificarse o dejarse por defecto, con lo que el programa tomara como valor del radio de enriquecimiento tres veces la longitud característica de un elemento, siendo la longitud característica de un elemento la línea que lo atraviesa.

Por último se debe especificar el número de contornos que se incluyen en el dominio para el cálculo del FIT. Este parámetro controla el número de anillos de elementos alrededor de la punta de la grieta que construyen el dominio del contorno para el cálculo del contorno integral.

El cálculo del contorno integral es una de los aspectos más importantes en un análisis de grieta estacionaria, ya que gracias a él se puede evaluar el tamaño crítico de la grieta. Para calcular el factor de intensidad de tensiones Abaqus utiliza un número finito de puntos creados por el en posiciones donde la grieta intersecta con un elemento. Estos puntos Abaqus los llamara XFEM seguidos por el número que le corresponda a cada uno. El dominio del contorno para el volumen integral se crea con los anillos de elementos que rodean a la punta de grieta. En la Figura 51 se muestra una representación esquemática de los anillos que forman el dominio del contorno.

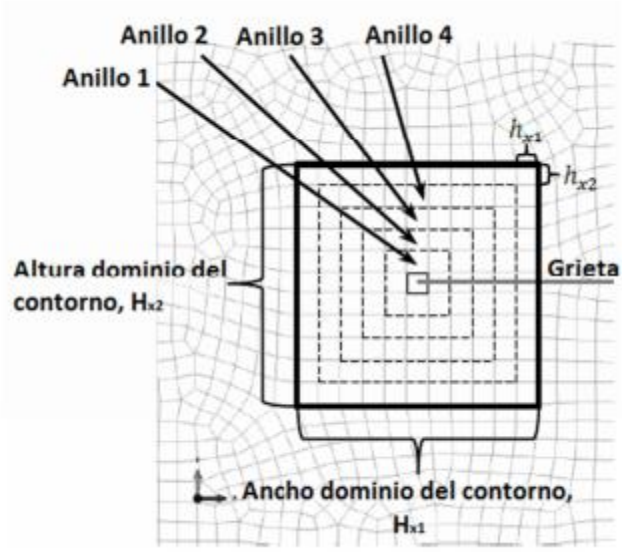


Figura 51 Dominio del contorno.

Abaqus calcula el FIT en cada uno de estos anillos. Empieza el cálculo por el primer anillo, posteriormente añade al cálculo los elementos del segundo anillo en los que no se habían realizado

los cálculos aún, y así sucesivamente hasta llegar al último anillo completando el cálculo en todo el dominio del contorno. Por lo tanto, el cálculo de los anillos posteriores al primero, contiene los cálculos realizados sobre el anillo anterior.

La teoría dice que el cálculo de la integral de contorno es independiente del tamaño del contorno siempre y cuando las caras de la grieta sean paralelas. Pero experimentalmente, por la aproximación por elementos finitos, los FIT difieren en los contornos más pequeños y alcanzan la convergencia a medida que el contorno se hace más grande. Por lo tanto los primeros contornos son menos fiables que los últimos contornos.

6.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para la realización de este estudio también se utilizará el eje ferroviario simplificado por lo que algunas partes de la creación de este problema son iguales que en el capítulo 5.

La grieta se ha posicionado en el primer cambio de sección del eje ya que este es uno de los puntos de máxima tensión. En la Figura 52 se muestra la posición longitudinal de la grieta, la cual no va a variar a lo largo de todo el estudio.

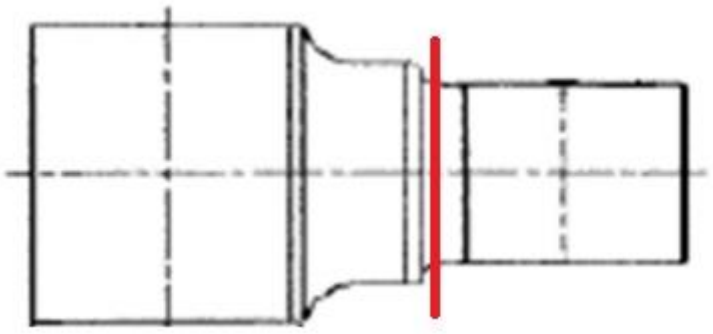


Figura 52 Posición longitudinal de la grieta.

La posición de la grieta que si varía a lo largo de la grieta es la angular, ya que se quiere estudiar el comportamiento del eje a lo largo de un giro completo. Como el eje es simétrico sólo se realiza el estudio en los primeros 180 grados. Se va variando el ángulo aumentando 30°, por lo tanto se realizan estudios a 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° y 180°.

Para cada una de estas posiciones angulares se han realizado 9 estudios para tamaños de grieta diferentes tal y como se muestra en la tabla siguiente.

RADIO (mm)	NIVEL DE DEFECTO	PORCENTAJE DEL RADIO	PORFUNDIDAD DE LA GRIETA (mm)
67,011	1	8,3%	5,561913
	2	16,6%	11,123826
	3	25,0%	16,75275
	4	33,3%	22,314663
	5	44,3%	29,685873
	6	55,5%	37,191105
	7	66,5%	44,562315
	8	83,3%	55,820163
	9	100,0%	67,011

Tabla. Tamaños de la grieta.

Siendo el valor del radio el correspondiente al valor del radio del eje en la posición longitudinal de la grieta.

6.3.1 Geometría del eje y creación y asignación del material

La geometría del eje no varía respecto a la utilizada en el capítulo 5, por lo tanto su creación se ha realizado siguiendo los pasos explicados en dicho capítulo.

El material utilizado también es el mismo que en el capítulo 5. Como a la parte que se va a crear para definir la grieta no se le debe asignar material, este apartado también se realiza igual que en el capítulo 5.

6.3.2 Creación de la grieta

Para crear una grieta del tipo XFEM en Abaqus se debe crear una parte dependiente que definirá su forma y tamaño. La dependencia se le asignará posteriormente en el módulo Assembly. Esta parte, a la que se ha llamado “Grieta”, no debe tener espesor, por lo tanto se debe crear esta parte como tipo Shell y plana. Para ello, desde el módulo Part, se pulsa el botón Create Part y se seleccionan las opciones que se han descrito.

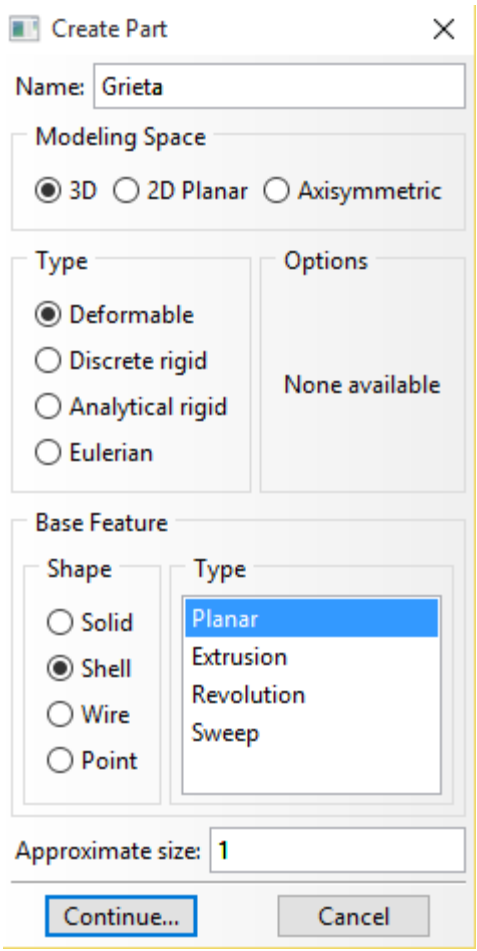


Figura 53 Creación de la parte "Grieta".

Una vez seleccionadas las propiedades de la nueva parte que se va a crear se procede a diseñar su sección. Como en este proyecto se va a estudiar el comportamiento del eje bajo el efecto de una grieta de frente recto la sección de la grieta tendrá una forma rectangular, lo suficientemente larga como para que atraviese el eje transversalmente y tan profunda como exija el tamaño de fallo en el que nos encontremos.

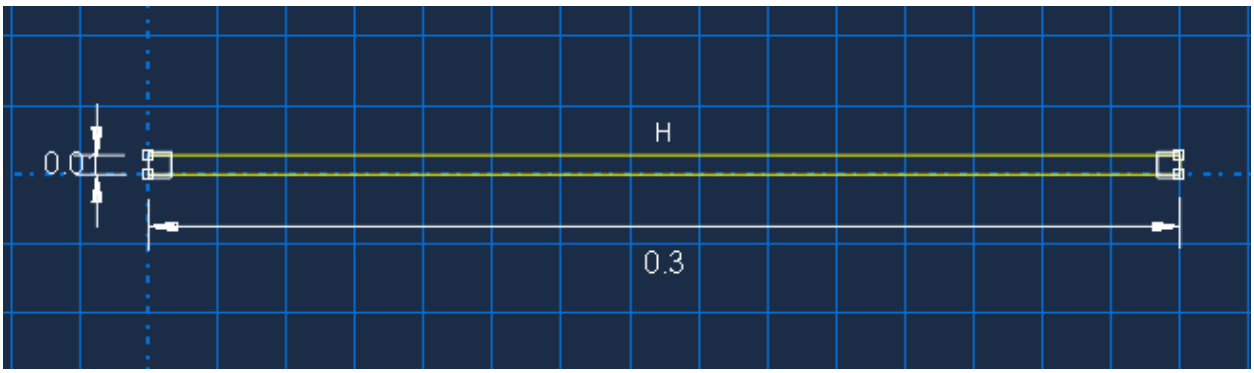


Figura 54 Dibujo de la grieta.

6.3.3 Creación de particiones

La primera partición que se debe crear es la que corresponde a la posición longitudinal de la grieta. Para ello se debe crear un plano perpendicular al eje y a la distancia deseada de su extremo. Esto se realiza con la herramienta *Create Datum Plane: Offset From Principal Plane* con la que se crea un plano a una distancia especifica del plano principal que se desee. En la Figura 55 se observa en rojo la partición creada.

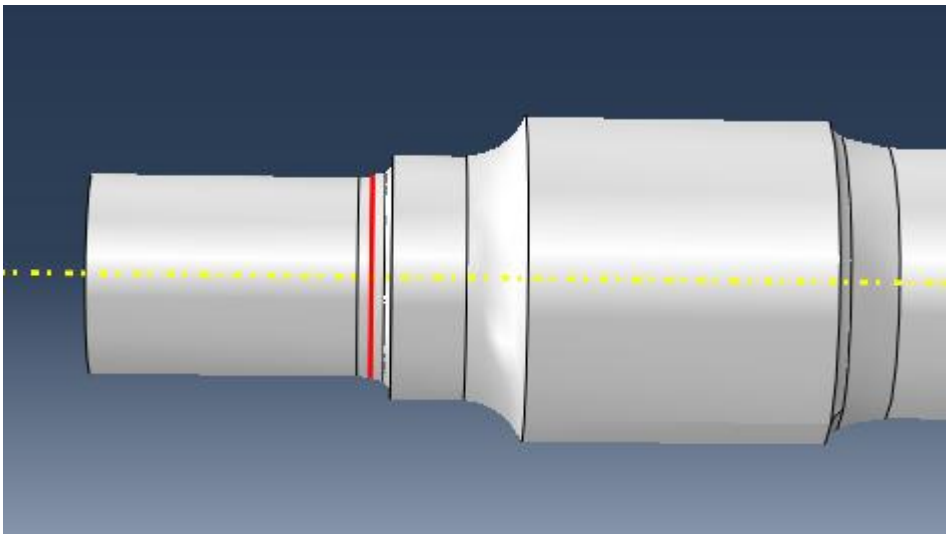


Figura 55 Partición para la posición longitudinal de la grieta.

Una vez creada esta partición, se debe dividir para crear los puntos donde se colocará la grieta cada vez que cambien de posición angular. Para dividir esta partición cada 30 grados primero debemos crear los planos que servirán para realizar estas divisiones. Para crear un plano con una desviación angular respecto de uno de los planos principales se debe seleccionar la opción *Create Datum Plane: Rotate From Plane*, tras lo cual crearemos planos cada 30 grados hasta llegar a los 180°

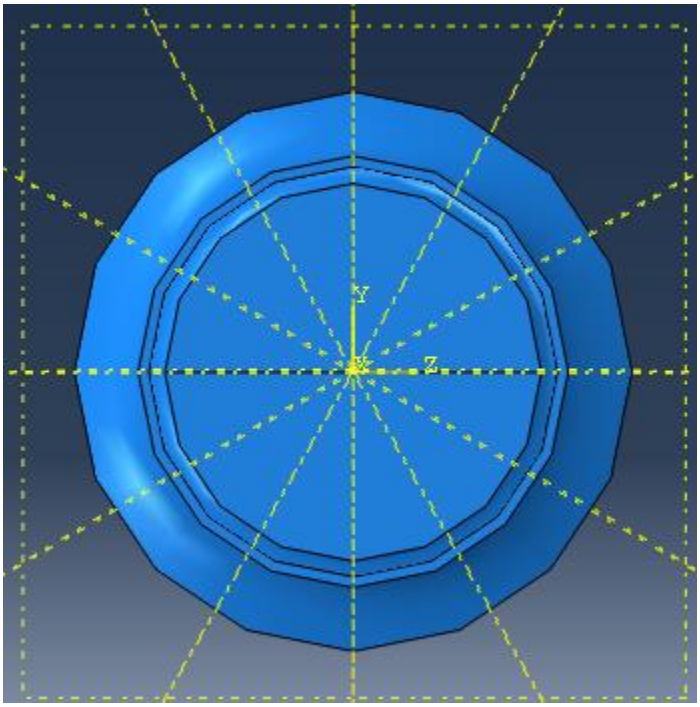


Figura 56 Eje Ferroviario con particiones angulares.

Una vez creados los planos se deben realizar las divisiones en la partición creada. Para ello se pulsa el botón *Partition Edge: Use Datum Plane* , se selecciona la partición y posteriormente se van eligiendo uno a uno los planos creados.

6.3.4 Ensamblaje de entre eje y grieta.

Una vez realizadas las particiones y los puntos de referencia se debe proceder a crear el modelo con las dos instancias: el eje y la grieta. De cada instancia se debe especificar si es dependiente o independiente. Como se ha dicho anteriormente, la grieta será una parte dependiente del eje. Por lo tanto, para especificar estas condiciones, se debe seleccionar el botón Instance Part , tras lo cual aparecerán las diferentes partes que se han creado y la opción de crear la instancia como dependiente o independiente. También aparece una casilla llama Auto-Offset
From other instances que al marcarla hará que las nuevas instancias que se introduzcan no aparezcan en la misma posición que están otras instancias ya creadas. Si no se selecciona esta

casilla las instancias aparecerán en el origen de coordenadas, independientemente de si ahí ya se encuentra otra instancia.

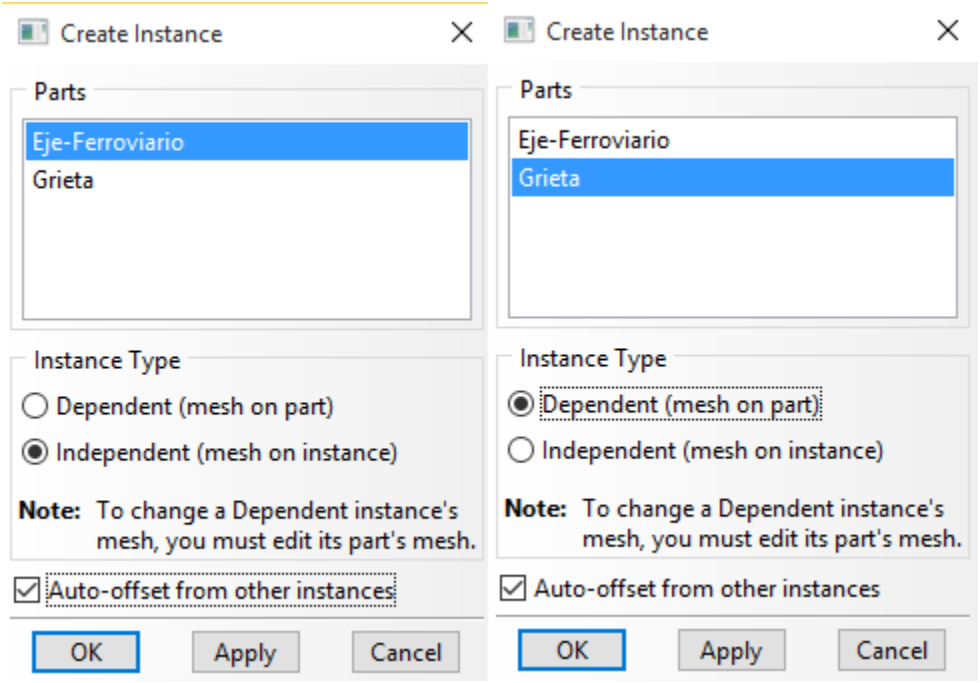


Figura 57 Crear instancias.

Una vez creadas las instancias se deben colocar de la forma correcta. El eje se colocará en el origen de coordenadas por lo tanto no es necesario moverlo. Sin embargo, la grieta es necesario llevarla a la posición correcta. Para ello vamos a moverla con el botón Translate Instance , con el cual se debe seleccionar un punto de la grieta, en este caso el punto superior central, y posteriormente seleccionar el punto del eje al que se quiere llevar, se ha seleccionado un punto de la parte superior donde anteriormente se había creado una partición. Quedando el modelo de la siguiente forma:

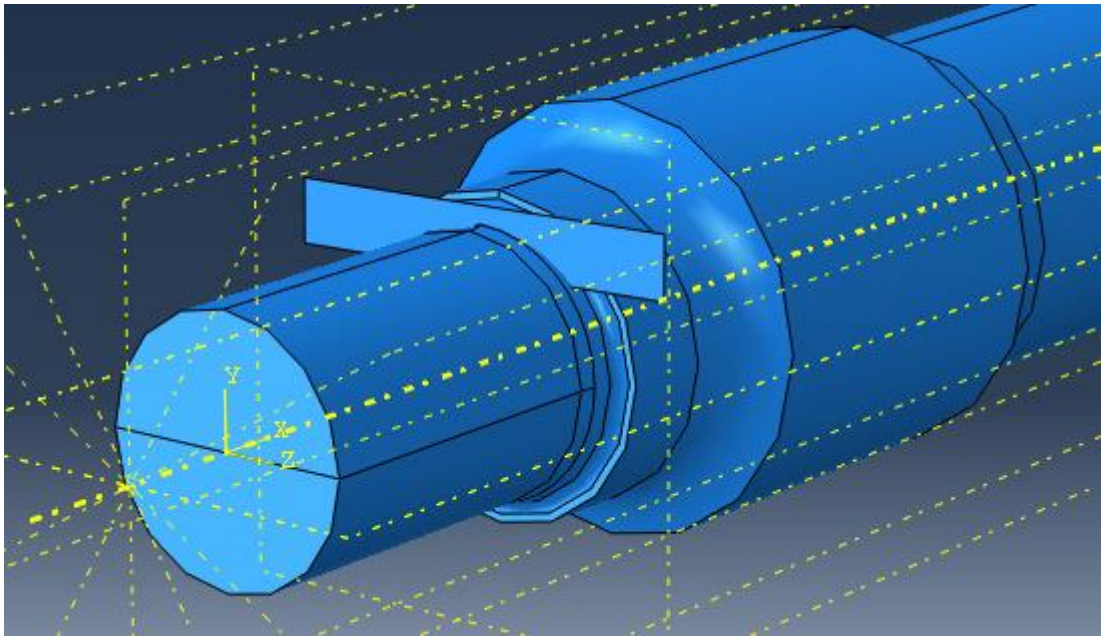


Figura 58 Instancias eje y grieta unidas.

Destacar que en ocasiones al colocar la grita de forma que coincide justamente con el punto superior de la circunferencia del eje puede ocasionar errores, por lo tanto es recomendable aumentar su altura. Se debe aumentar la altura de la grieta ahora y no antes, puesto que así se mantiene la profundidad de la grieta y la colocación. Aumentando la altura en este punto se consigue que la grieta sobresalga de la sección transversal del eje facilitando los cálculos al programa.

