

Departamento de Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO NUMÉRICO DEL EFECTO DE LA
EXCENTRICIDAD EN EL
COMPORTAMIENTO DE UN EJE
FISURADO**

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Guillermo Gómez Rubio

Tutora: M^a Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre

Leganés, Junio de 2014

Título: Estudio numérico del efecto de la excentricidad en el comportamiento de un eje fisurado.

Autor: Guillermo Gómez Rubio

Director: M^a Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo de Fin de Grado el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Quisiera agradecer a toda la gente que ha estado conmigo a lo largo de estos años de etapa universitaria.

A mi madre y abuelo los cuáles han estado en casa apoyándome en los buenos y malos momentos y dándome fuerzas para seguir adelante. Ellos me han enseñado a ser como soy y me lo han dado todo. Sin ellos no hubiera podido finalizar esta etapa.

A mi hermano, Edu, que se ha preocupado siempre de su "chache pequeño" y me ha dado el punto de vista de la experiencia en muchos ámbitos y su ayuda en más cosas de las que él podía.

A Lourdes, por darme la oportunidad de hacer un Trabajo de Fin de Grado que me gustaba, finalizando así mi formación en esta titulación.

A Joaqui, Elena y Mario que siempre me han brindado su ayuda y cariño siempre y cuando he necesitado de ellos han respondido siempre.

A Alberto y Vicen, que muchos kilómetros han hecho éstos últimos años y cuando más se les ha necesitado han estado ahí.

A mi grupo de amigos, que en muchas ocasiones han soportado mis lamentos y me han ayudado a mantener mi mente despejada en momentos muy duros.

A mis compañeros de universidad, que más que compañeros, han resultado ser grandes amigos.

A mis compañeros de Seat Componentes, por haberme enseñado tanto y acogido tan bien durante estos meses de beca.

A aquellos profesores que impartían sus clases con gusto por la enseñanza y de los cuáles he aprendido mucho.

A ti, Papá, que a pesar de no haber podido ver este fin de etapa, te he llevado siempre conmigo. Todo mi esfuerzo ha sido siguiendo tu ejemplo. Va por ti.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

| | |
|---------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 13 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 14 |
| 1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO..... | 14 |

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| ANTECEDENTES DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA | 15 |
| 2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS..... | 15 |
| 2.2 MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICA LINEAL..... | 16 |
| 2.2.1 Tenacidad de fractura..... | 17 |
| 2.2.2 Crecimiento de la fisura..... | 18 |
| 2.2.3 Cierre y apertura de la fisura..... | 19 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| ANÁLISIS NUMÉRICO | 21 |
| 3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS..... | 21 |
| 3.2 INTRODUCCIÓN AL ABAQUS 6.12..... | 22 |

Capítulo 4

| | |
|--|----|
| FORMULACIÓN DEL MODELO EN ABAQUS | 25 |
| 4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 25 |
| 4.2 REALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN MEDIANTE ABAQUS 6.12..... | 28 |

Capítulo 5

| | |
|---|----|
| RESULTADOS | 35 |
| 5.1 FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES..... | 35 |
| 5.1.1 FIT para $\alpha = 0,1$ | 35 |
| 5.1.2 Efecto del ángulo de rotación..... | 48 |
| 5.1.3 FIT para $\alpha = 0,25$ | 50 |
| 5.1.4 FIT para $\alpha = 0,5$ | 63 |
| 5.1.5 Efecto del tamaño de la fisura α | 76 |
| 5.2 ÁREA DE FISURA ABIERTA..... | 77 |
| 5.2.1 Para $\alpha=0.1$ | 79 |
| 5.2.2 Para $\alpha=0.25$ | 81 |
| 5.2.3 Para $\alpha=0.5$ | 82 |

Capítulo 6

| | |
|---------------------------|----|
| CONCLUSIONES | 85 |
|---------------------------|----|

Capítulo 7

| | |
|---------------------------------------|----|
| PRESUPUESTO DEL PROYECTO | 87 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA | 91 |
|---------------------------|----|

Índice de figuras

Figura 2.1. Modos de fallo

Figura 2.2. Eje sometido a flexión

Figura 2.3. Detalle de apertura del eje

Figura 4.1: Rotor Jeffcot con masa excéntrica

Figura 4.2: Posiciones angulares relativas de la fisura estudiadas

Figura 4.3: Posición relativa de la excentricidad

Figura 4.4: Resumen de fuerzas aplicadas en el eje

Figura 4.5: Disposición de fuerzas

Figura 4.6. Particiones del eje longitudinales

Figura 4.7. Material asignado en módulo Property

Figura 4.8: Ejes ensamblados y Reference Points

Figura 4.9. Contacto entre superficies y frentes de fisura

Figura 4.10. Mallado de la sección transversal

Figura 4.11. Mallado del eje longitudinal

Figura 4.12. Área Fisurada abierta

Figura 5.1: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=0$; $\phi=0$

Figura 5.2: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=0$; $\phi=45$

Figura 5.3: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=0$; $\phi=90$

Figura 5.4: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=0$; $\phi=135$

Figura 5.5: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=0$; $\phi=180$

Figura 5.6: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=45$; $\phi=0$

Figura 5.7: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=45$; $\phi=45$

Figura 5.8: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=45$; $\phi=90$

Figura 5.9: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=45$; $\phi=135$

Figura 5.10: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=45$; $\phi=180$