Para editar ahora la forma de la parte “Grieta” debemos dirigirnos al árbol del modelo y seleccionar: Models > Model-1 > Parts > Grieta > Features > Shell Planar > Section Sketch. Sobre la opción Section Sketch hacemos clic con el botón derecho y seleccionamos Edit, tras lo cual podremos editar el boceto de la pieza como se muestra a continuación.

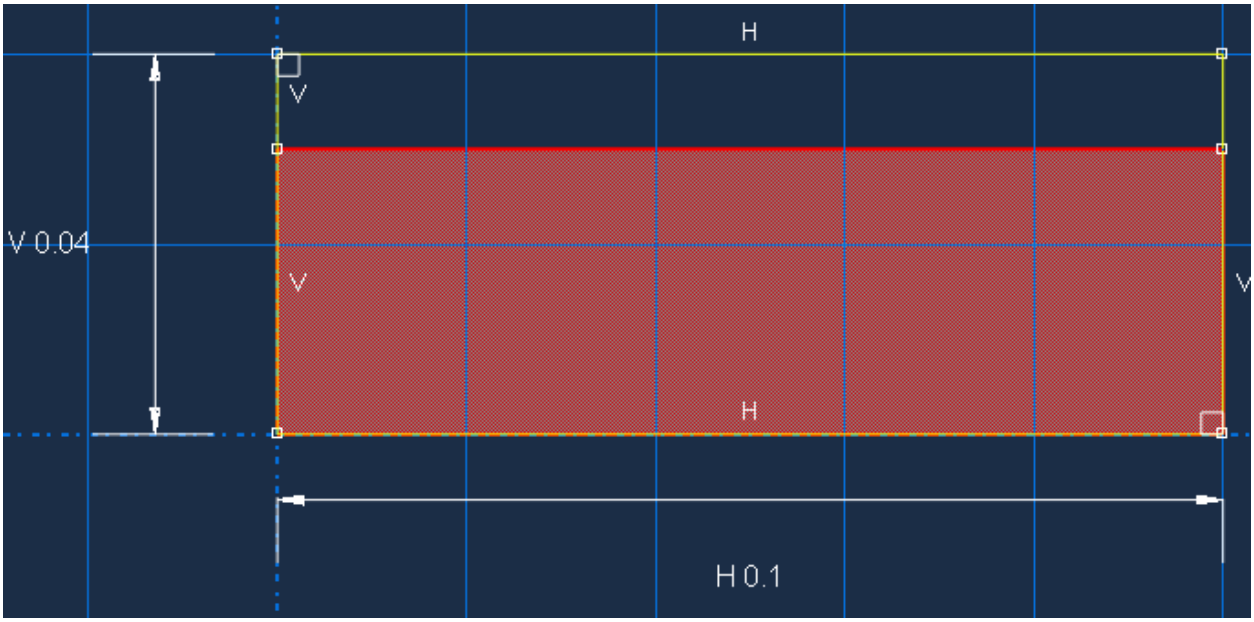


Figura 59 Modificación de la pieza "Grieta".

En la Figura 59 se observa cómo se aumenta el tamaño de la grieta por la parte superior para que el tamaño de grieta que se introduce en el eje no varíe.

6.3.5 Definición de la grieta

Una vez unidas las dos instancias se le debe indicar al programa cuál de ellas es la grieta. Esto se hace desde el módulo Interaction, en el cual, en la barra Menú Principal situada en la parte superior de la pantalla, aparecerá el menú Special y dentro de este menú se debe seleccionar Crack > Create. Una vez elegidas estas opciones, el programa nos permite elegir el tipo de grieta que se quiere realizar, es este caso XFEM.

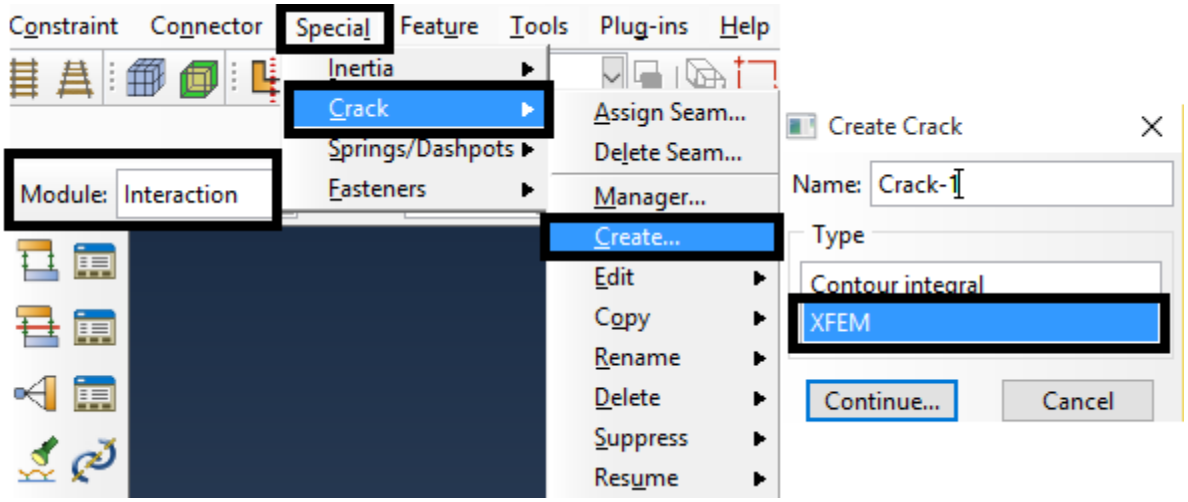


Figura 60. Creación de grieta.

Una vez seleccionado el tipo de grieta se debe definir la grieta. Para ello primero nos pide definir el dominio de la grieta, que en este caso es el eje (Zona roja de la Figura 61), tras lo cual nos aparecerá un menú para editar el comportamiento de la grieta.

La casilla Allow crack growth aparece marcada por defecto y no es posible seleccionar la localización de la grieta. Esto es debido a que al estar marcada esta casilla se permite el crecimiento de la grieta, por lo tanto el programa calculará donde se producirá la grieta y como crecerá. Como en este proyecto se quiere definir una grieta preestablecida se debe quitar la selección de esta casilla, permitiendo de esta manera elegir la pieza "Grieta" en el apartado Crack location (Zona rosa de la Figura 61). Otra razón más para no seleccionar esta casilla es que el programa no permite calcular el FIT si esta casilla está marcada.

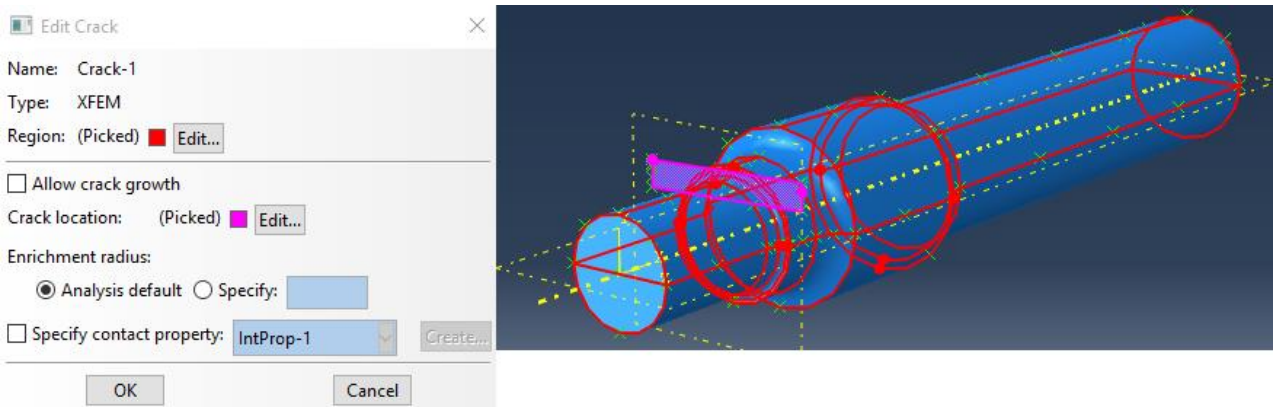


Figura 61 Definición de la grieta.

Como se puede observar en la Figura 61 el radio de enriquecimiento se deja por defecto y no se especifican propiedades en el contacto.

6.3.6 Definición del paso

Para ayudar a la convergencia en los problemas de grietas en el método XFEM se deben variar algunos parámetros cuando se crea el Step.

Para crear un nuevo paso se debe pulsar el botón Create Step . En el caso de este proyecto se ha seleccionado un estudio estático, para ello se selecciona la opción Static General.

Posteriormente se debe editar este Step para ayudar a la convergencia. Para ello se debe aumentar el número mínimo de incrementos y disminuir el tamaño mínimo de los incrementos, como se muestra en la Figura 62.

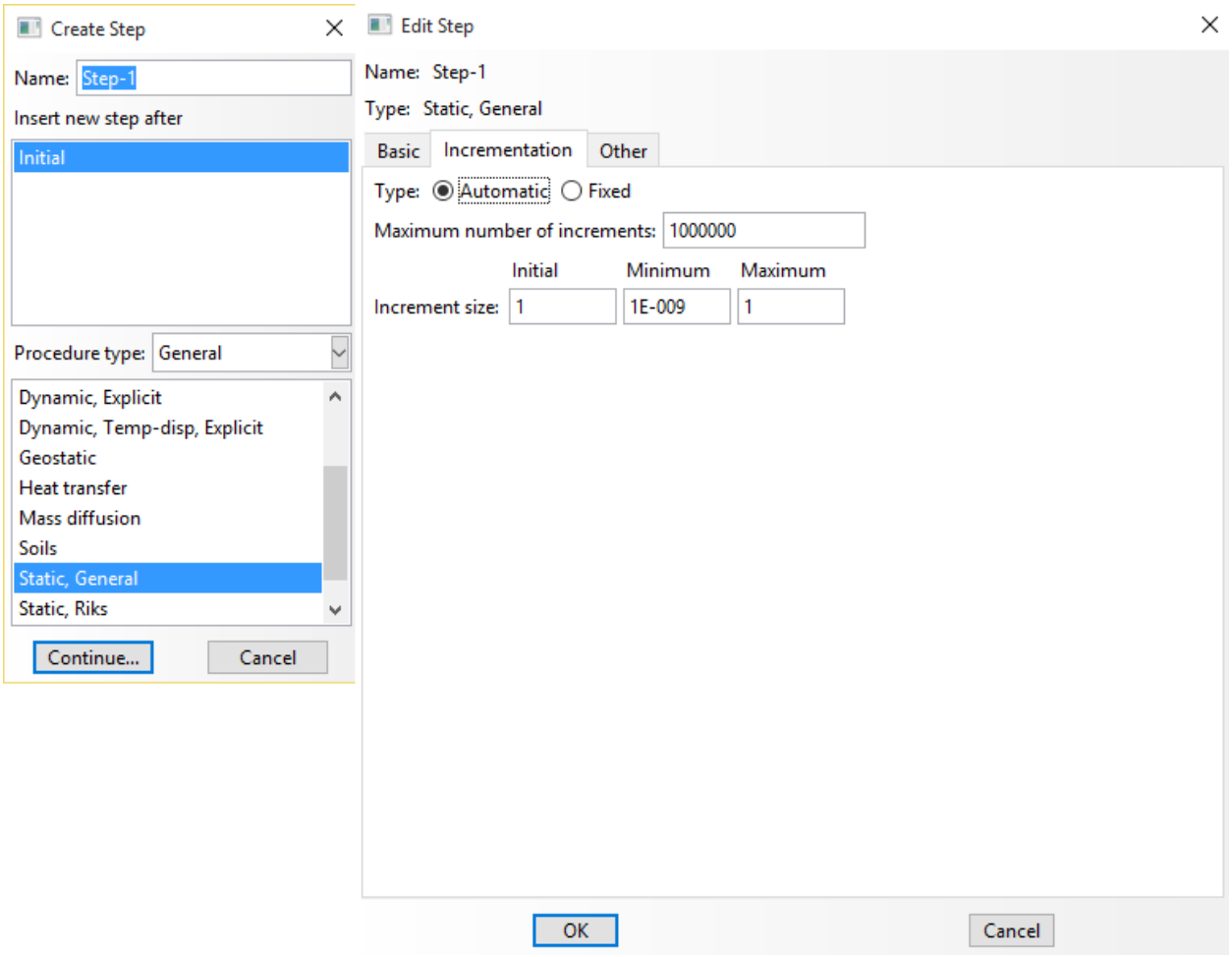


Figura 62 Creación de Step.

6.3.7 Definición de los parámetros de salida

Una vez creado el paso se deben especificar que parámetros queremos que nos calcule el programa. Como se explicó en el apartado 1.3 del Capítulo 4, existen dos tipos de parámetros de salida: History Output y Field Output. Al crear un Step se crean por defecto tanto el History Output como el Field Output, ambos definidos para todo el modelo. Estos parámetros definidos por defecto deberán cambiarse y además deberá crearse un History Output adicional para la grieta. Para editar el Field Output creado por defecto se debe ir al árbol de trabajo y buscar: Field Output Requests > F-Output-1 y al dar clic con el botón derecho del ratón seleccionar la opción "Edit". Los parámetros que se desea que calcule son:

- Stress > S, Stress components and invariants
- Displacement/Velocity/Acceleration > U, Translations and rotations
- Failure/Fracture > PHILSM, Level set value phi
- State/Field/User/Time > STATUSXFEM, Status of xfem element

A continuación se debe editar el History Output creado por defecto para todo el modelo. Para ello en el árbol del modelo se busca History Output Requests > H-output-1 y al igual que para el Field Output, al dar clic con el botón derecho del ratón se selecciona "Edit". Por defecto estará marcada la casilla "Energy", se debe quitar la marca a esta casilla y seleccionar "Failure/Fracture".

Por último se debe crear el History Output de la grieta. Para ello se hace clic derecho sobre History Output Requests, en el árbol del modelo, y se selecciona la opción "Create".
Se debe especificar que el dominio sobre el que se van a realizar los cálculos de los parámetros que se indiquen es la grieta y esto se hace seleccionando Domain > Crack > Crack-1. También se debe indicar que se desean los valores tras haber realizado todos los cálculos, por lo tanto seleccionamos Frequency > Last increment. Especificamos que el número de contornos sean 12 y que el parámetro de salida que se desea es el Factor de Intensidad de Tensiones.

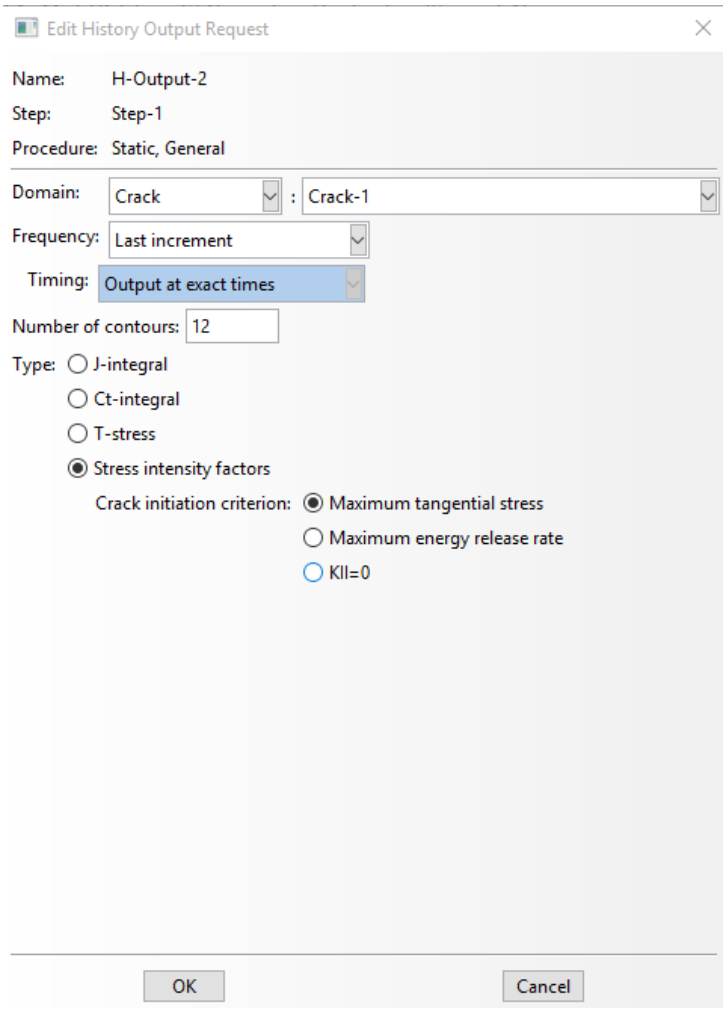


Figura 63 Creación de History Output para la grieta

A continuación se muestra una imagen del árbol del modelo tras haber modificado los parámetros de salida y haber creado el History Output para la grieta (H-Output-2).

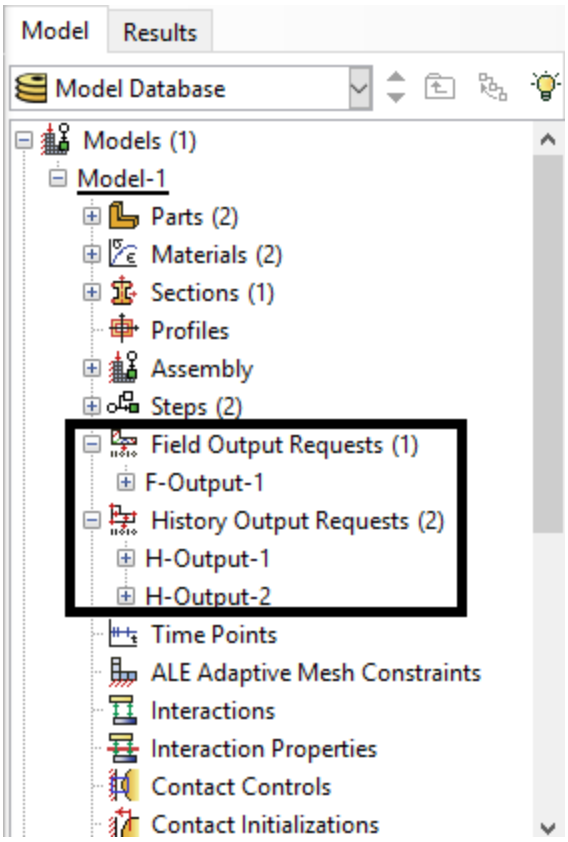


Figura 64 Parámetros de salida en el árbol del modelo.

6.3.8 Definición de las condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno no varías respecto a las creadas en el capítulo 5.

6.3.9 Mallado del conjunto.

Para el mallado del conjunto se utilizan los mismos elementos que se utilizaron en el capítulo 5 (C3D4). Si varía el tamaño de los elementos. Como se ha visto en el análisis de convergencia se debe buscar una malla aproximadamente 35000-40000 nodos. Se ha seleccionado un tamaño de elementos de 0.008 consiguiendo una malla de 42771 nodos.

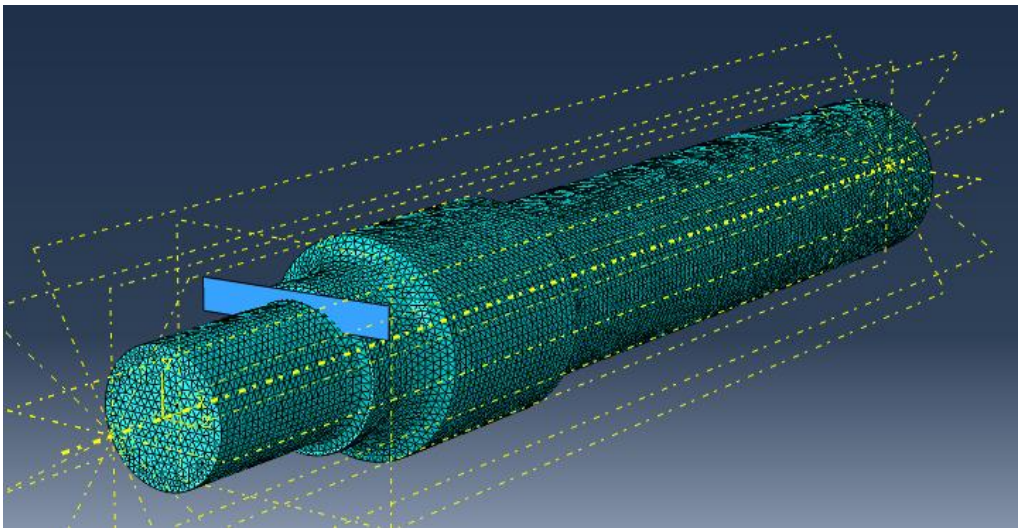


Figura 65 Conjunto mallado.