Figura 5.11: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=90$; $\phi=0$

Figura 5.12: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=90$; $\phi=45$

Figura 5.13: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=90$; $\phi=90$

Figura 5.14: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=90$; $\phi=135$

Figura 5.15: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=90$; $\phi=180$

Figura 5.16: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=135$; $\phi=0$

Figura 5.17: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=135$; $\phi=45$

Figura 5.18: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=135$; $\phi=90$

Figura 5.19: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=135$; $\phi=135$

Figura 5.20: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=135$; $\phi=180$

Figura 5.21: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=180$; $\phi=0$

Figura 5.22: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=180$; $\phi=45$

Figura 5.23: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=180$; $\phi=90$

Figura 5.24: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=180$; $\phi=135$

Figura 5.25: FIT para $\alpha=0.1$; $\Theta=180$; $\phi=180$

Figura 5.26: Valores del FIT para $\phi=0^\circ$

Figura 5.27: Valores del FIT para $\phi=90^\circ$

Figura 5.28: Valores del FIT para $\phi=180^\circ$

Figura 5.29: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=0$; $\phi=0$

Figura 5.30: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=0$; $\phi=45$

Figura 5.31: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=0$; $\phi=90$

Figura 5.32: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=0$; $\phi=135$

Figura 5.33: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=0$; $\phi=180$

Figura 5.34: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=45$; $\phi=0$

Figura 5.35: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=45$; $\phi=45$

Figura 5.36: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=45$; $\phi=90$

Figura 5.37: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=45$; $\phi=135$

Figura 5.38: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=45$; $\phi=180$

Figura 5.39: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=90$; $\phi=0$

Figura 5.40: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=90$; $\phi=45$

Figura 5.41: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=90$; $\phi=90$

Figura 5.42: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=90$; $\phi=135$

Figura 5.43: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=90$; $\phi=180$

Figura 5.44: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=135$; $\phi=0$

Figura 5.45: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=135$; $\phi=45$

Figura 5.46: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=135$; $\phi=90$

Figura 5.47: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=135$; $\phi=135$

Figura 5.48: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=135$; $\phi=180$

Figura 5.49: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=180$; $\phi=0$

Figura 5.50: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=180$; $\phi=45$

Figura 5.51: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=180$; $\phi=90$

Figura 5.52: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=180$; $\phi=135$

Figura 5.53: FIT para $\alpha=0.25$; $\Theta=180$; $\phi=180$

Figura 5.54: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=0$; $\phi=0$

Figura 5.55: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=0$; $\phi=45$

Figura 5.56: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=0$; $\phi=90$

Figura 5.57: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=0$; $\phi=135$

Figura 5.58: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=0$; $\phi=180$

Figura 5.59: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=45$; $\phi=0$

Figura 5.60: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=45$; $\phi=45$

Figura 5.61: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=45$; $\phi=90$

Figura 5.62: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=45$; $\phi=135$

Figura 5.63: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=45$; $\phi=180$

Figura 5.64: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=90$; $\phi=0$

Figura 5.65: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=90$; $\phi=45$

Figura 5.66: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=90$; $\phi=90$

Figura 5.67: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=90$; $\phi=135$

Figura 5.68: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=90$; $\phi=180$

Figura 5.69: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=135$; $\phi=0$

Figura 5.70: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=135$; $\phi=45$

Figura 5.71: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=135$; $\phi=90$

Figura 5.72: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=135$; $\phi=135$

Figura 5.73: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=135$; $\phi=180$

Figura 5.74: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=0$

Figura 5.75: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=45$

Figura 5.76: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=90$

Figura 5.77: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=135$

Figura 5.78: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=180$

Figura 5.79: Comparación de FIT con $\Theta=0$; $\phi=45$; $\Omega=500$

Figura 5.80: Comparación de FIT con $\Theta=180$; $\phi=0$; $\Omega=1000$

Figura 5.81: Comparación de FIT con $\Theta=135$; $\phi=90$; $\Omega=1000$

Figura 5.82: Módulo COPEN con apertura de fisura

Figura 5.83: Obtención de áreas fisuradas abiertas mediante SOLID EDGE

Figura 5.84: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.1$ y $\Omega=500$ rpm

Figura 5.85: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.1$ y $\Omega=1000$ rpm

Figura 5.86: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.1$ y $\Omega=500$ rpm

Figura 5.87: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.25$ y $\Omega=500$ rpm

Figura 5.88: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.25$ y $\Omega=1000$ rpm

Figura 5.89: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.25$ y $\Omega=1500\text{rpm}$

Figura 5.90: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.5$ y $\Omega=500\text{rpm}$

Figura 5.91: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.5$ y $\Omega=1000\text{rpm}$

Figura 5.92: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.5$ y $\Omega=1500\text{rpm}$

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Muchas veces, los componentes mecánicos de máquinas rotativas, los cuáles hoy en día son muy utilizados, como rotores y compresores, presentan inevitables defectos de fabricación que pueden derivar en la propagación de una fisura debido a las condiciones en las que trabaja o cuando son sometidos a sollicitaciones. Éste fenómeno puede llegar a influir en las propiedades del material reduciendo su resistencia y acortando su vida útil.

Es por eso que hoy en día se realizan numerosos estudios en busca de detección de fisuras en elementos mecánicos evaluando en caso de ser detectadas fisuras, si es admisible su tamaño para no poner en riesgo la integridad del componente.

Uno de los principales componentes en estas máquinas son los ejes. Cuando un eje fisurado rota, dicha fisura se abre y cierra momentáneamente. Dicha fisura se propaga en dirección perpendicular al eje de rotación debido a los esfuerzos de flexión y torsión a fatiga que soporta y que están producido por las rotaciones cíclicas del eje.

Además, los ejes pueden presentar desajustes y desequilibrios que alteran su normal funcionamiento. Dicho desequilibrio suele estar producido por una masa excéntrica.

Este trabajo estudia el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT), un parámetro que está directamente relacionado con la propagación de la fisura y por tanto, con la vida útil de los elementos trabajando a fatiga.

1.2 OBJETIVOS

En este proyecto, basándonos en los conocimientos adquiridos, se va a analizar cómo evoluciona el Factor de Intensidad de Tensiones K (FIT) en un eje que está fisurado cuya fisura tiene el frente recto dependiendo de una serie de parámetros como son:

- Relación de la profundidad de la fisura respecto del diámetro
- Velocidad angular, cuyo efecto se interpretará como la fuerza normal que realiza la masa excéntrica
- Orientación de la fisura respecto de los apoyos del eje
- Orientación de la masa excéntrica respecto de la fisura

Dicho Factor de Intensidad de Tensiones que se va a analizar es el FIT a fractura a tracción K_I .

Adicionalmente, también se analizará la proporción de área fisurada que queda abierta respecto del área total transversal del eje.

Dicho proyecto se realizará utilizando el Método de los Elementos Finitos a través programa ABAQUS, con el que obtendremos el FIT y la relación de área fisurada abierta respecto de la total.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

El presente estudio se divide en siete capítulos. En el primero se indican la introducción y objetivos. En el segundo, el planteamiento teórico y antecedentes históricos relacionados con la mecánica de la fractura. En el tercero, una introducción al análisis numérico de modelos. El cuarto capítulo muestra cómo se ha modelizado el eje en ABAQUS. En el quinto capítulo se exponen los resultados obtenidos. En el sexto se extraen las conclusiones tras el análisis de éstos y en el séptimo se elabora un presupuesto del presente trabajo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Los problemas debidos al fenómeno de fractura se remontan a la Edad de Piedra con la dificultad en conformado de materiales. Problemas que perduraron durante la Edad de Bronce y la Edad de Hierro con el conformado de metales. Poco a poco con la inclusión de metales para la construcción de estructuras o armamento se producían distintas roturas inesperadas.

Más recientemente, a mediados del Siglo XX, durante la II Guerra Mundial, el problema de la fractura fue de gran preocupación. Especialmente, en la fabricación de barcos de guerra, los cuales se fabricaban mediante soldadura presentándose en un elevadísimo porcentaje problemas de fracturas en ellos. Esto era debido a que el acero no era el adecuado para ser ensamblado con las nuevas tecnologías de soldadura. En la actualidad, los problemas relacionados con la fractura de materiales, se reducen a casos aislados en plataformas petrolíferas, aviación o puentes entre otros.

Los primeros estudios en el campo de la fractura se remontan a Leonardo da Vinci el cual estableció una serie de indicios que causaban la fractura mediante la medición de la resistencia de una serie de alambres de hierro llegando a la conclusión de que a mayor volumen de material, mayor probabilidad hay de encontrar un defecto.

En el Siglo XX Griffith estableció la relación entre la fractura y el tamaño de los defectos aplicando el Primer Principio de la Termodinámica estableciendo con ello un balance de energía. Su conclusión fue que una grieta se hace inestable cuando el cambio de energía tensional resultado de un incremento de la grieta, es mayor que la energía superficial del material. Pese a todo, la teoría de Griffith se limitaba a materiales frágiles, es decir, no pudo aplicarla a metales.