6.3.10 Creación del trabajo.

Una vez está terminado el diseño y la discretización del modelo es necesario definir un trabajo para que Abaqus realice los cálculos.

Para crear un trabajo hay que ir al módulo Job y seleccionar el botón Create Job . Cuando ya se ha creado el nuevo trabajo se debe seleccionar el botón Job Manager y pulsar "Submit" tras lo cual Abaqus comenzará los cálculos. Una vez terminados los cálculos, para ver la solución, se debe pulsar el botón "Results".

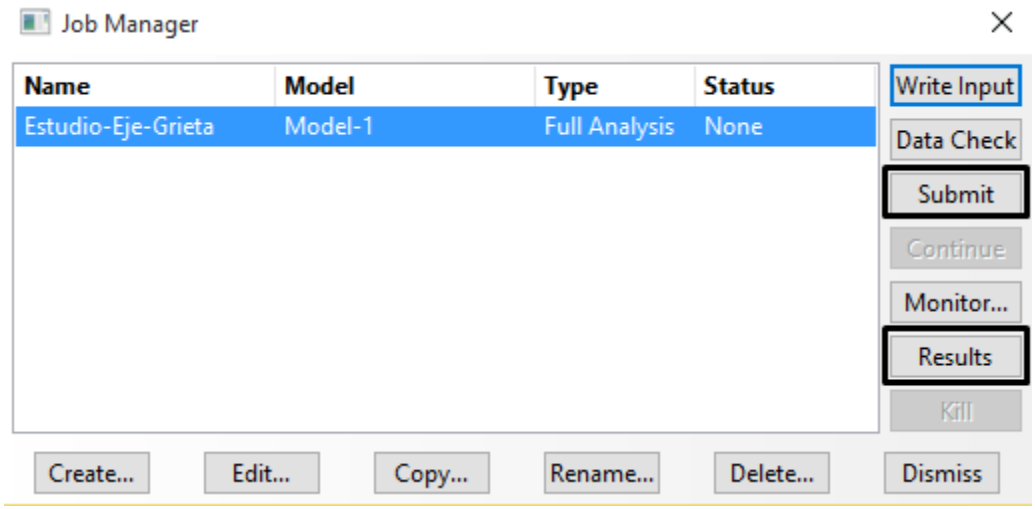


Figura 66 Menú Job Manager.

6.4 VARIACIONES DE LA GRIETA

Como se ha explicado anteriormente la grieta se va a posicionar en 7 posiciones angulares diferentes y en cada una de estas posiciones tendrá 9 tamaños. A continuación se explica cómo se realizan estas variaciones en el tamaño y la posición de la grieta.

6.4.1 Variación de tamaño

En el apartado 6.2.4 se ha explicado como variar la altura de la grieta sin afectar a la posición. Cambiar la profundidad es similar pero se debe variar la zona inferior del boceto de la grieta.

6.4.2 Variación de posición

La variación de la posición angular se realiza desde el módulo Assembly. Para posicionar correctamente la grieta primero se debe rotar 30°. La rotación de las partes se realiza con la herramienta *Rotate Instance* con la cual se debe seleccionar la parte que se desea rotar, posteriormente elegir un eje sobre el que va a rotar, en este caso se crea un eje a partir de un punto y una dirección, el punto es el correspondiente al centro de la cara inferior de la grieta y el eje el Z. Por último se debe indicar cuantos grados se desea girar la parte.

Una vez girada la parte se debe colocar en la posición correcta. Para ello se utiliza la herramienta *Translate Instance* que se explicó en el apartado 6.2.4.

6.5 OBTENCIÓN RESULTADOS

Para los cálculos sobre la grieta Abaqus crea una serie de puntos de referencia sobre los que realiza los cálculos. Estos puntos los llama XFEM. Abaqus devuelve el valor del FIT para cada uno de estos puntos, por lo tanto lo primero que se debe conocer es la posición de estos puntos.

Para conocer las coordenadas de los puntos XFEM se debe ir al menú “Result” de la Barra de Menú Principal.

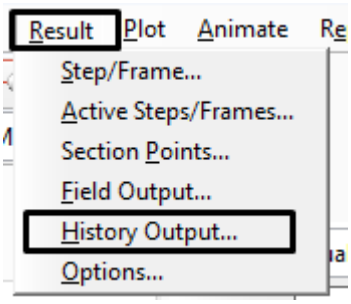


Figura 67 Resultados del History Output.

Aparecerá una ventana con todos los parámetros calculados que se indicaron en el módulo Step. En este momento se seleccionan los parámetros de las coordenadas en los tres ejes de los todos puntos XFEM y se pulsa el botón “Plot”. Esto hará que el programa nos muestre una gráfica con todos los parámetros seleccionados.

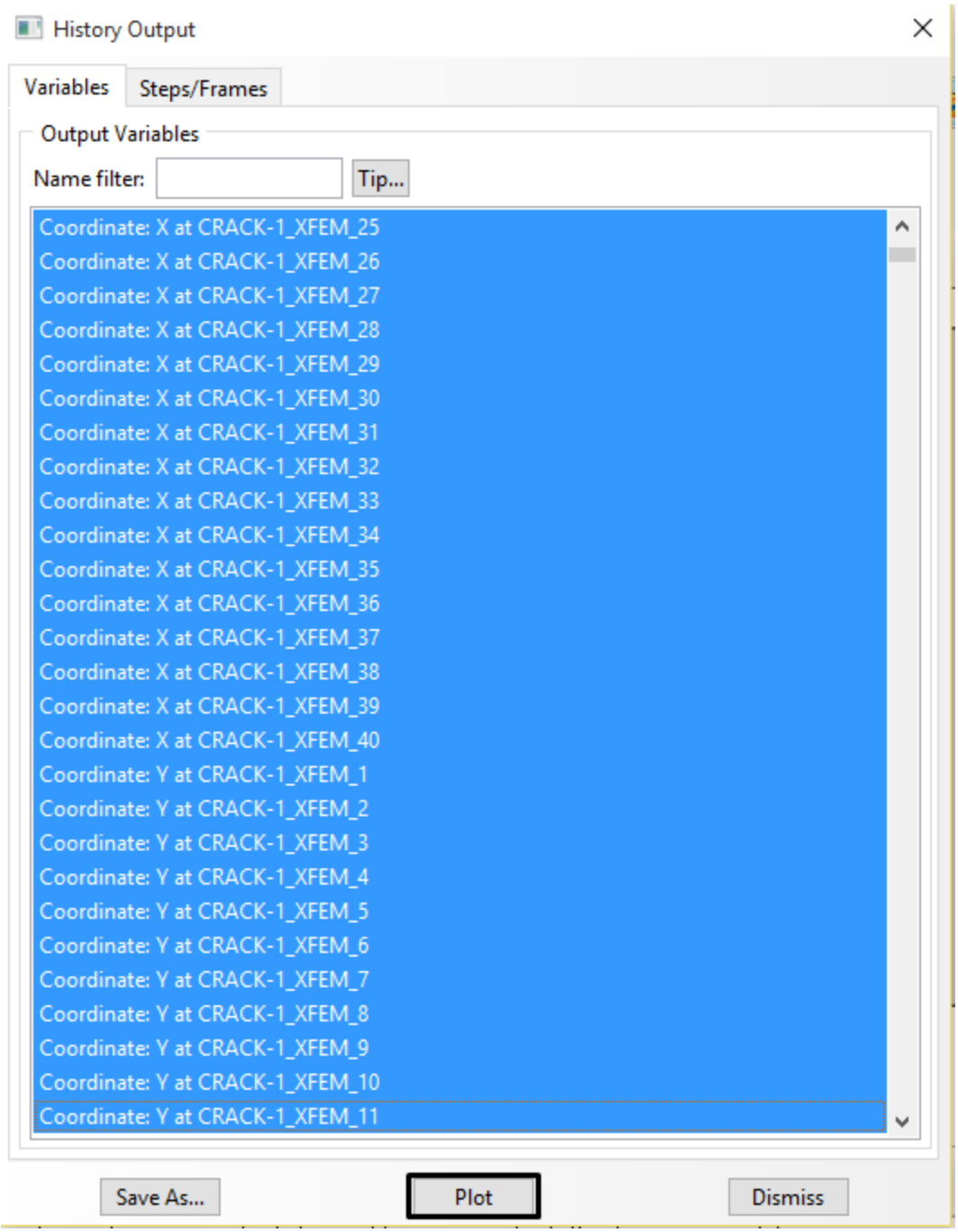


Figura 68 Selección de los parámetros.

Pero para el mejor manejo de los datos se desean obtener los valores de estos parámetros en una tabla. Para ello se debe seleccionar el botón Create XY Data y en el menú que aparece la opción Operate en XY Data. En esta nueva pantalla se debe seleccionar la expresión “append ((X, X,…))”, lo que nos permitirá agrupar todos los datos, posteriormente se seleccionan todos los datos

de las coordenadas y se añaden a la expresión pulsando el botón “Add to Expresion”. Después se debe pulsar el botón “Plot Expresion”. Con esto se consigue que se muestre una gráfica todos sus puntos unidos.

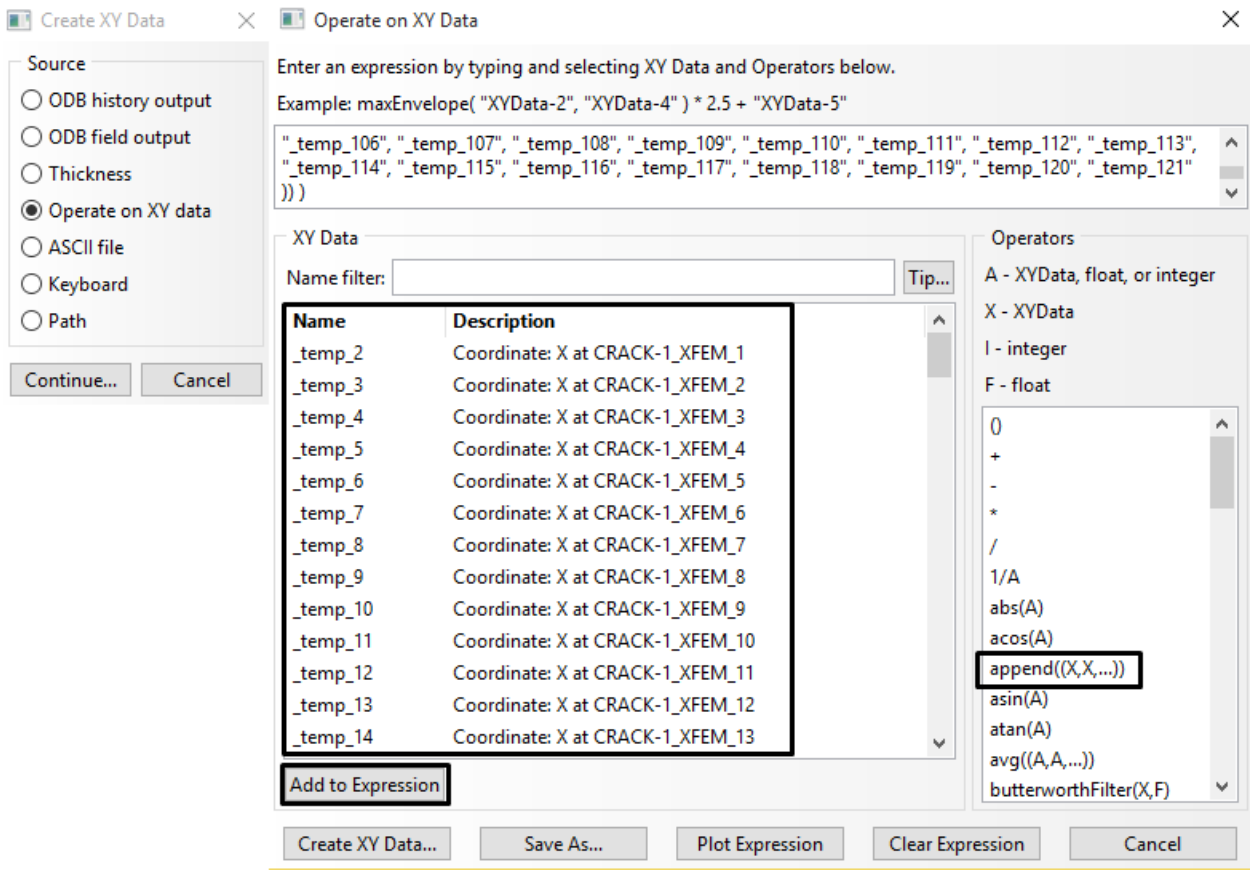


Figura 69 Generación de tabla de datos.

La tabla de datos ya se ha generado, pero para ver esta tabla se debe ir al árbol de resultados y hacer clic con el botón derecho sobre XY Data > _temp_1 y seleccionar “Edit”. En la columna Y se muestran los valores de las coordenadas de los puntos XFEM.

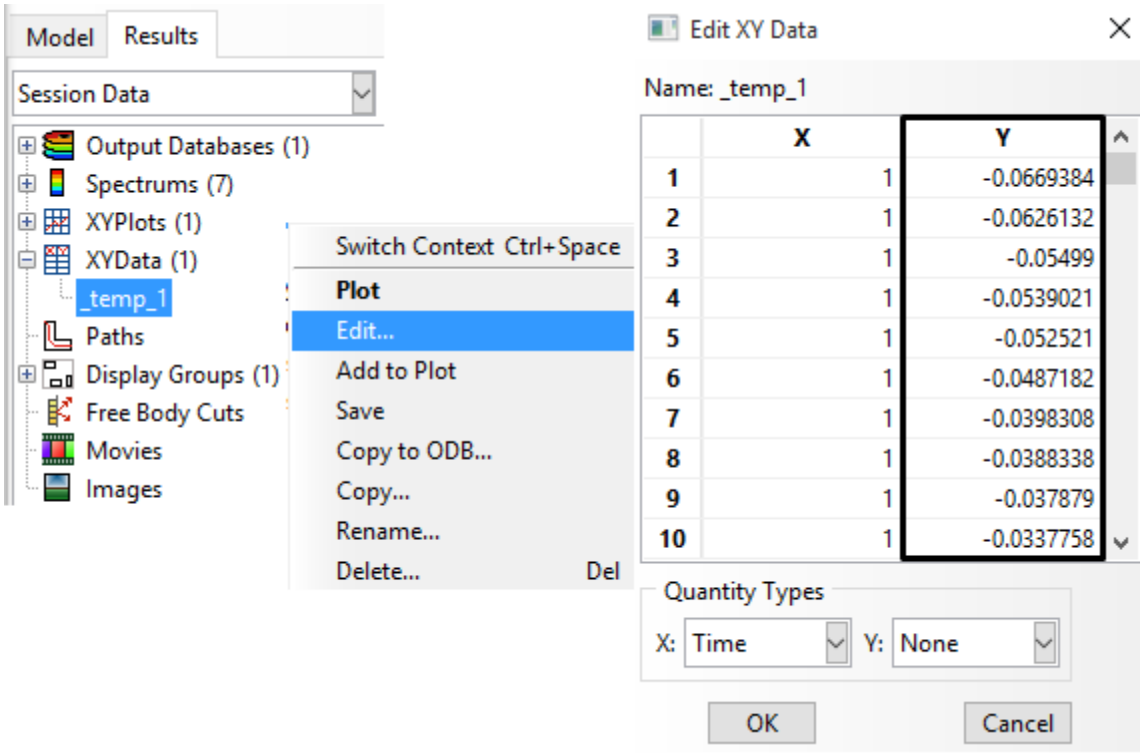


Figura 70 Tabla de coordenadas de los puntos XFEM.

En esta tabla se muestran seguidas las coordenadas de los tres ejes. Para una cantidad n de puntos XFEM habrá 3·n datos en esta tabla. Los primeros X puntos corresponderán a la coordenada X, los siguientes n puntos a la coordenada Y y los últimos a la Z.

Para obtener el factor de intensidad de tensiones se debe volver a ir a Results>History Output… donde se pueden encontrar los resultados del factor de intensidad de tensiones para cada punto XFEM en cada contorno creado. Para ordenar los datos se deben seleccionar los datos de cada contorno por separado. Para seleccionar un contorno determinado se debe introducir la función *_XX, siendo XX el número del contorno deseado. Por ejemplo, para observar los resultados del primer contorno se debe escribir *_01 (el 0 es necesario en el caso de que haya más de 9 contornos). Se deben seleccionar todos los valores del factor de intensidad de tensiones K1 para todos los puntos XFEM.

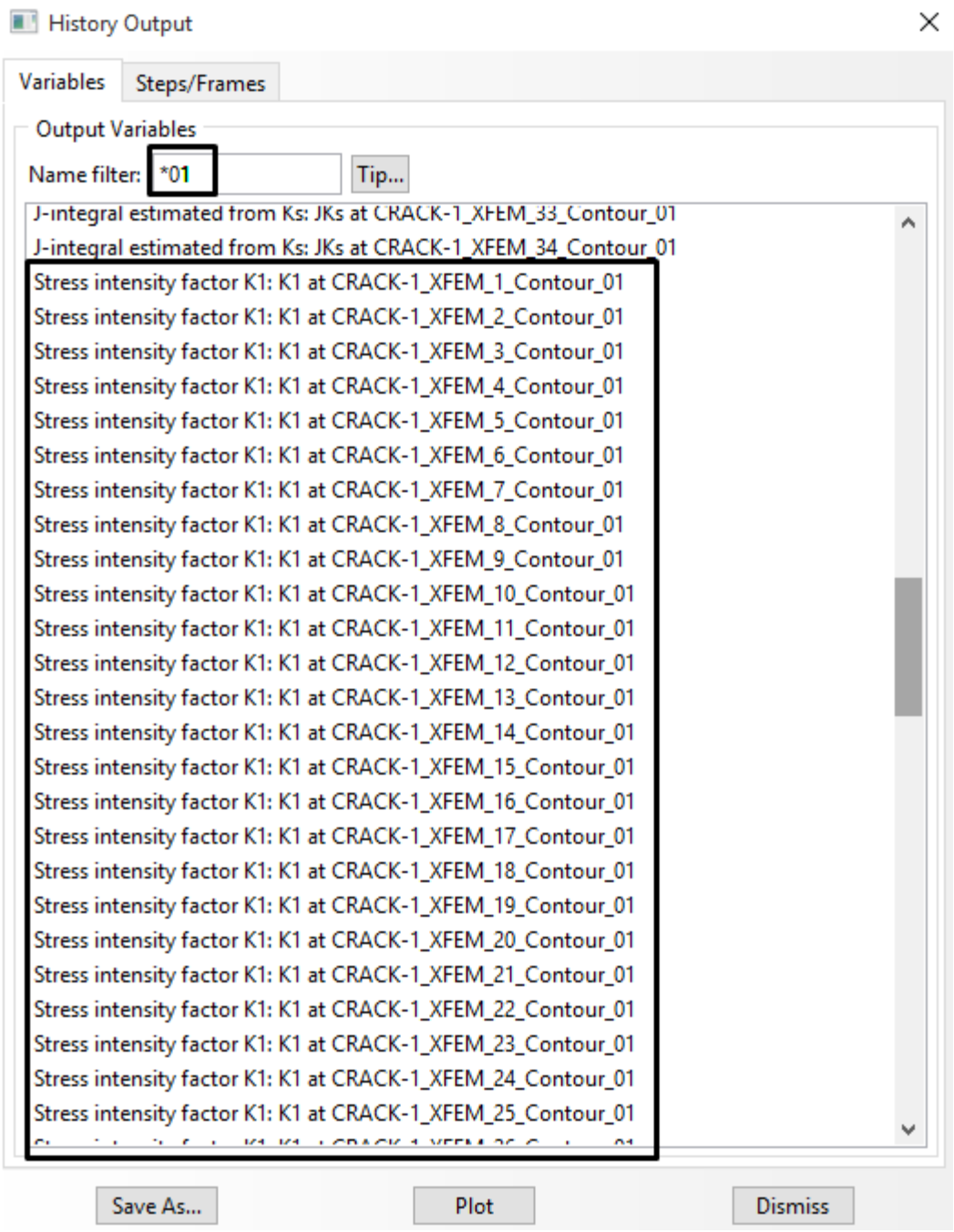


Figura 71 Obtención del factor de intensidad de tensiones.

Una vez seleccionados los valores de todos los puntos XFEM para un mismo contorno, para obtener una tabla con los valores del FIT se deben seguir los pasos que se han expuesto anteriormente para obtener los valores de las coordenadas de los puntos XFEM.

Capítulo 7. Resultados

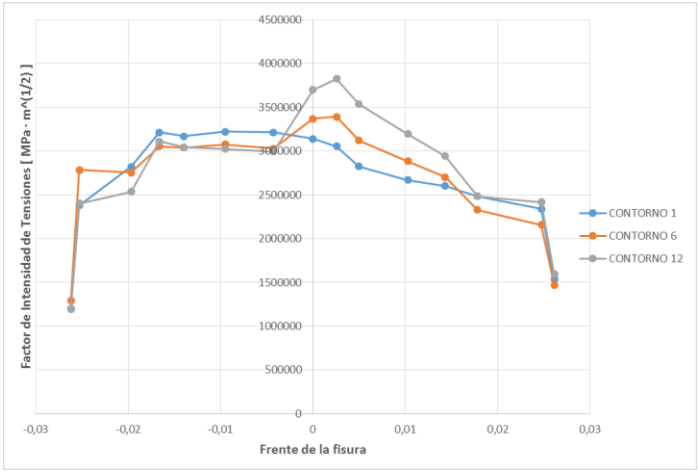
En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos del Factor de Intensidad de Tensiones para todos los tamaños de grieta en todas las posiciones en las que se ha realizado el estudio.

Es importante saber que Abaqus calcula el factor de intensidad de tensiones tanto cuando la grieta se abre como cuando se cierra, sin embargo cuando la grieta se cierra Abaqus nos devuelve valores negativos del FIT, cosa que no es posible. Estos valores negativos se deben tomar como 0, aunque para la representación de las gráficas se han mantenido los valores negativos.

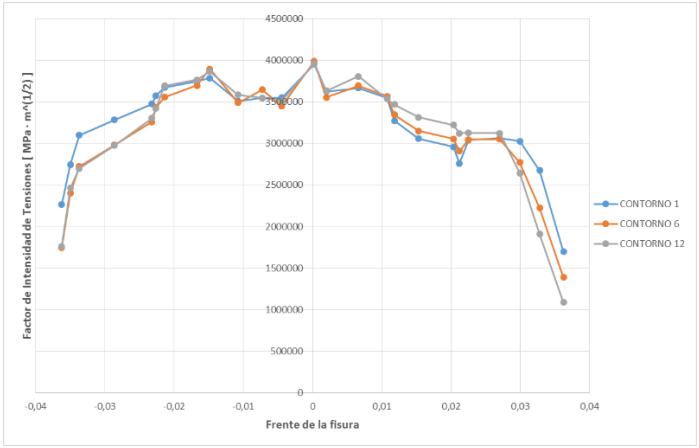
7.1 FIT EN FUNCIÓN DEL FRENTE DE LA GRIETA

A continuación se muestran las gráficas del valor de Factor de Intensidad de Tensiones representado en función de la posición en el frente de la fisura.

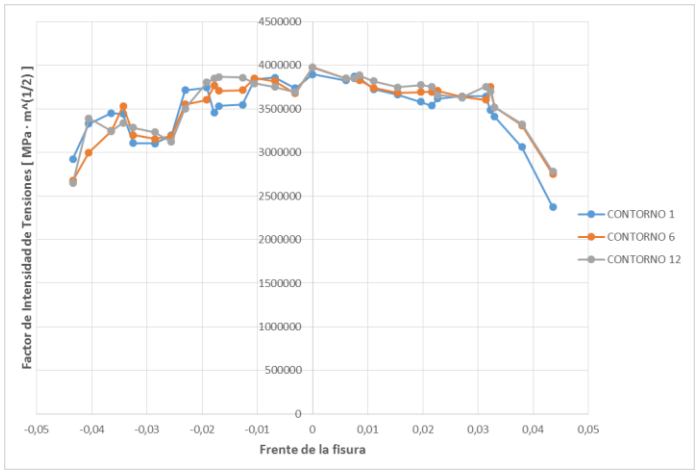
7.1.1 Posición de 0°



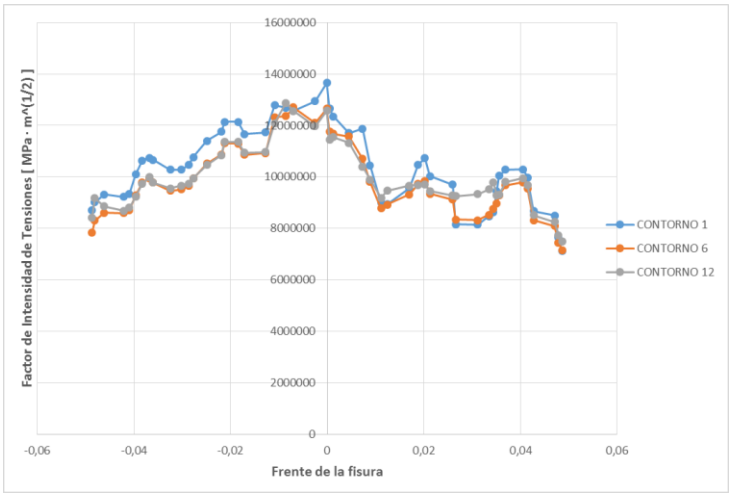
Gráfica 1 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 1



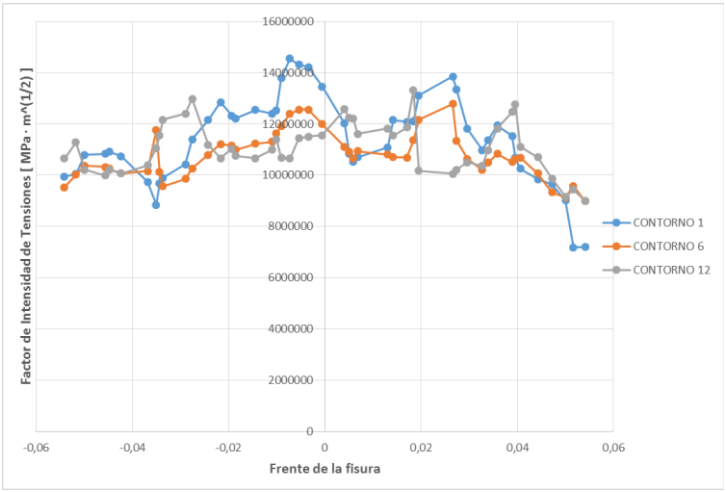
Gráfica 2 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 2



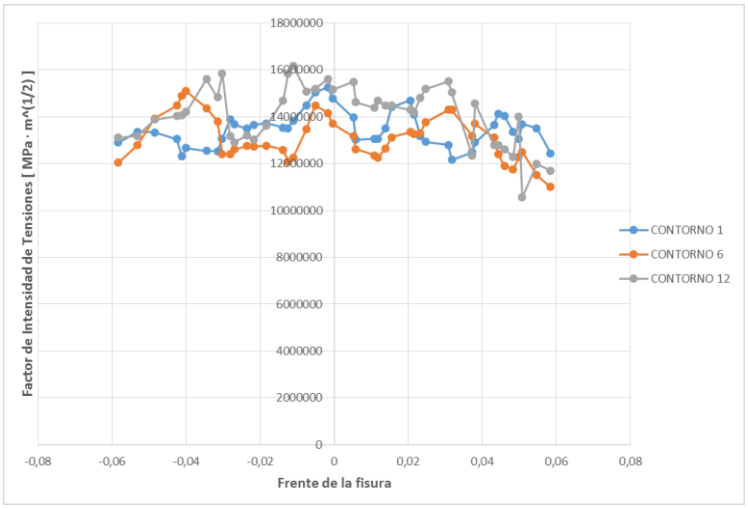
Gráfica 3 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 3



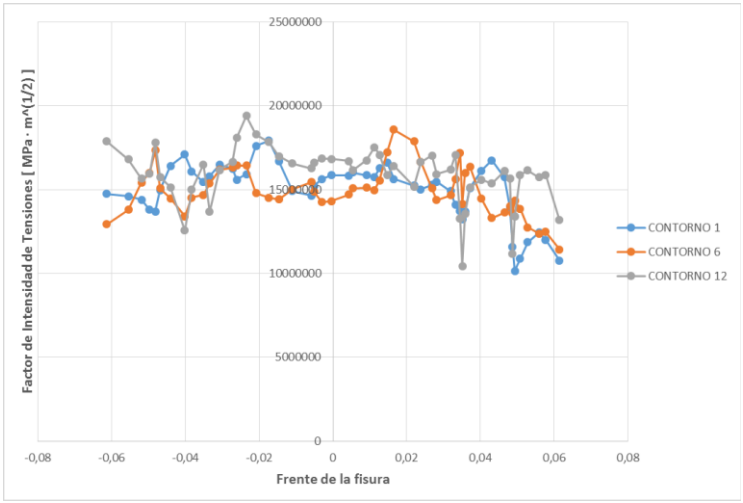
Gráfica 4 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 4



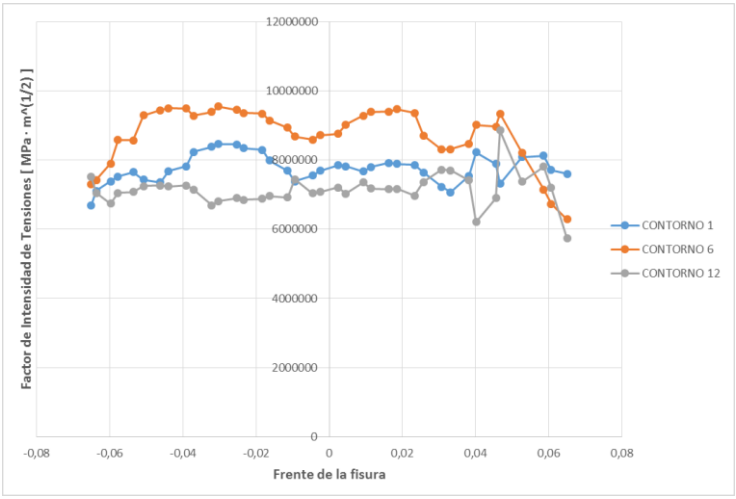
Gráfica 5 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 5



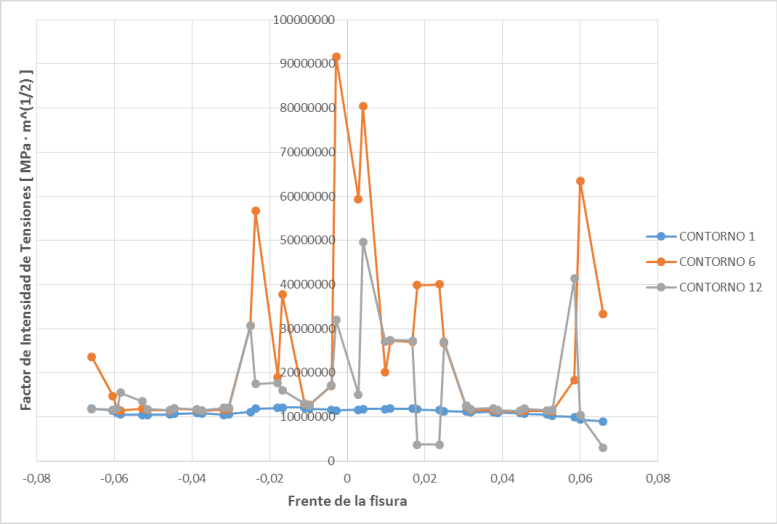
Gráfica 6 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 6



Gráfica 7 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 7

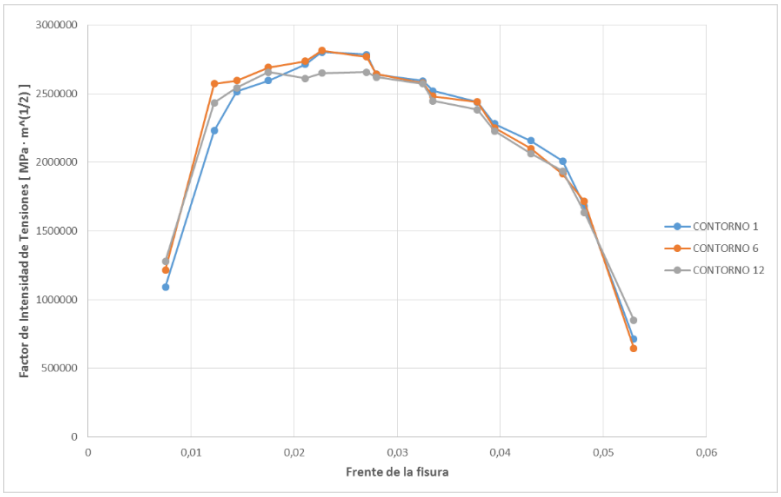


Gráfica 8 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 8

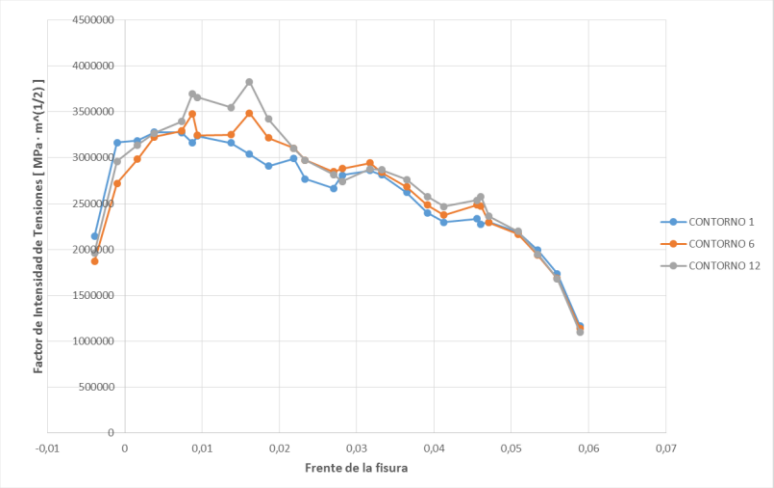


Gráfica 9 FIT para la posición de 0ª y tamaño de grieta 9

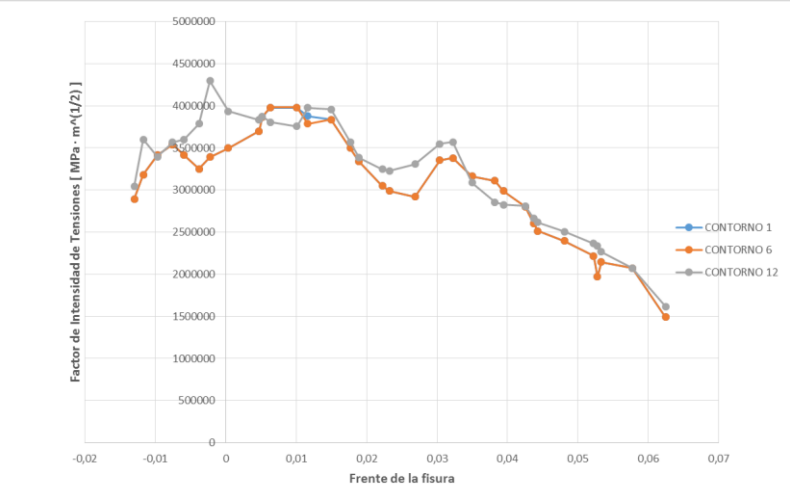
7.1.2 Posición de 30°



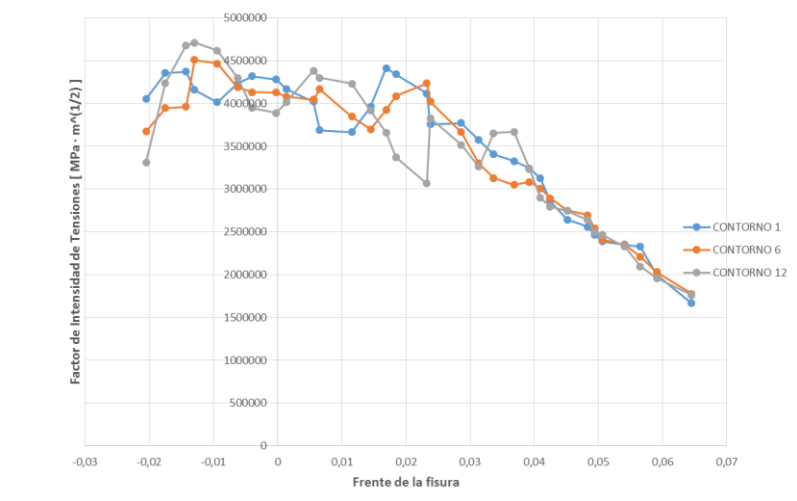
Gráfica 10 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 1



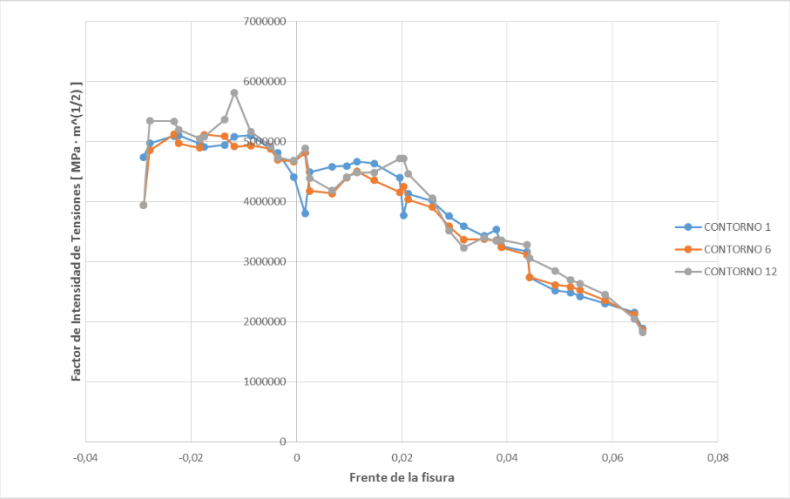
Gráfica 11 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 2