Posteriormente, ya a mediados del Siglo XX un grupo de investigadores liderados por el Dr. G.R. Irwin, extendieron los postulados de Griffith a los metales. Posteriormente, Irwin

demonstró que los desplazamientos y tensiones cerca del frente de fisura podían ser relacionados con la tasa de liberación de energía mediante un parámetro, dicho parámetro es lo que hoy se conoce como Factor de Intensidad de Tensiones.

2.2 MECÁNICA DE LA FRACTURA ELÁSTICA LINEAL

La Mecánica de la Fractura es la disciplina que estudia la influencia de defectos o fisuras en componentes estructurales, tanto sobre el estado tensional como sobre los posibles eventos de fallo catastrófico del componente.

La MFEL toma como hipótesis principal que el material es elástico y lineal y que además la carga a la que está sometido es estática. Sus principios se usan para establecer una relación, en las proximidades de la fisura, entre la magnitud que alcanzan las tensiones y su distribución con las tensiones aplicadas no tan cerca de la fisura, forma de la fisura, su tamaño y propiedades del material. Es decir, la teoría elástica lineal predice las tensiones en el fondo de una fisura y establece que el tamaño de ésta ha de ser bastante mayor que la dimensión microestructural característica.

Una grieta en un sólido puede presentar tres modos diferentes de estado de tensiones que dependen de la dirección de aplicación de la carga con respecto de ésta.

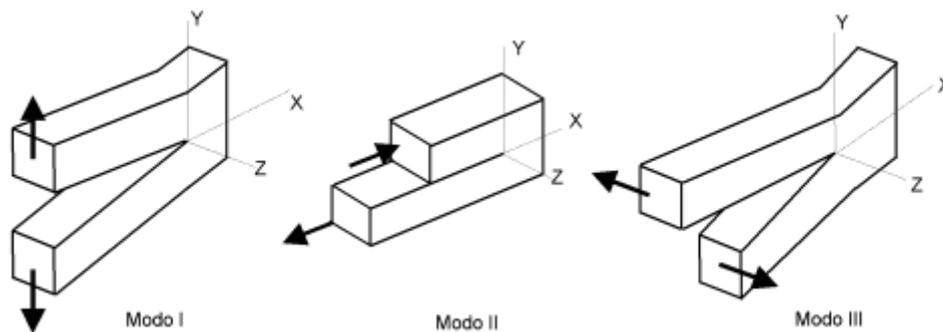


Figura 2.1. Modos de fallo

El Modo I, denominado modo de apertura, se produce cuando las tensiones son perpendiculares a la fisura.

En el Modo II, también llamado modo de cizallamiento, los esfuerzos de la fisura son perpendiculares al frente de la fisura y paralelos a las caras de ésta.

Los esfuerzos cortantes son paralelos al frente de la fisura y a las caras de ésta en el modo III, conocido también como modo de desgarramiento.

El modo I de fractura es técnicamente el más importante ya que es el que más frecuente. Esto es debido a que si las solicitaciones externas sobre un sólido inducen un crecimiento en una fisura que se encuentre contenida en él, ésta tiende espontáneamente, siempre que puede, a quedar orientada según el Modo I de fallo. Los Modos II y III son menos habituales a pesar de que en algunas ocasiones se presentan varios modos a la vez, habitualmente el modo I y el modo III.

Para cualquier modo, las tensiones locales cercanas a la fisura responden a una expresión del tipo siguiente.

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} f_{ij}(\theta) + \dots \quad [2.1]$$

Donde θ y r responden a las coordenadas cilíndricas de un punto cualquiera respecto al borde de la fisura. K_I es el factor de intensidad de tensiones en el modo I.

K_I depende del tamaño y la forma de la fisura además del tipo de cargas y las condiciones de contorno del material y se suele expresar de la siguiente manera.

$$K_I = f(g) \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [2.2]$$

Donde a es la profundidad de la fisura, σ es la tensión remota que se aplica y $f(g)$ es un parámetro adimensional que depende de la geometría del material y de la fisura.

Por lo que K_I describe la intensidad del campo de tensiones en una fisura en cualquier elemento estructural siempre y cuando $f(g)$ pueda ser determinado.

2.2.1 Tenacidad de fractura

Cuando el Factor de Intensidad de Tensiones en el frente fisurado, K_I , alcanza un valor crítico se produce una fractura inestable. Este valor crítico, cuando tenemos Modo I de fallo, se denomina K_{Ic} . Éste determina la capacidad que tiene un material de soportar un estado tensional en la zona de la fisura y de aguantar las deformaciones progresivas. Por tanto, representa la tenacidad del material.

De manera que, para evitar que se produzca una fractura inestable, el Factor de Intensidad de Tensiones tiene que ser menor que el Factor de Intensidad de Tensiones crítico, es decir:

$$K_{IC} \leq K_I \quad [2.3]$$

2.2.2 Crecimiento de la fisura

La velocidad de propagación de una fisura que se encuentra solicitada a cargas cíclicas se expresa de la siguiente forma.

$$da/dN \quad [2.4]$$

Es decir, se expresa en función del aumento del tamaño de la fisura respecto del número de ciclos.