Gráfica 12 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 3

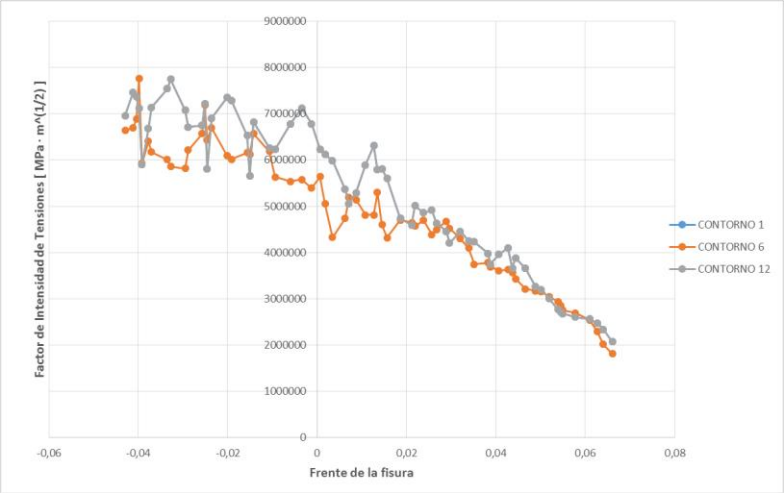


Gráfica 13 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 4

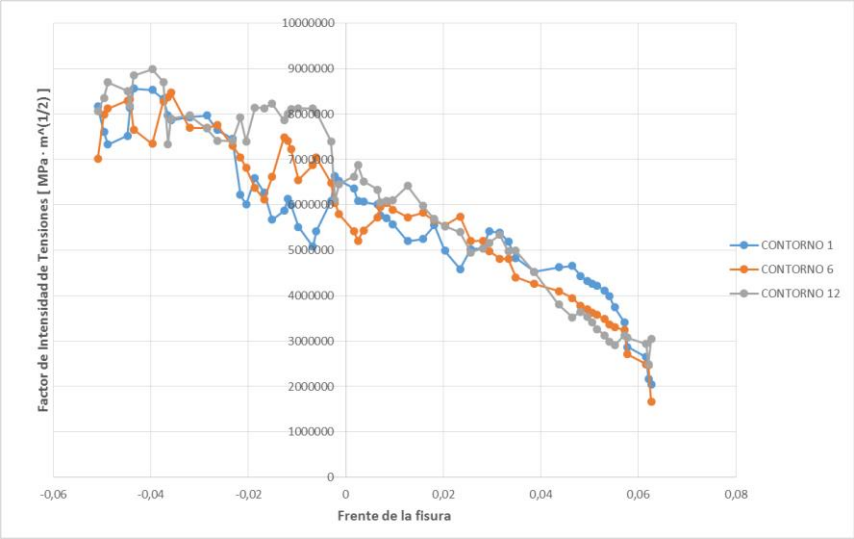


Gráfica 14 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 5

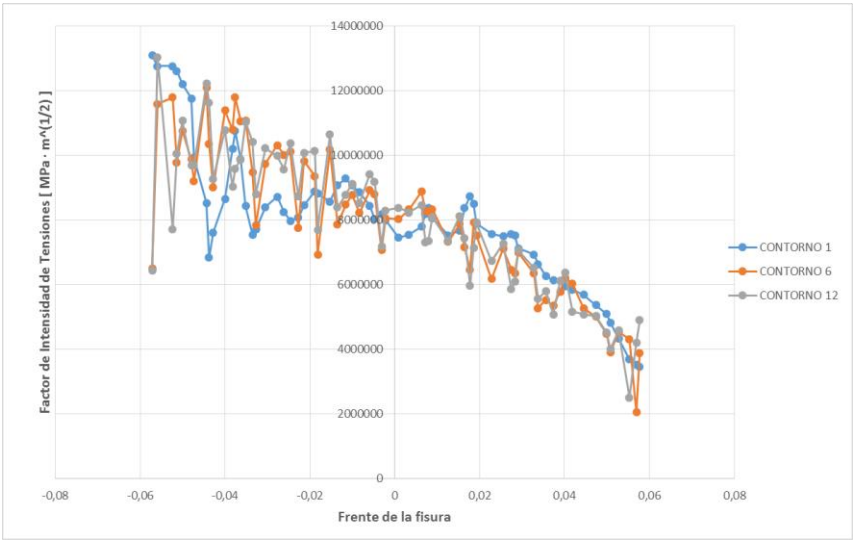
Gráfica 15 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 6



Gráfica 16 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 7

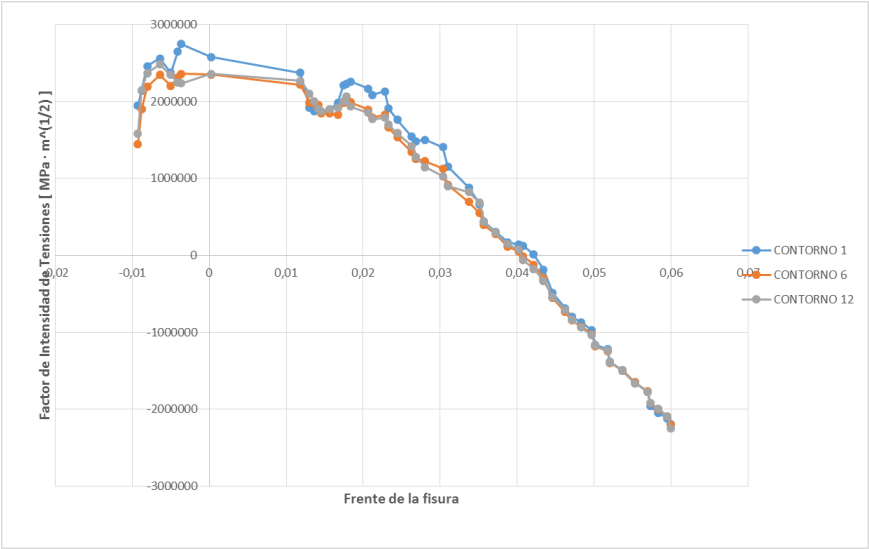


Gráfica 17 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 8

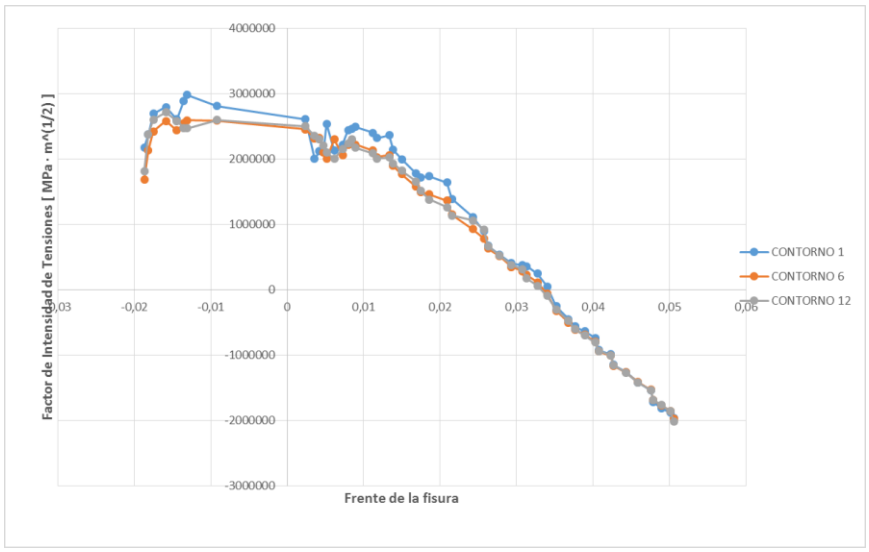


Gráfica 18 FIT para la posición de 30ª y tamaño de grieta 9

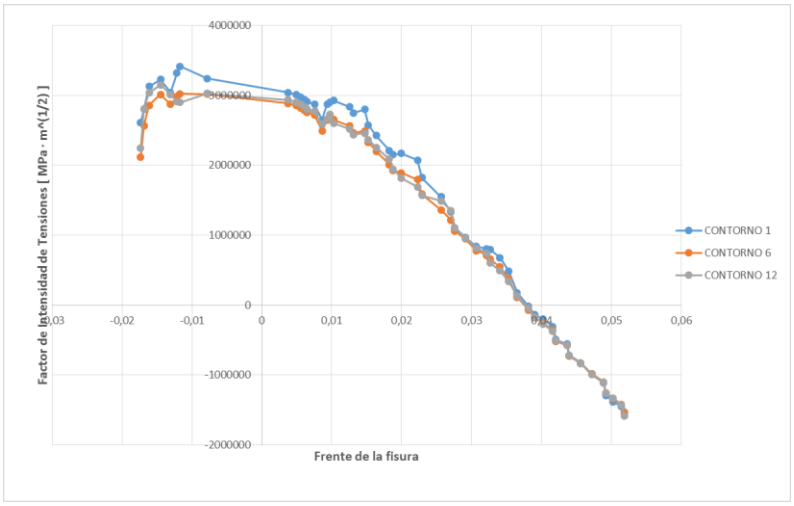
7.1.3 Posición de 60°



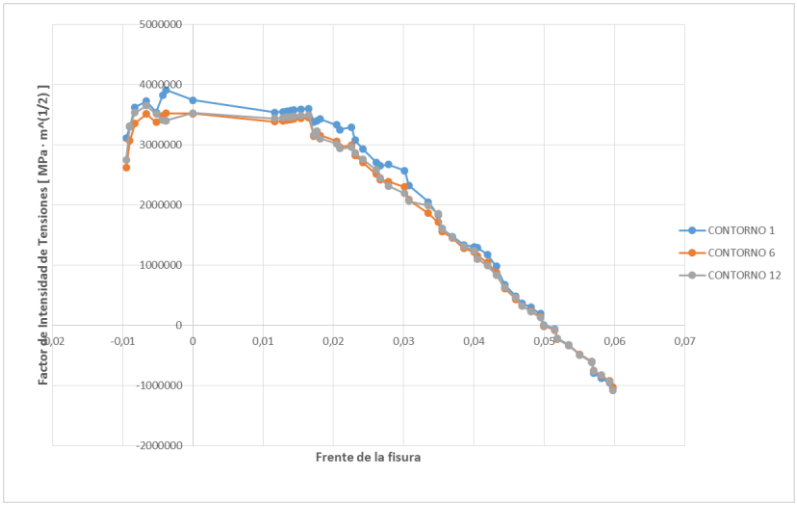
Gráfica 19 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 1



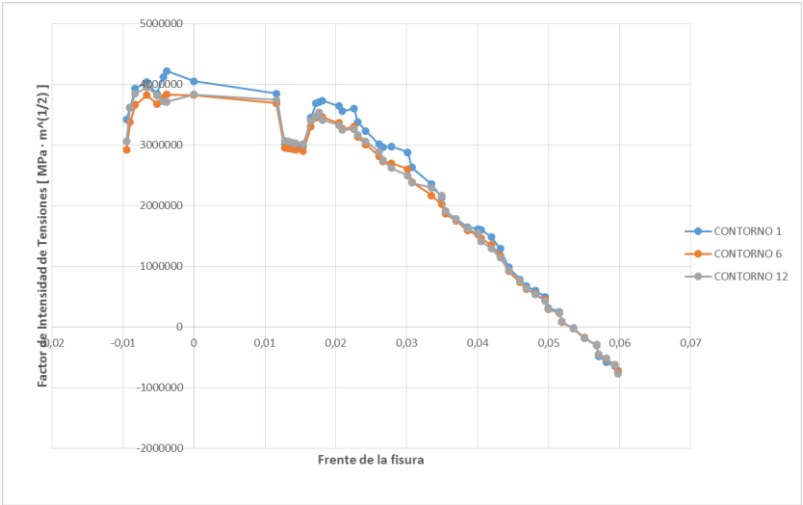
Gráfica 20 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 2



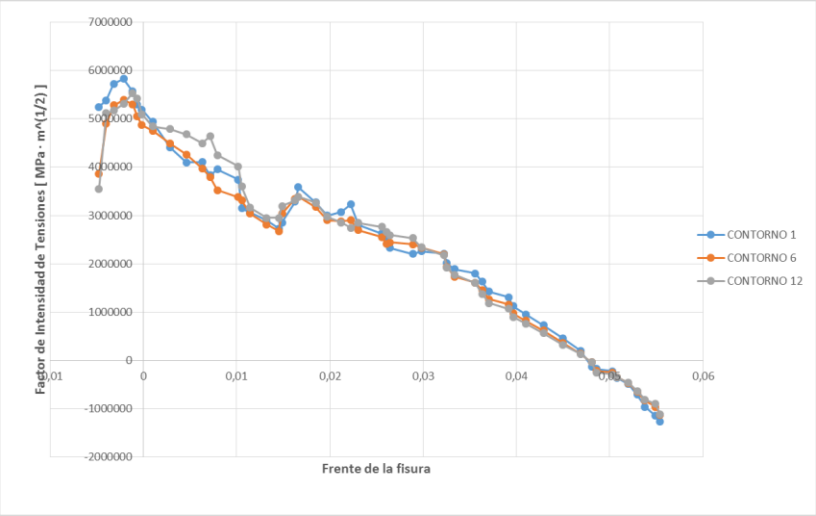
Gráfica 21 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 3



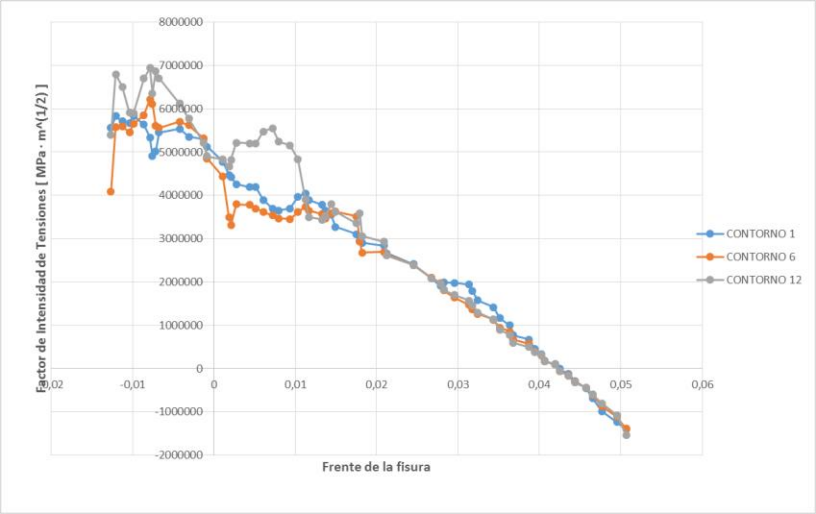
Gráfica 22 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 4



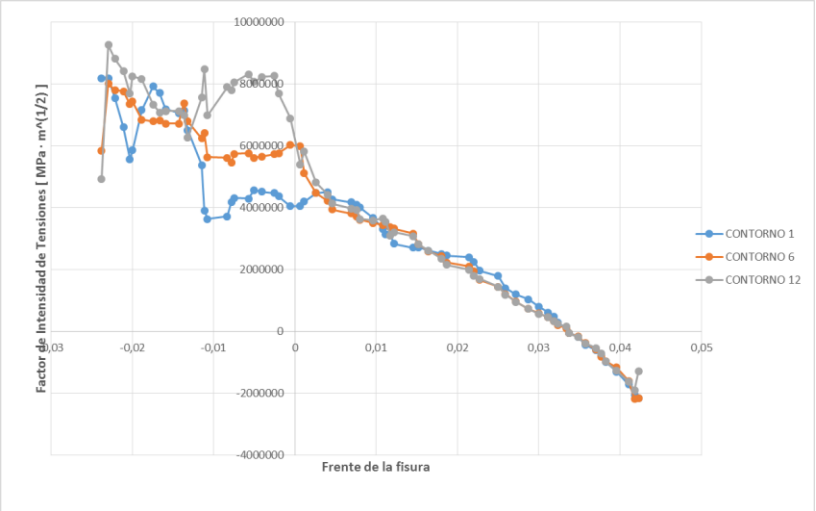
Gráfica 23 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 5



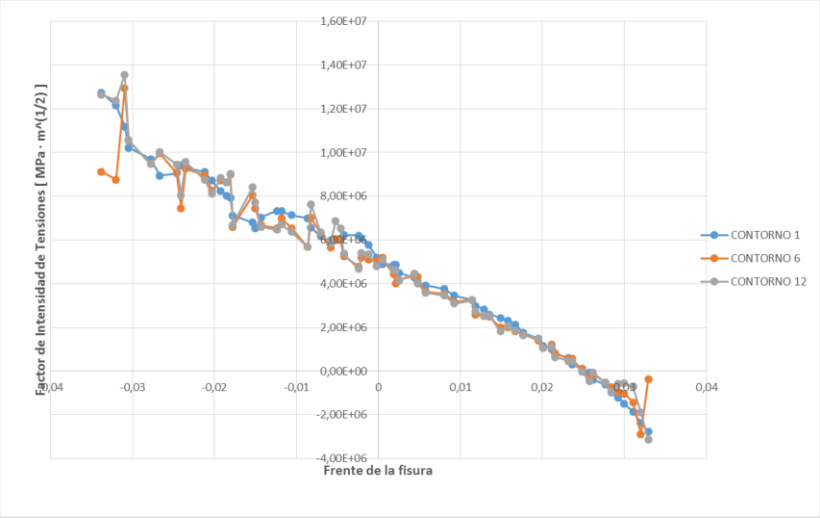
Gráfica 24 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 6



Gráfica 25 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 7

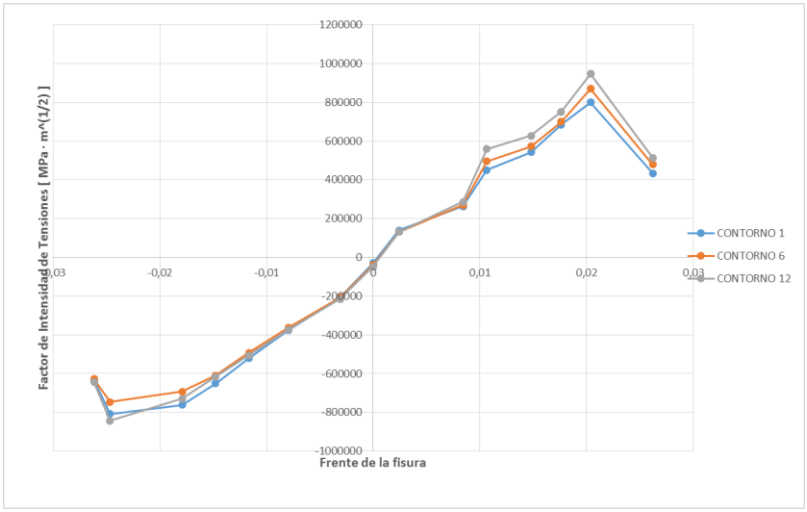


Gráfica 26 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 8

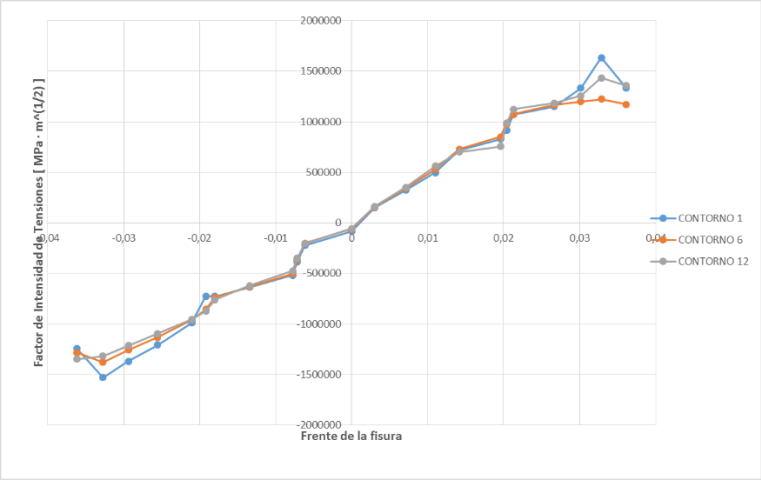


Gráfica 27 FIT para la posición de 60ª y tamaño de grieta 9

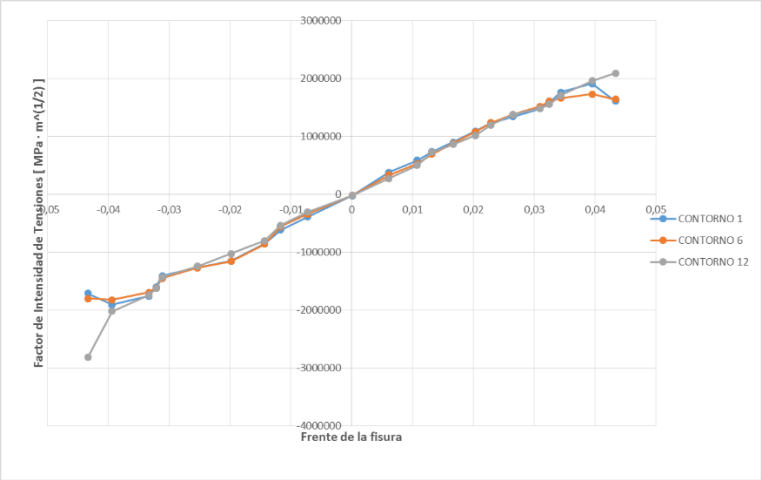
7.1.4 Posición de 90°



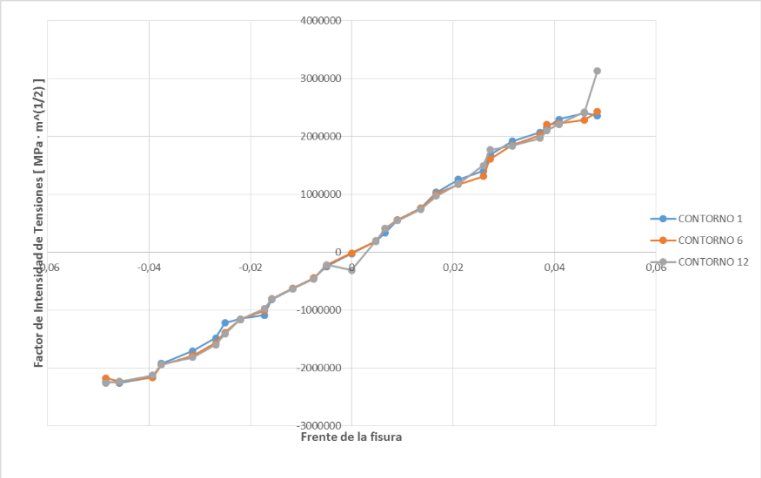
Gráfica 28 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 1



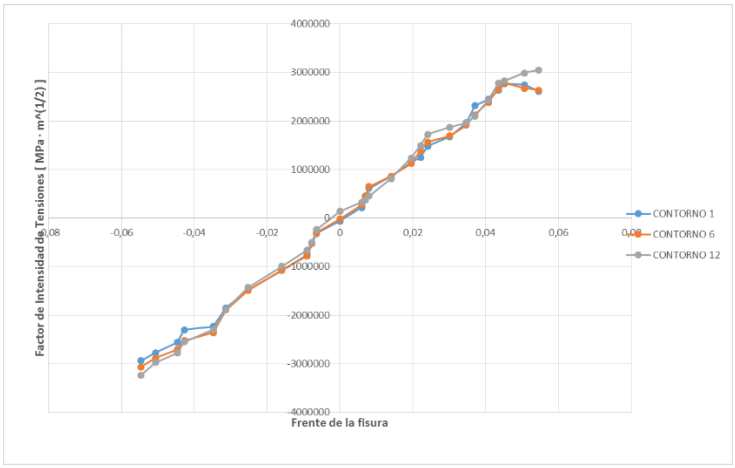
Gráfica 29 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 2



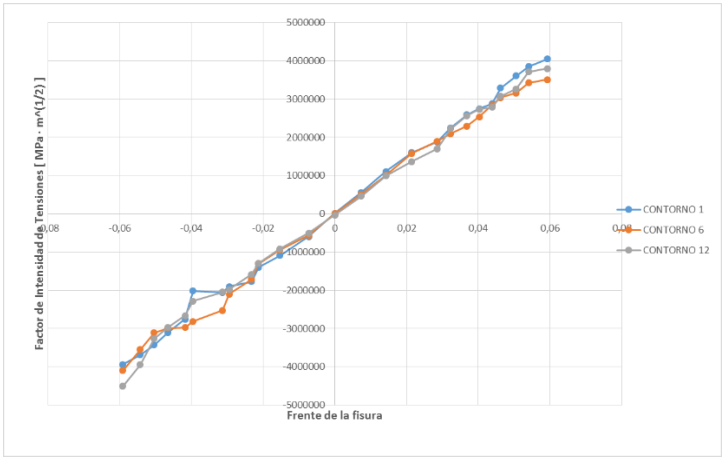
Gráfica 30 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 3



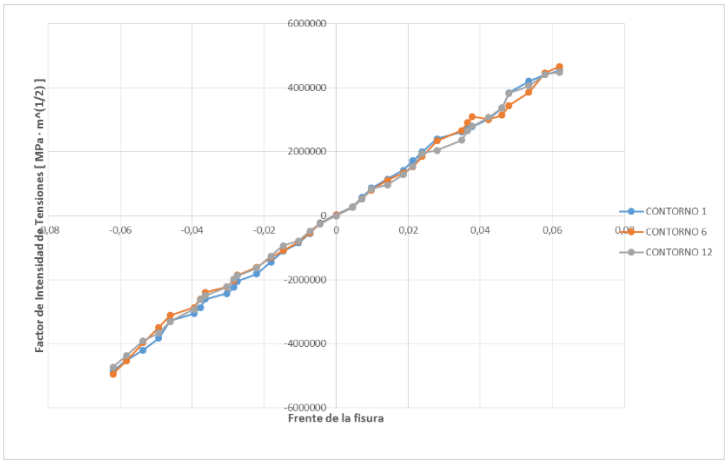
Gráfica 31 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 4



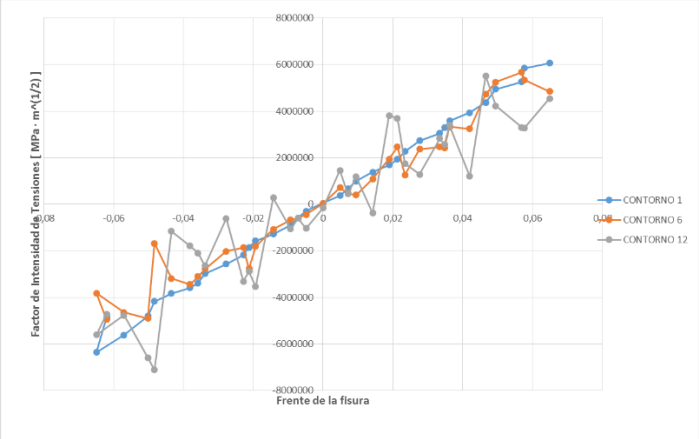
Gráfica 32 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 5



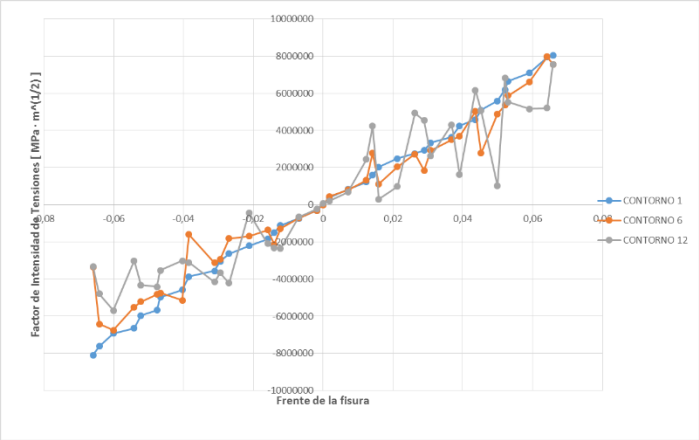
Gráfica 33 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 6



Gráfica 34 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 7

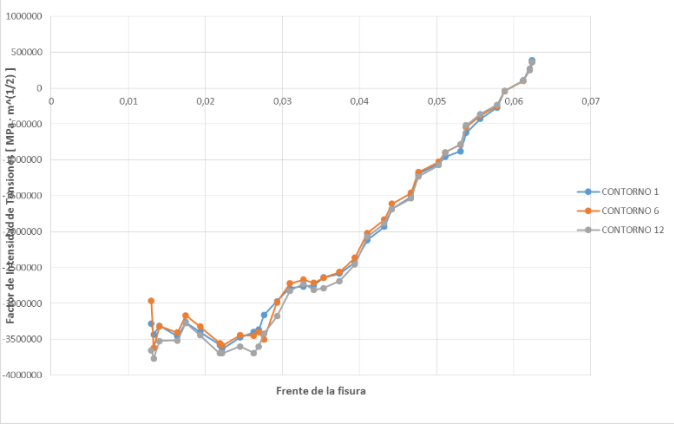


Gráfica 35 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 8

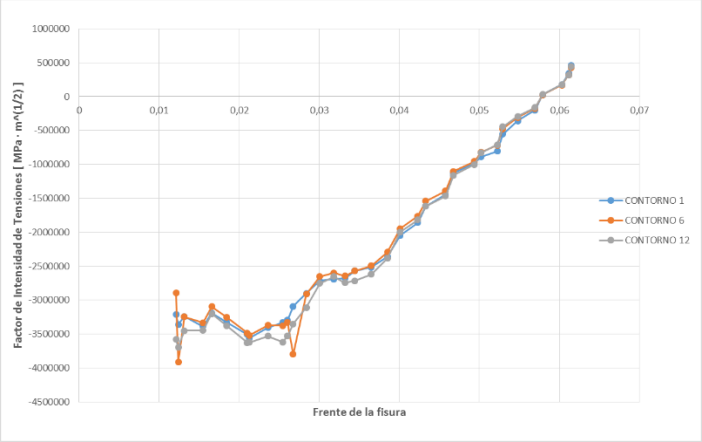


Gráfica 36 FIT para la posición de 90ª y tamaño de grieta 9

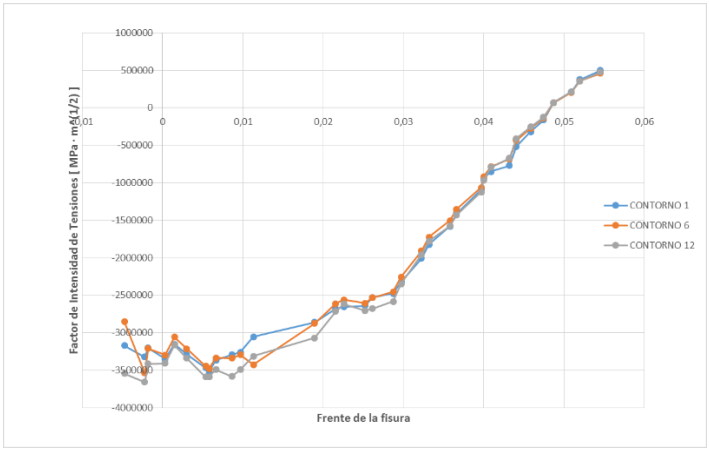
7.1.5 Posición de 120°



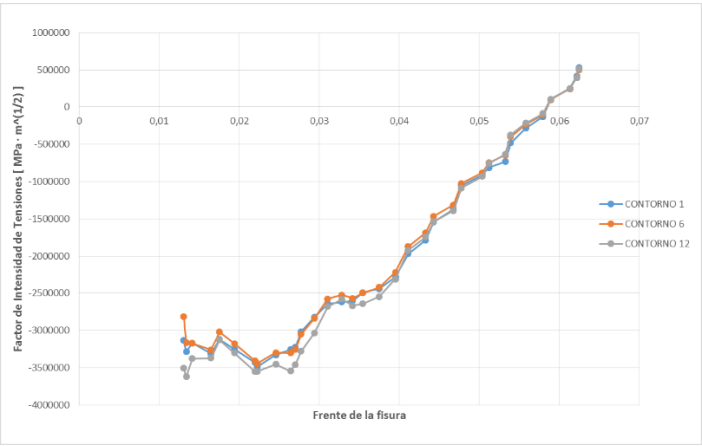
Gráfica 37 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta



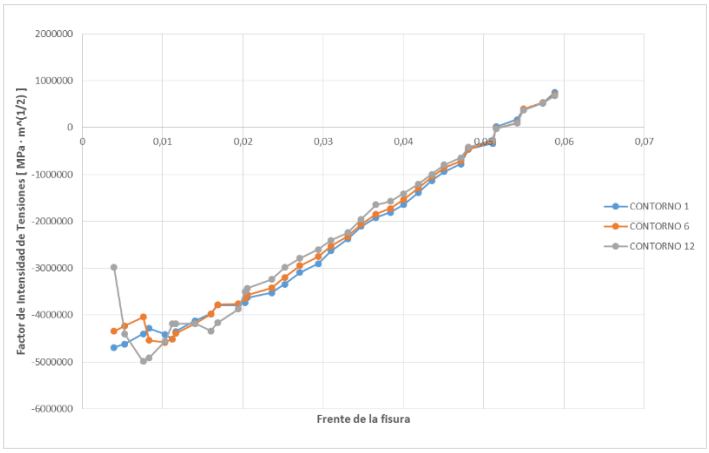
Gráfica 38 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 2



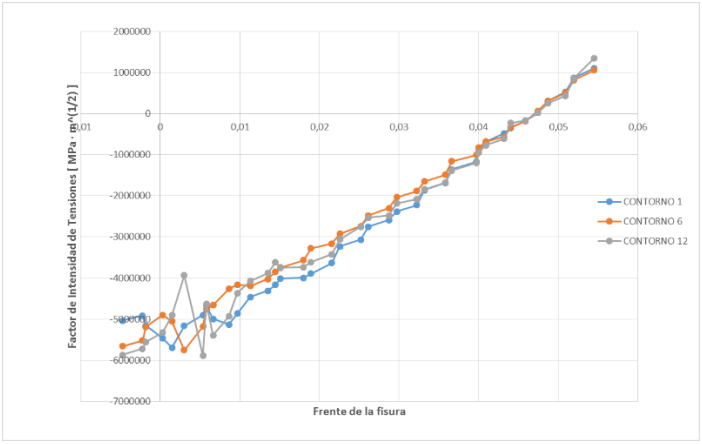
Gráfica 39 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 3



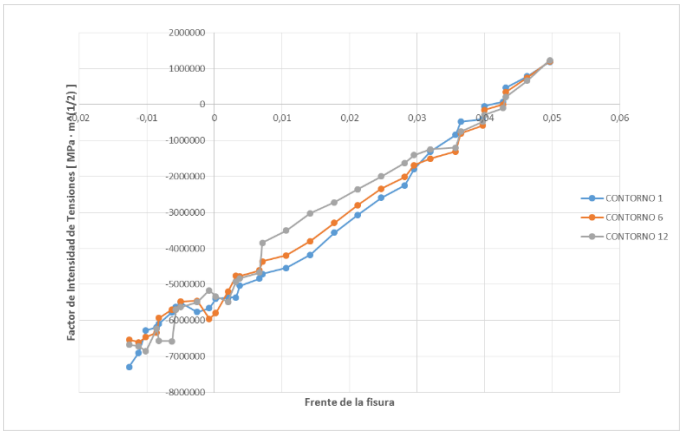
Gráfica 40 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 4



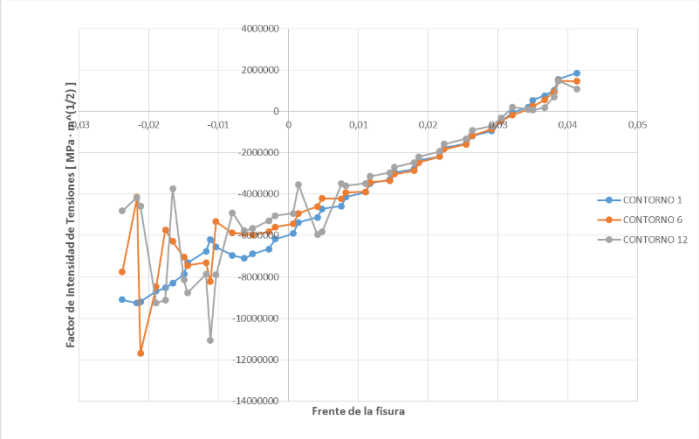
Gráfica 41 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 5



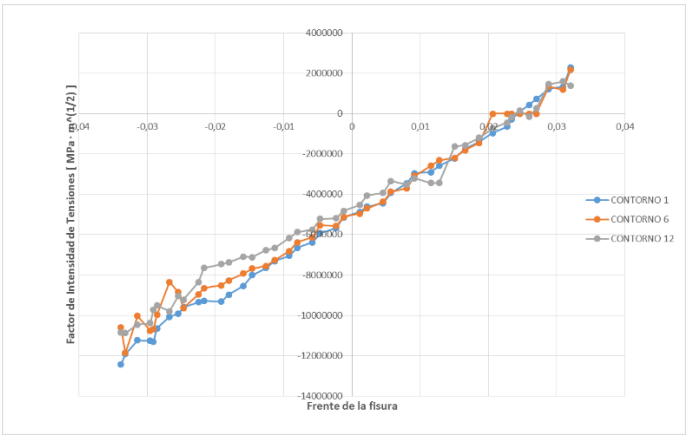
Gráfica 42 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 6



Gráfica 43 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 7

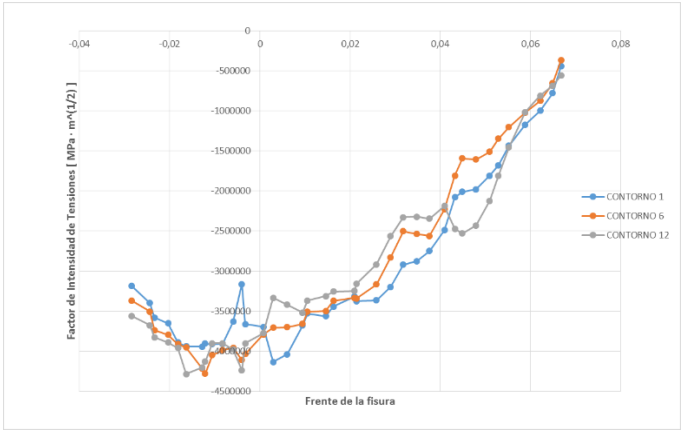


Gráfica 44 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 8

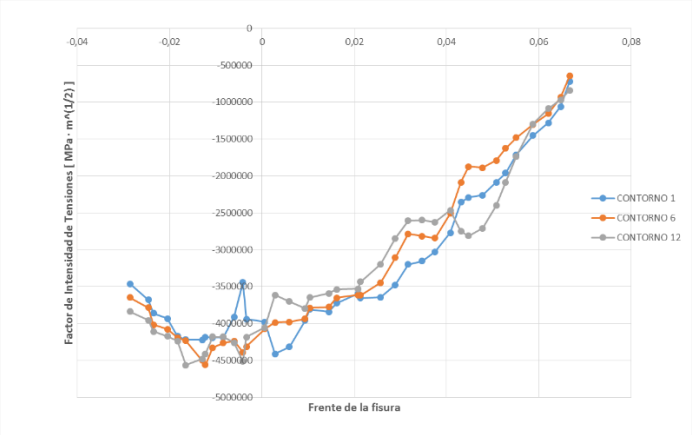


Gráfica 45 FIT para la posición de 120ª y tamaño de grieta 9

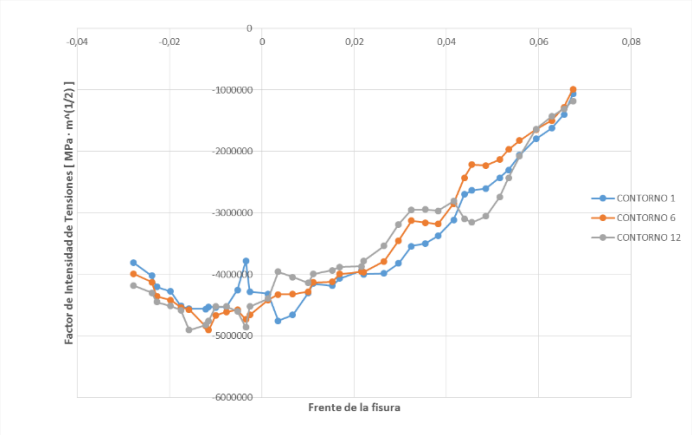
7.1.6 Posición de 150°



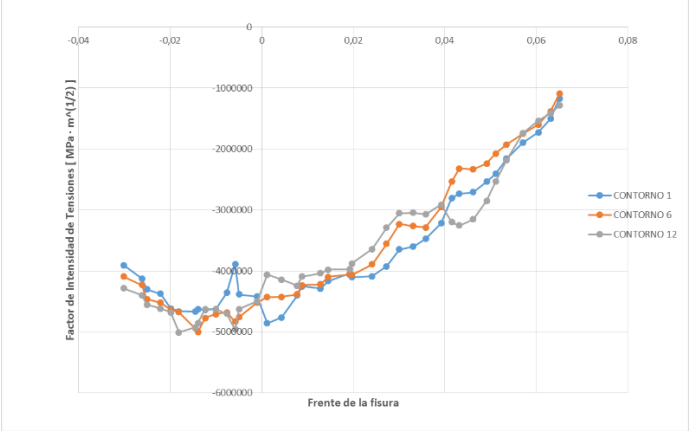
Gráfica 46 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 1