Para calcular el crecimiento de la fisura, utilizamos la Ley de Paris, el cual en 1961, mediante una gráfica logarítmica de velocidad de propagación frente a FIT, estableció una relación lineal. Gracias a esto, se pueden realizar cálculos cuantitativos sobre la vida de un material dependiendo del tamaño de la fisura.

Las ecuaciones y parámetros que intervienen en esta Ley son los siguientes:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad [2.5]$$

Donde K_{max} y K_{min} son los valores máximo y mínimo respectivamente del FIT en un ciclo de tensión. Con lo que aplicando las ecuaciones antes descritas tenemos:

$$K_{max} = f(g) \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad K_{min} = f(g) \cdot \sigma_{min} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad [2.6]$$

$$\Delta K = f(g) \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Finalmente se llega a la relación lineal que estableció Paris.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad [2.7]$$

2.2.3 Cierre y apertura de la fisura

Debido a los ciclos de fatiga, la posición relativa de la fisura con respecto a los esfuerzos que inciden sobre el eje variará. Por lo tanto, el estado tensional en la zona que se encuentra fisurada también variará.

Una fisura situada en un plano transversal al eje podrá abrirse o cerrarse dependiendo de si los esfuerzos a los que se encuentra sometida son de tracción o compresión, que a su vez dependen del tipo y posición relativa de la fisura con respecto de las cargas que actúan.

En la *Figura 2.2* se muestra cómo un eje, el cual se encuentra sometido a flexión, presenta esfuerzos de tracción y compresión en la sección central.

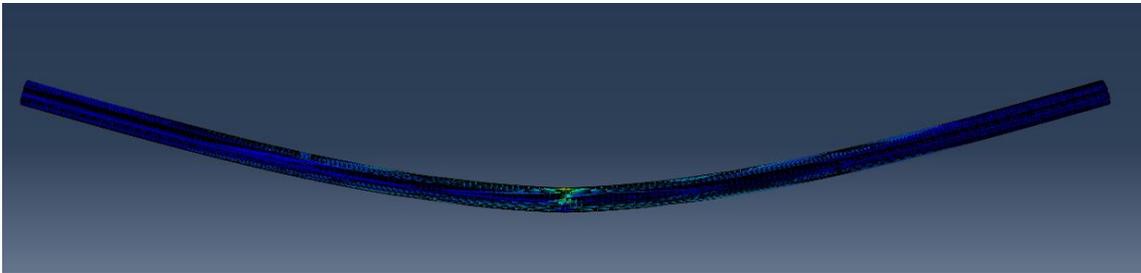


Figura 2.2. Eje sometido a flexión

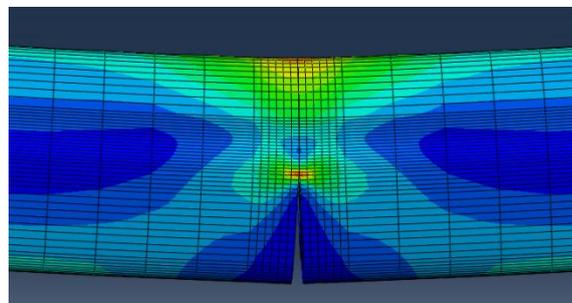


Figura 2.3. Detalle de apertura del eje

En la parte superior del eje se ve que actúan esfuerzos de compresión, mientras que los esfuerzos de tracción hacen que los labios de la fisura en la parte inferior del eje se separen. A medida que el eje va girando, los esfuerzos en la fisura van cambiando de manera que, cuando el eje haya girado media vuelta, los esfuerzos en los labios de la fisura serán a compresión por lo que la fisura pasará a estar cerrada.

Esta apertura y cierre de la fisura es lo que se conoce como *breathing* de la fisura y

más adelante se evaluará cómo influye en los resultados, ya que uno de los objetivos finales de este proyecto es analizar el porcentaje de área abierta.

En un punto de la fisura, el Factor de Intensidad de Tensiones será mayor que cero si dicho punto se encuentra en la zona fisurada abierta. Si por el contrario, se encuentra en la zona fisurada cerrada, el valor del Factor de Intensidad de Tensiones es cero.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS NUMÉRICO

3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El Método de los Elementos Finitos (MEF), es una herramienta que se utiliza en la actualidad en el ámbito de la ingeniería para resolver problemas mediante cálculo computacional.

Este método, transforma un modelo sobre el que están definidas las ecuaciones diferenciales del movimiento aproximándolo mediante un modelo discreto que se resuelve con ecuaciones algebraicas, permitiendo reducir el uso de prototipos y modelos experimentales, más caros y lentos. También permite realizar comparaciones para una continua optimización, cuyo coste computacional depende de la geometría y de la complejidad del modelo.

El proceso de aproximación del medio continuo al modelo discreto se conoce como discretización, de forma que el modelo queda dividido en un número finito de elementos conectados entre sí por sus puntos de unión o nodos.

En cada elemento se relacionan tensiones y deformaciones por medio de unas ecuaciones constitutivas definidas en función de las propiedades mecánicas del material.

Mediante el MEF, con el uso de las ecuaciones constitutivas, unas condiciones de contorno y la compatibilidad de movimientos de los nodos, se consigue un sistema de ecuaciones lineales o no lineales, con un número finito de grados de libertad. Esto permite aproximar el problema del movimiento y deformación del medio continuo sin resolver la más compleja integración de ecuaciones diferenciales del movimiento.

El estudio de un proceso físico mediante MEF se divide en las tres etapas que a continuación se indican:

- Preproceso: Consiste en los pasos previos al cálculo, es decir, la definición del modelo. Conlleva el diseño de la geometría del modelo, selección del material con sus propiedades, sistema de cargas que actúan sobre el modelo, condiciones de contorno y discretización o mallado del modelo.
- Resolución: Donde se realiza todo el cálculo necesario. En esta etapa se elige el tipo de cálculo, número de iteraciones, parámetros o intervalos de tiempo entre otras cosas.
- Postproceso: Es la etapa en la que se obtienen los resultados y soluciones gráficas del modelo analizado.

3.2 INTRODUCCIÓN AL ABAQUS 6.12

ABAQUS es un código de resolución que utiliza el Método de los Elementos Finitos que más se emplea hoy para la resolución de problemas en ingeniería. Sus campos de actuación son muy numerosos como lo puede ser la resistencia de materiales, termodinámica, ingeniería estructural o mecánica de la fractura entre otros.

ABAQUS está dividido en varios módulos, los cuales se corresponden con cada una de las etapas en las que se divide un proceso para ser realizado mediante el uso del Método de los Elementos Finitos. Dichos módulos son los siguientes:

- ABAQUS/Standard y ABAQUS/Explicit: Se corresponden con la etapa de resolución, se utilizan para la resolución de problemas con la diferencia de que con ABAQUS/Explicit se tiene la posibilidad de realizar un análisis dinámico mientras que con ABAQUS/Standard no.
- ABAQUS/CAE: Se corresponde con la etapa de preproceso, se utiliza para el diseño de los modelos que serán analizados.
- ABAQUS/Viewer: Se corresponde con la parte de postproceso, es decir, la visualización de las soluciones y resultados del modelo que ABAQUS/Standard y ABAQUS/Explicit han calculado.

Utilizando la interfaz de ABAQUS 6.12, el programa se estructura de la siguiente forma:

- Part: En la cual diseñamos la pieza, con su geometría y dimensiones.
- Property: En este apartado se introducen las propiedades del modelo de material o materiales que vamos a utilizar en las distintas piezas de nuestro modelo. Además se asigna el material a cada parte del modelo creado.
- Assembly: En este módulo se ensamblan todas las piezas que forman el modelo definiendo la relación que hay entre todas ellas y la posición relativa entre unas y otras.
- Step: Donde se elige si se quiere realizar el análisis en una o diferentes etapas. Es de gran utilidad cuando se producen cambios en el modelo durante el transcurso del análisis.

- Interaction: Aquí estableceremos las interacciones entre las distintas partes de nuestro modelo como por ejemplo el contacto entre ellas.
- Load: En este módulo se introducen tanto el sistema de cargas que actúan sobre el modelo como las condiciones de contorno ya sean apoyos, desplazamientos o impedimento de éstos.
- Mesh: Aquí se genera la malla del modelo según el número de nodos que se quieran tener, en nuestro caso, nuestra malla constará de unos 80.000 elementos. Esta malla podrá refinarse todo lo que se quiera teniendo en cuenta la geometría del modelo y que cuantos más elementos haya, más tiempo de cálculo requerirá ABAQUS.
- Job: Como su nombre indica, aquí se crea el archivo para el trabajo del análisis (input file) y desde donde se puede ver cómo va el proceso de cálculo.
- Visualization: En este módulo se muestran los resultados del análisis del modelo en forma de gráficas y tablas.
- Sketch: Donde se pueden realizar modelos a partir de bocetos, este módulo será el único que no se emplee en la realización de este proyecto.

CAPÍTULO 4

FORMULACIÓN DEL MODELO EN ABAQUS

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Nuestro modelo consistirá en un rotor Jeffcott ampliamente utilizado a día de hoy. Este modelo consiste en un eje simple biapoyado con un disco situado en el centro. Dicho disco posee una masa actuando como masa excéntrica. La fisura se situará también en el centro del eje en el plano perpendicular al eje de éste.