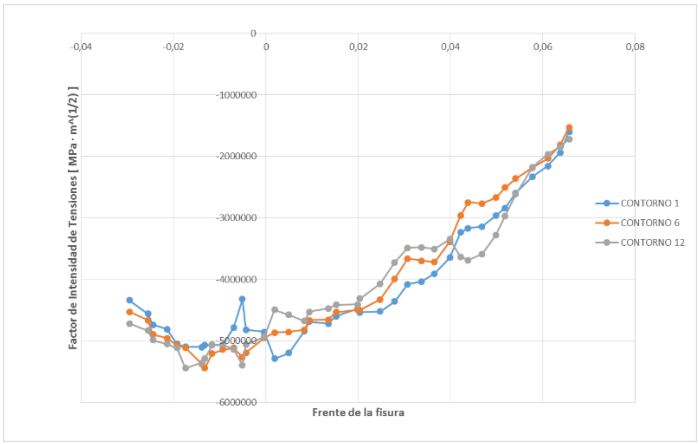
Gráfica 47 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 2



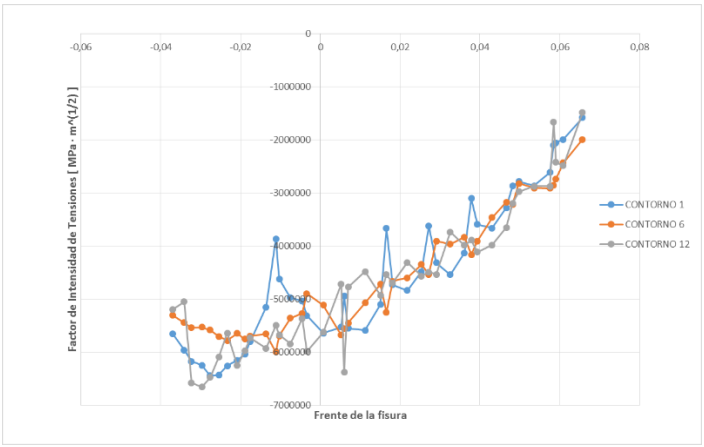
Gráfica 48 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 3



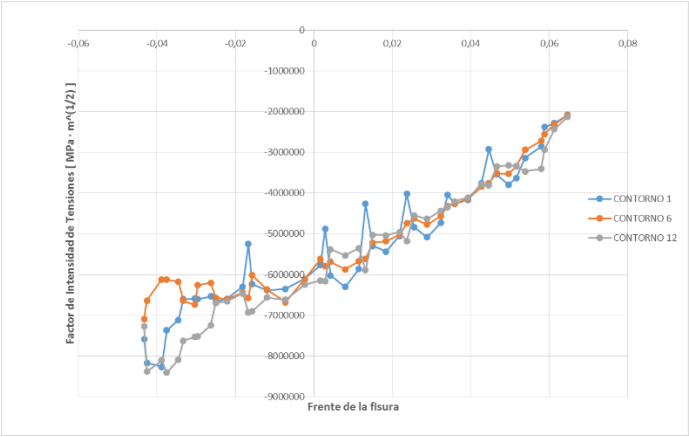
Gráfica 49 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 4



Gráfica 50 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 5

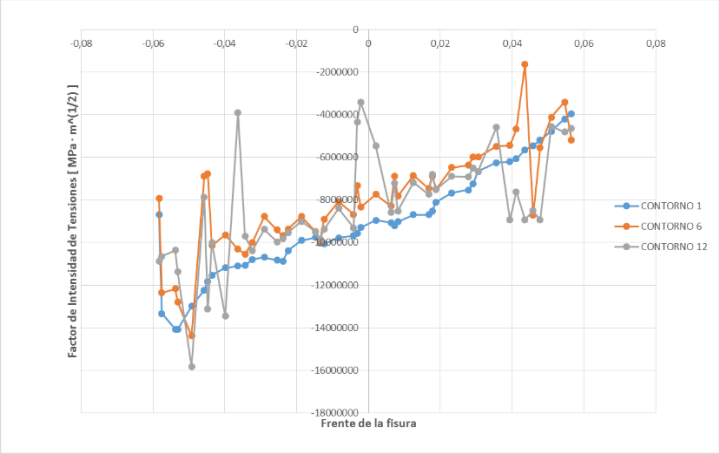


Gráfica 51 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 6



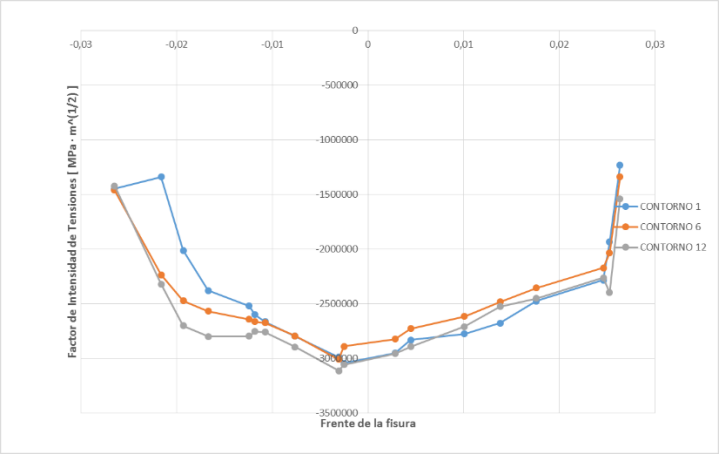
Gráfica 52 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 7

Gráfica 53 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 8

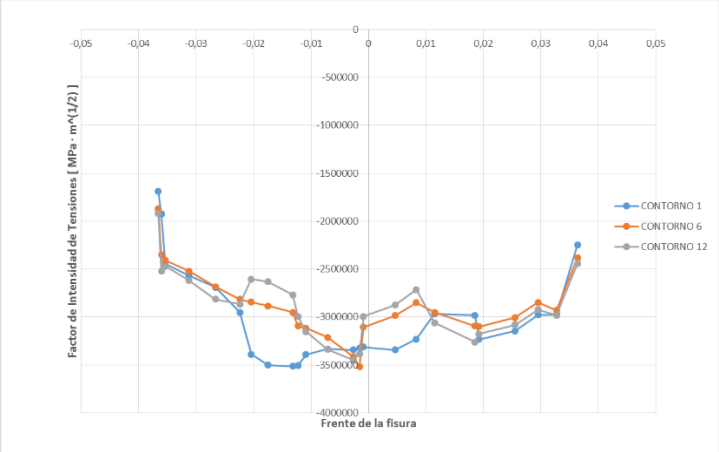


Gráfica 54 FIT para la posición de 150ª y tamaño de grieta 9

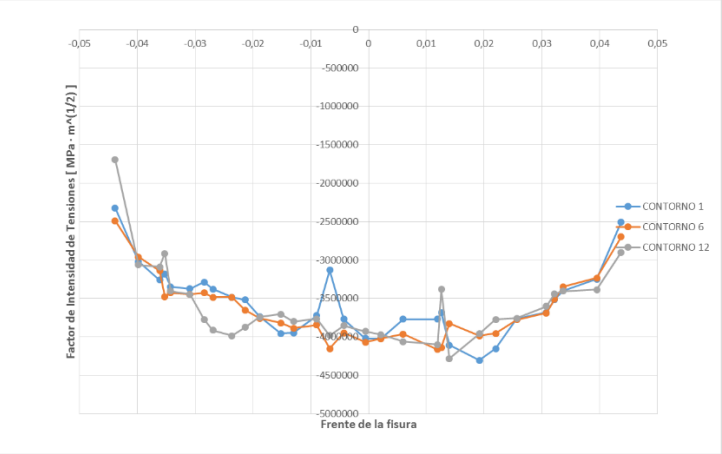
7.1.7 Posición de 180°



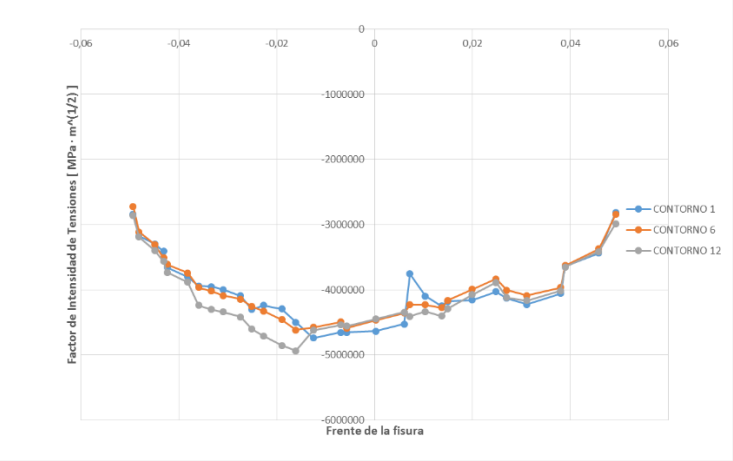
Gráfica 55 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 1



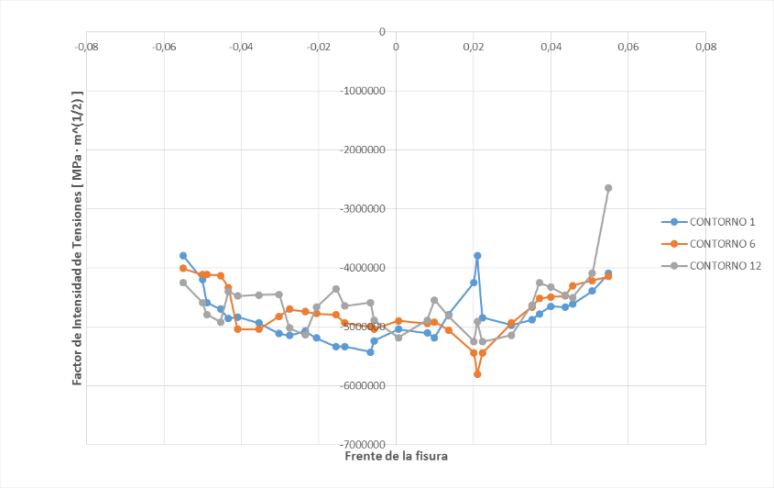
Gráfica 56 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 2



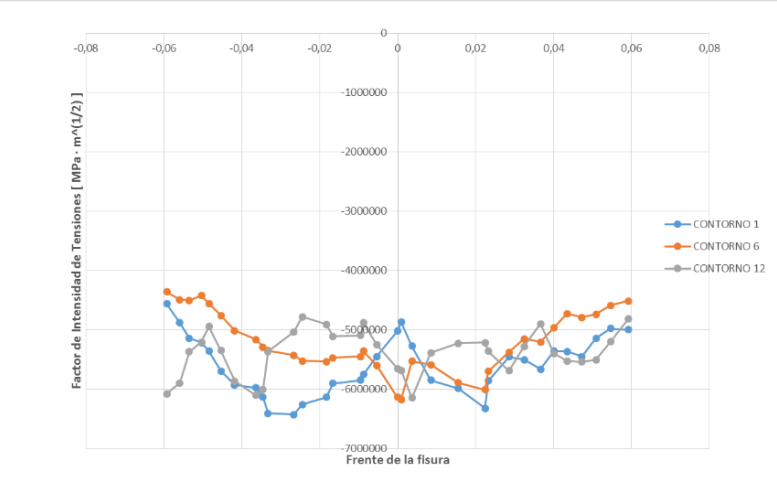
Gráfica 57 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 3



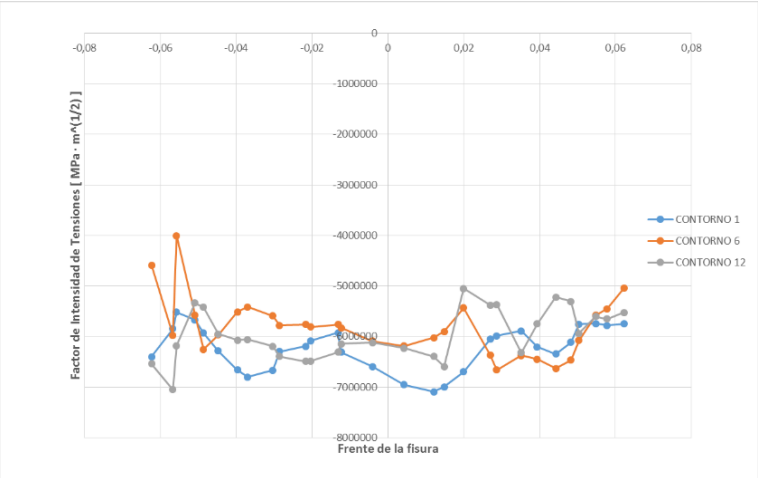
Gráfica 58 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 4



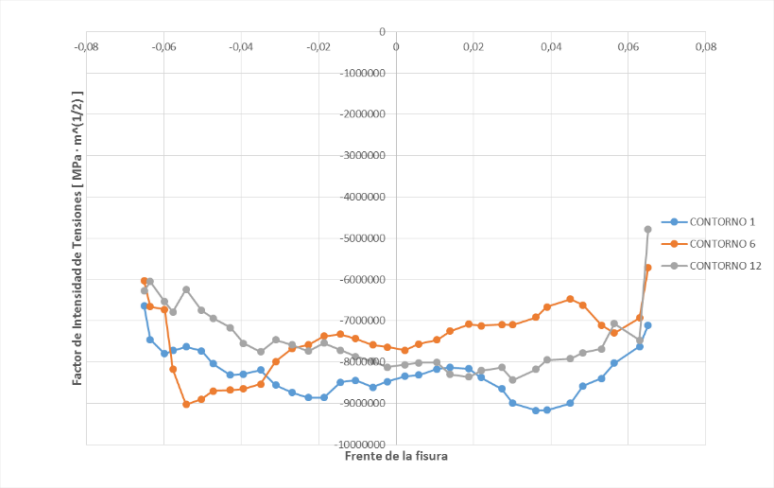
Gráfica 59 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 5



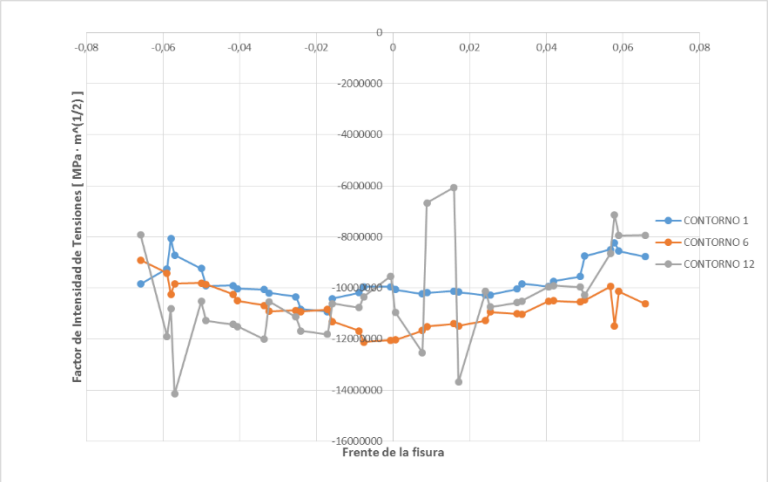
Gráfica 60 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 6



Gráfica 61 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 7



Gráfica 62 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 8



Gráfica 63 FIT para la posición de 180ª y tamaño de grieta 9

En estas gráficas se han podido observar dos cosas: el aumento del FIT a medida que el tamaño de la grieta aumenta y el cambio en la distribución del FIT cuando la grieta cambia de posición.

El aumento del FIT cuando la grieta crece es lógico ya que en el frente de la grieta también aumenta la tensión, por lo tanto la concentración de tensiones es mayor.

La teoría nos dice que el factor de intensidad de tensiones máximo se debe dar en el centro del frente de la grieta, pero esto únicamente se cumple cuando la grieta está colocada en la posición de 0°. Esto se debe a que en esta posición la grieta sufre la máxima apertura debido a la tracción. A medida que el eje gira una parte de la grieta se abre y otra se cierra. La longitud de grieta que se abrirá dependerá de la posición angular. Por ejemplo, En 0° la grieta se encuentra totalmente abierta, en 90° la mitad de la grieta se abre y la otra mitad se cierra; y en 180° la grieta se cierra totalmente.

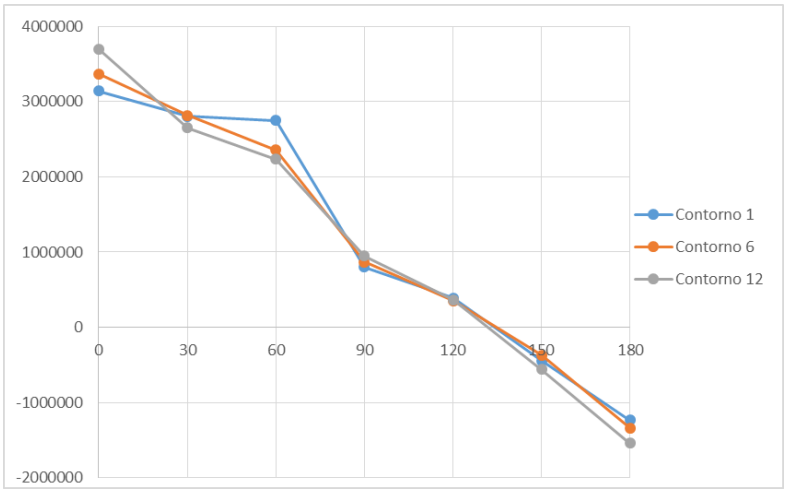
También se puede observar con estas gráficas como es cierto que en los primeros contornos (contorno 1) los valores del FIT son menos fiables que para los contornos más lejanos (contornos 6 y 12). Aunque en muchos estudios se puede observar que los tres son muy parecidos entre sí, sobre todo en los estudios con tamaños pequeños de grietas.

Se demuestra que para grandes tamaños de grieta el software Abaqus sufre bastantes distorsiones, invalidando estos datos para futuros estudios por su poca fiabilidad.

7.2 FIT EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE LA GRIETA

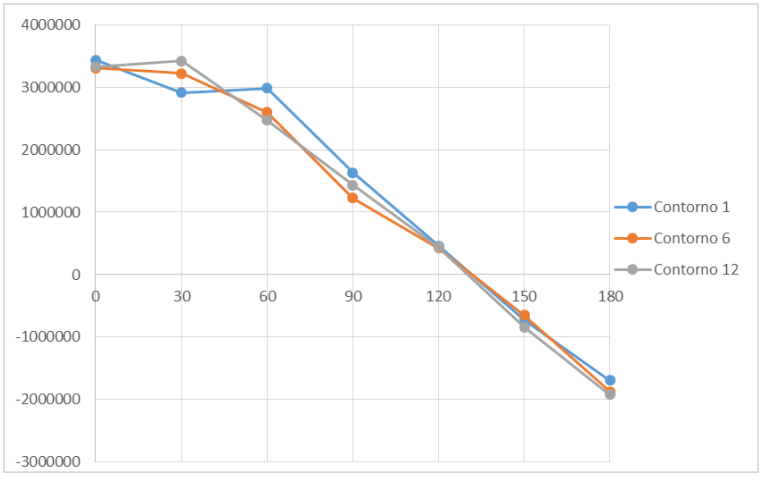
En este apartado se muestran las gráficas del Factor de Intensidad de Tensiones máximo (eje de ordenadas) frente a la posición angular de la grieta (eje de abscisas).