La longitud total del eje será de 900 milímetros, mientras que el diámetro es de 20 milímetros. El material del eje es aluminio con las siguientes propiedades mecánicas:

- Módulo de Young, $E = 72 \text{ GPa}$
- Densidad, $\rho = 2800 = \text{Kg/m}^3$
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0.33$

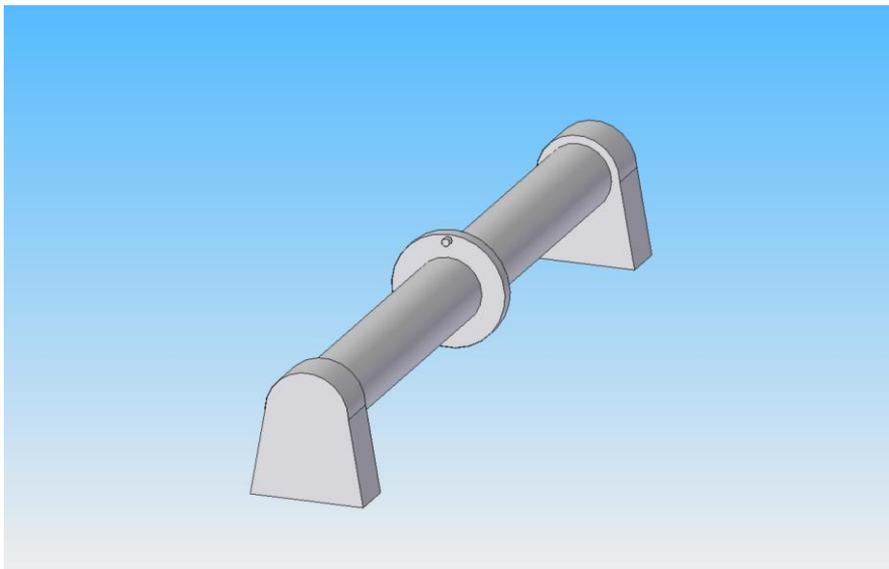


Figura 4.1: Rotor Jeffcot con masa excéntrica

El análisis se realizará variando el ángulo de rotación del eje θ . En total se calcularán para cinco posiciones angulares que van desde los 0° hasta los 180° como se muestra en la *Figura 4.2*.

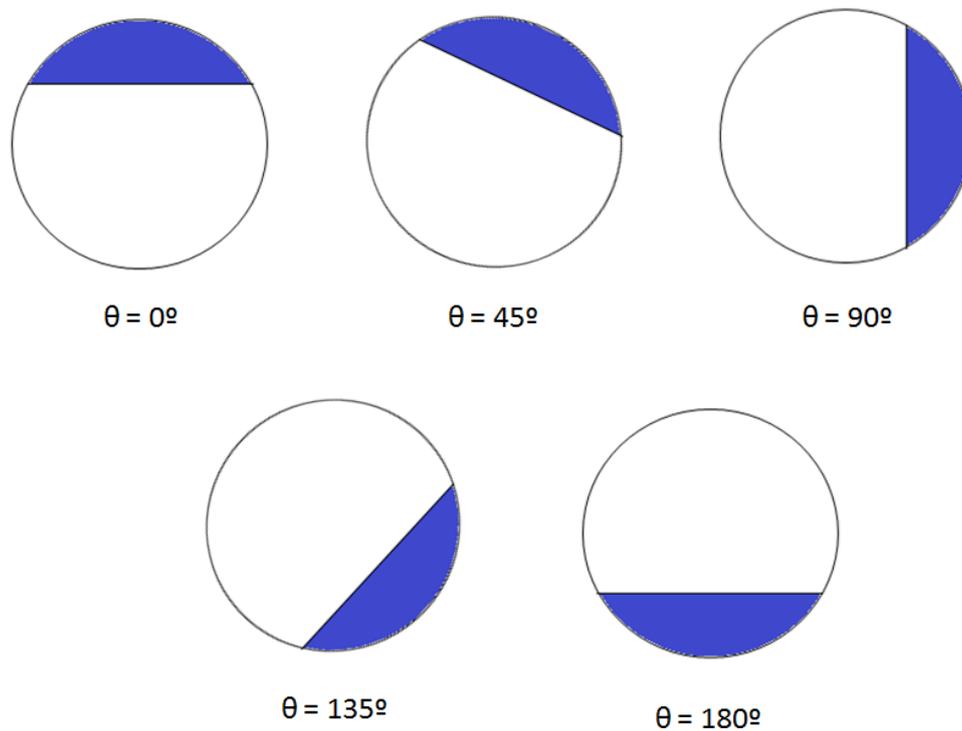


Figura 4.2: Posiciones angulares relativas de la fisura estudiadas

La influencia de la masa excéntrica sobre la fisura será estudiada considerándola situada en el disco. Dicha masa excéntrica será medida desde otros 5 ángulos ϕ que irán desde los 0° hasta los 180° medidos desde la posición de la fisura.