7.2.1 Tamaño de grieta 1



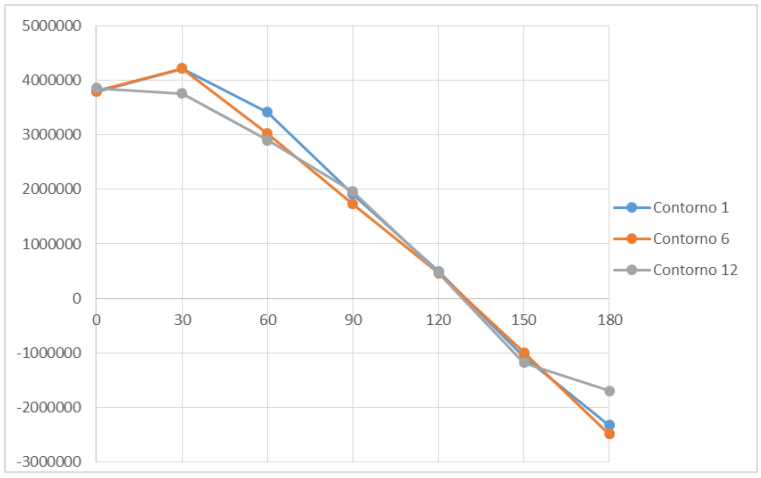
Gráfica 64 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 1

7.2.2 Tamaño de grieta 2



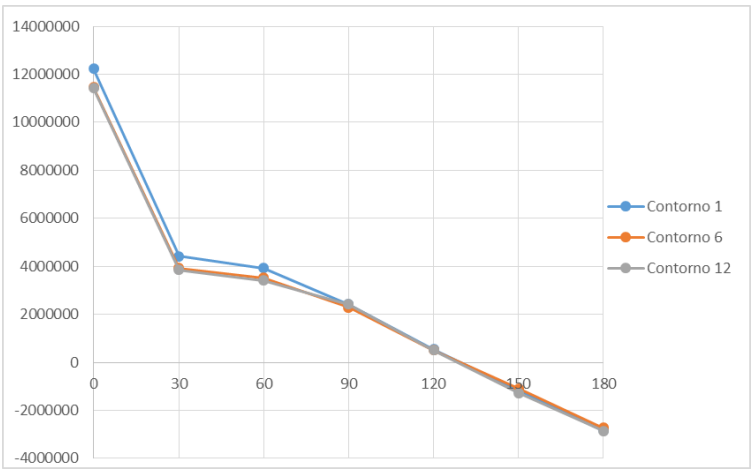
Gráfica 65 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 2

7.2.3 Tamaño de grieta 3



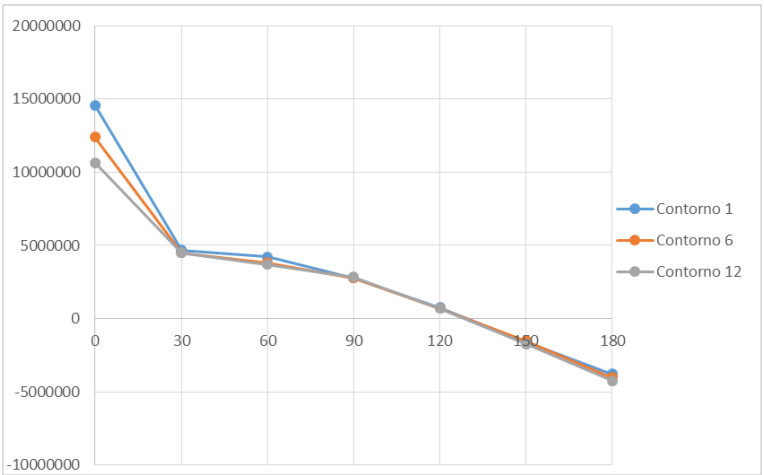
Gráfica 66 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 3

7.2.4 Tamaño de grieta 4



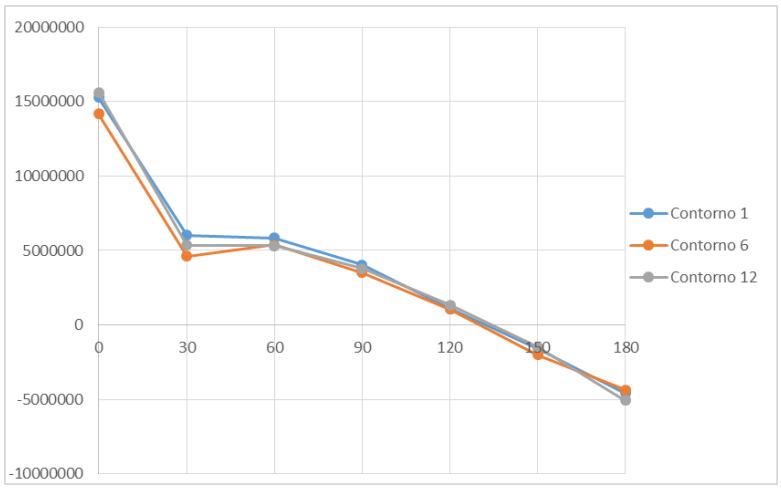
Gráfica 67 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 4

7.2.5 Tamaño de grieta 5



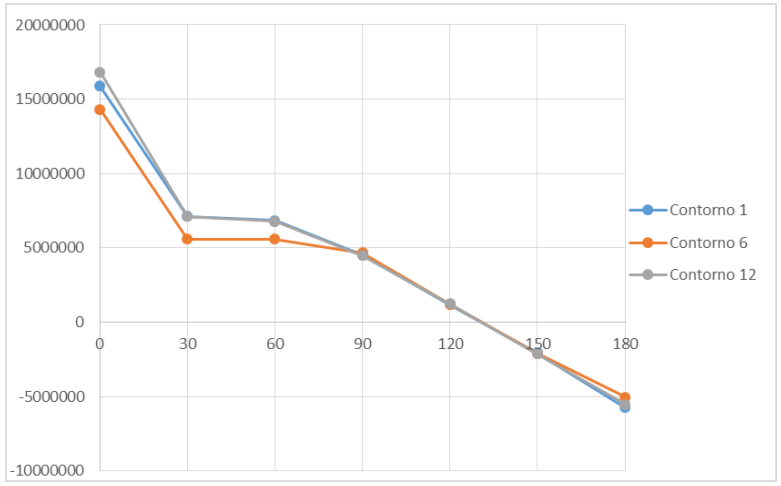
Gráfica 68 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 5

7.2.6 Tamaño de grieta 6



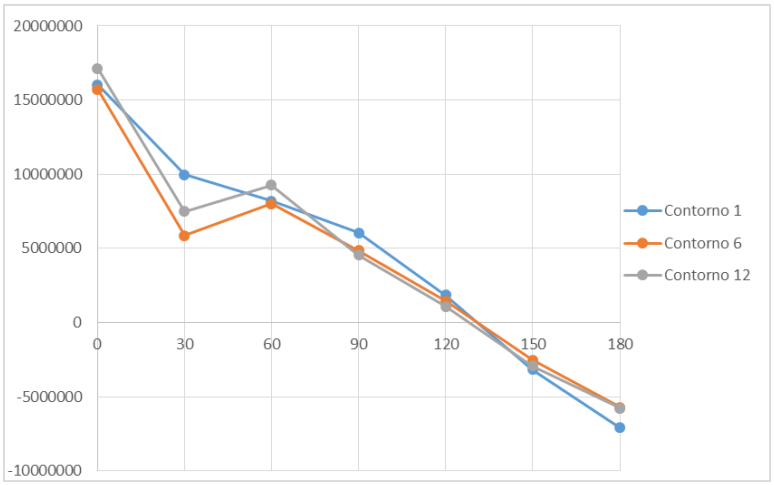
Gráfica 69 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 6

7.2.7 Tamaño de grieta 7



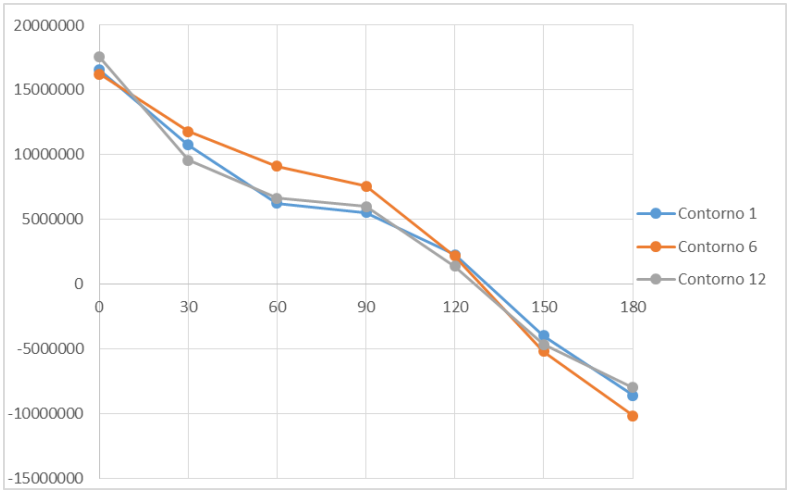
Gráfica 70 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 7

7.2.8 Tamaño de grieta 8



Gráfica 71 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 8

7.2.9 Tamaño de grieta 9



Gráfica 72 FIT frente al ángulo para el tamaño de grieta 9

Con las gráficas del factor de intensidad de tensiones máximo a lo largo del giro del eje se puede observar como efectivamente la posición donde el factor de intensidad de tensiones es máximo es en la posición de 0°, a partir de la cual el FIT desciende hasta llegar a valores negativos, los cuales, como se ha explicado anteriormente, se deben tomar como cero.

Capítulo 8. Conclusión y trabajos futuros

8.1 CONCLUSIÓN

El principal objetivo de este proyecto era el estudio de un eje real fisurado bajo condiciones de servicio. A priori los resultados obtenidos en este proyecto son lógicos y concuerdan con los resultados esperados. No se ha podido realizar una comparativa con datos oficiales ya que no se han encontrado estudios sobre este tema. Pero tras comparación con estudios similares realizados en la Universidad Carlos III sobre ejes simplificados se puede afirmar que los resultados obtenidos son similares salvando las diferencias entre los modelos.

Por lo tanto, el objetivo de crear una lista de valores del factor de intensidad de tensiones de referencia para estudios futuros sobre un eje real se ha cumplido. Para la mayoría de tamaños de grieta y posiciones se ha podido observar que los contornos convergen prácticamente en todos los puntos, cumpliendo lo que especifica la teoría de XFEM, que dice que el valor del factor de intensidad de tensiones es independiente del tamaño del contorno.

Se debe atender a la excepción de los valores obtenidos con los tamaños de fisura más grandes, es los que se han observado discrepancias severas entre los diferentes contornos, por lo que no es posible determinar un valor fiable de factor de intensidad de tensiones.

Como se explicó al comienzo de este proyecto, el área de ingeniería Mecánica tiene planificado una seria de proyectos para estudiar el comportamiento de un eje completo. Por lo tanto este proyecto tenía el objetivo de servir de base para estos futuros estudios relacionados con esta tea. Por ello se ha creado una minuciosa guía del programa informático Abaqus asi como de la implementación de grietas mediante el método XFEM. Por lo tanto esta guía es útil tanto para continuar los estudios sobre el eje ferroviario como para estudios relacionados con la aparición y crecimiento de grietas en cualquier sólido.

8.2 ESTUDIOS FUTUROS

A medida que se ha ido realizando este Proyecto han ido surgiendo bastantes ideas sobre futuros estudios relacionados con este tema. Estos estudios posteriores se pueden dividir en dos grupos:

- Continuación y mejora del análisis de grietas con Abaqus

En este grupo se englobarían los trabajos que se encargaran de mejorar o ampliar el estudio aquí realizado. Algunos ejemplos serían: comparativa del FIT en función de la técnica de mallado

realizada, estudio del FIT en otras posiciones y en otros ángulos de giro, estudio del FIT para grietas de frente elíptico.

- Analisis del eje ferroviario con otros programas

En este otro grupo se encontraría los estudios que serían continuación del aquí realizado, como por ejemplo, el estudio de la vida a fatiga del eje para cada una de las grietas realizadas, para ello se recomienda otro software diferente a Creo Parametric, ya que se ha intentado hacer un análisis comparativo de la tensión máxima para el mismo eje con la misma fisura y los valores difieren mucho. Otro posible proyecto sería estudiar el tiempo para revisión que necesitaría un eje sometido a las condiciones especificadas en este proyecto.

Capítulo 9. Presupuesto General

9.1 PRESUPUESTO GENERAL DETALLADO

Costes de personal				
Apellidos, Nombre	**Categoría**	**Dedicación (hombres al mes*)**	**Coste hombre mes**	**Coste (€)**
García Prada, Juan Carlos	Ingeniero Senior	0,2	4289,54	857,91
Kalengayi Tshilumbu, Zoser	Ingeniero	0,8	2694,37	2155,50
Pérez Rosco, Alejandro	Ingeniero en practicas	5	988,89	4944,45
	Hombres mes	6	**Total**	7957,85

*hombres al mes=131,25 horas

Equipos					
Descripción	**Coste (€)**	**Dedicación (meses)**	**% Uso dedicado al proyecto**	**Periodo de depreciación (meses)**	**Coste imputable** (€)**
Pc Portatil	439,9	6	100	60	43,99
Licencia Abaqus	21950	4	66,67	60	975,56
Licencia Office	119	2	33,33	60	1,32
Licencia PTC Creo	6000	0,2	3,33	60	0,67
			Total		1021,53

Formula de cáculo de la Amortización: A/B ·C·D

A= número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B= periodo de depreciación (60 meses)

C= coste del equipo

D= % del uso que se dedica al proyecto

Otros costes directos		
Descripción		**Coste imputable (€)**
Material de oficina e impresión		50,00
Desplazamientos y dietas		200,00
	Total	250,00

Resumen de costes		
	Presupuesto costes totales	
Personal		7957,85
Amortización		1021,53
Costes directos		250,00
	Total	9229,38

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 9229.38 €.

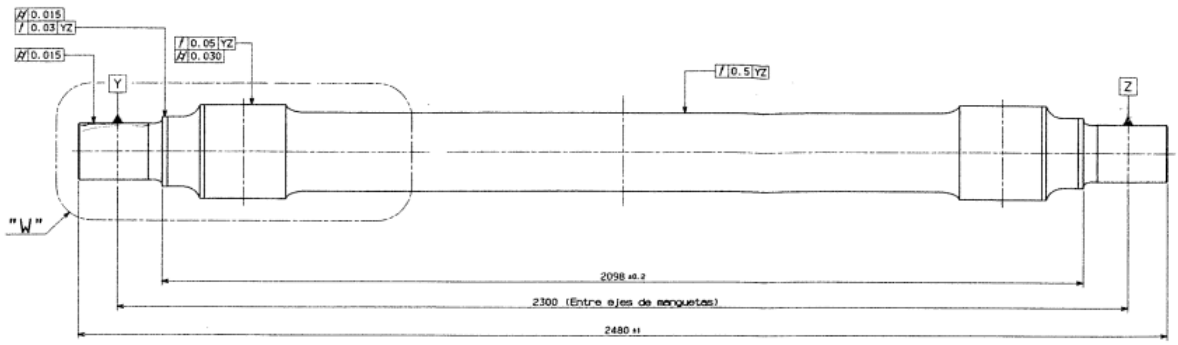
Coslada, 27 de Septiembre de 2015

Fdo. Alejandro Pérez Rosco

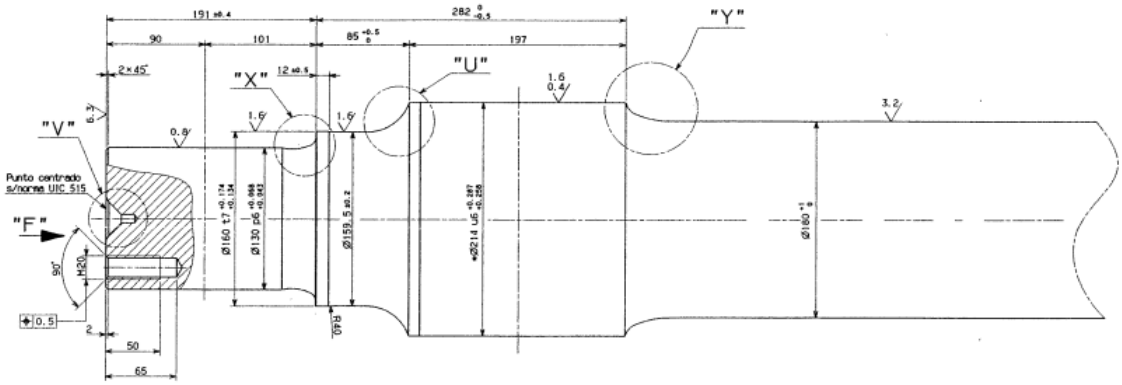
Capítulo 10. Bibliografía

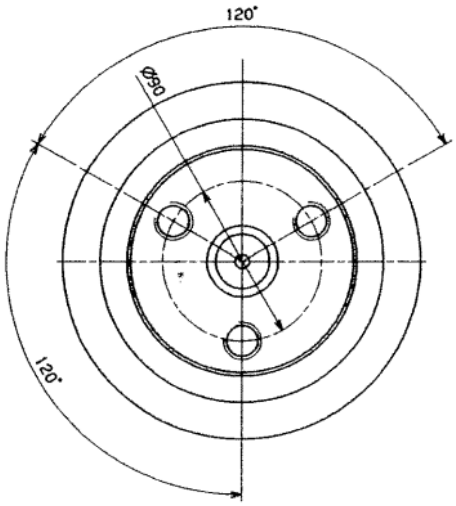
1. DASSAULT SYSTÈMES : Abaqus 6.10 Online Documentation, Dassault Systèmes, Providence, Rhode Island.
2. MERCEDES NOVELLA PASTOR: Análisis del factor de intensidad de tensiones en un eje con una fisura de frente recto. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
3. MIKEL BUESA MARTÍN: Factor de intensidad de tensiones para fisuras semielípticas en ejes cilíndricos bajo flexion rotativa. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
4. JOSÉ LUIS ARANA; JAVIER JESÚS GONZÁLEZ: Mecánica de la Fractura. Universidad del País Vasco.
5. MANUEL ADRIÁN RELANCIO RUS: Análisis con Pro/Engineer de las variaciones modales de un eje ferroviario ante fallo. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2012.
6. HELIO MERA PANADERO: Metodología para el análisis de esfuerzos y a fatiga de ejes y obtención del factor de intensidad de tensiones mediante el método xfem en Abaqus. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2014.
7. SERGIO FERNÁNDEZ MATEY: Clasificación y análisis de la evolución de la respuesta modal de un eje ferroviario con grietas. Proyecto fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2013.
8. http://www.gef.es/Congresos/23/pdf/2-7.pdf (última visita Septiembre de 2015)
9. https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos (última visita Septiembre de 2015)
10. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fracture_mechanics/fm_epfm_CTOD.cfm (última visita Septiembre de 2015)
11. http://www.matthewpais.com/3dedgecrack (última visita Septiembre de 2015)

Anexo.Plano del eje ferroviario

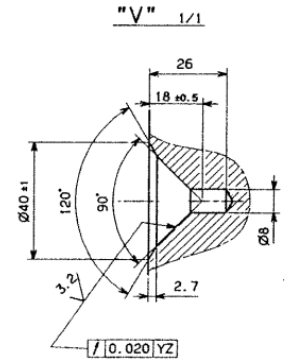

0.015
0.03 YZ
0.015
0.05 YZ
0.030
0.5 YZ
Y
Z
"W"
2098 ±0.2
2300 (Entre ejes de manguetas)
2480 ±1

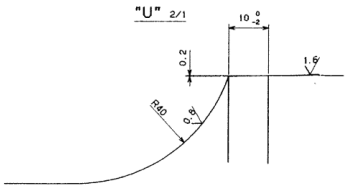
"W" (1/2)

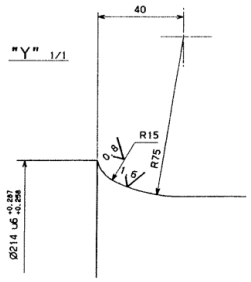

191 ±0.4
282
90
101
85
197
"Y"
2x45°
"X"
12 ±0.5
"U"
1.6
0.4
"V"
6.3
0.8
1.6
1.6
3.2
Punto centrado s/norma UIC 515
"F"
90°
M20
0.5
2
50
65
R40
Ø160 f7
Ø130 p6
Ø159.5 ±0.2
Ø221d u6
Ø160

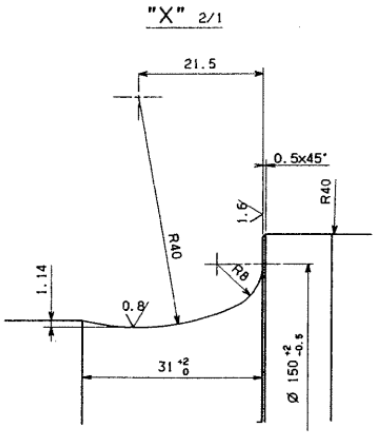

120°
Ø90
120°

Detalles


"V" 1/1
26
18 ±0.5
Ø40 ±1
120°
90°
Ø8
3.2
2.7
0.020 YZ


"U" 2/1
0.2
1.6
R40
0.8


40
"Y" 1/1
R15
R75
0.8
1.6


"X" 2/1
21.5
0.5x45°
R40
1.6
R40
R8
1.14
0.8
31