Para simplificar el modelo, la influencia de la masa excéntrica será simulada como una fuerza normal que dependerá de la masa que tenga la masa excéntrica, la distancia de la masa excéntrica al centro del eje y la velocidad angular. Los valores tomados para esto serán $m = 0.2 \text{ Kg}$, $e = 80 \text{ mm}$, y las velocidades angulares serán $\Omega = 500 \text{ rpm}$; 1000 rpm y 1500 rpm .

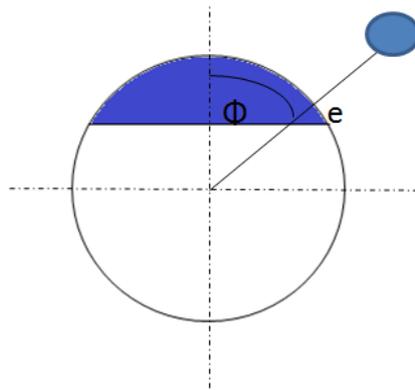


Figura 4.3: Posición relativa de la excentricidad

El último valor que irá variando en los modelos que se van a realizar es el tamaño de la fisura $\alpha = a/D$. Donde a es la profundidad de la fisura y D es el diámetro del eje. Los valores de α serán 0.1; 0.25 y 0.5.

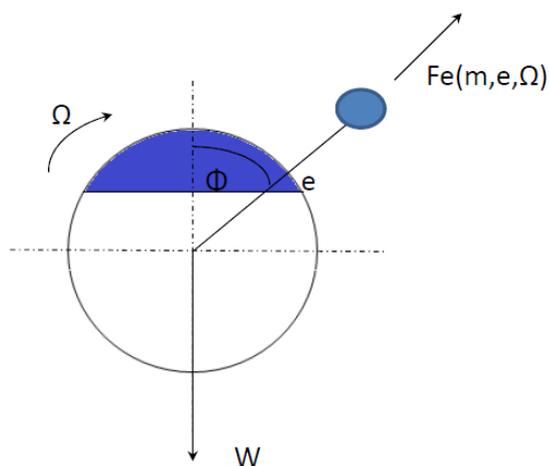


Figura 4.4: Resumen de fuerzas aplicadas en el eje

En total, se han simulado 225 casos de acuerdo a los distintos valores de las variables indicadas:

- Longitud de la fisura $\alpha = 0.1; 0.25; 0.5$
- Ángulo de excentricidad $\phi = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ; 180^\circ$
- Ángulo de rotación $\theta = 0^\circ; 45^\circ; 90^\circ; 135^\circ; 180^\circ$
- Velocidad angular $\Omega = 500\text{rpm}; 1000\text{rpm}; 1500\text{rpm}$

4.2 REALIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN MEDIANTE ABAQUS 6.12

A la hora de realizar el modelo en ABAQUS se ha construido el eje como la suma de otros dos del mismo material y dimensiones y simétricos respecto al eje de coordenadas. Esto se hace para que, a la hora de evaluar resultados en la mitad del eje, sea más sencillo utilizar las herramientas que ABAQUS proporciona.

El sistema de fuerzas considerado consiste en el peso el cuál se considerará como una carga puntual y la fuerza normal de la excentricidad que varía de dirección.

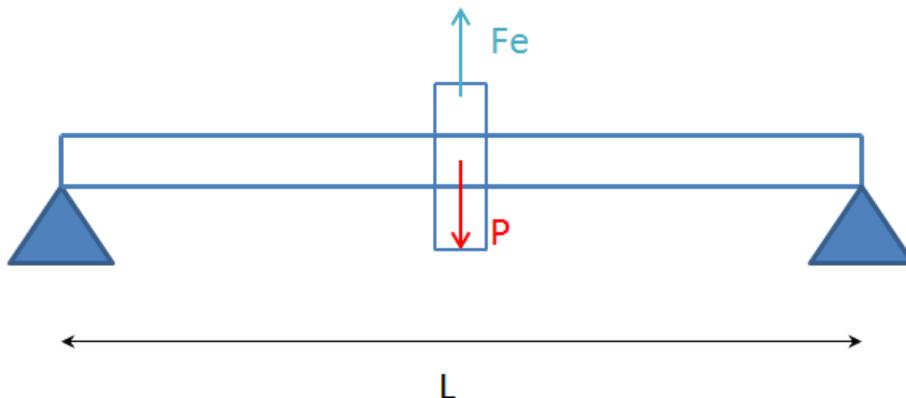


Figura 4.5: Disposición de fuerzas

Las 225 variantes resultantes de combinar las distintas disposiciones tanto de fuerzas como geométricas se realizarán mediante ABAQUS 6.12.

- Módulo Part

Aquí se dibujan 2 cilindros de 450mm de longitud de 20mm de diámetro cada uno que posteriormente se unirán. También se crean las particiones en cada cilindro que nos serán de utilidad a la hora de definir las propiedades del contacto, frente de fisura o el mallado.

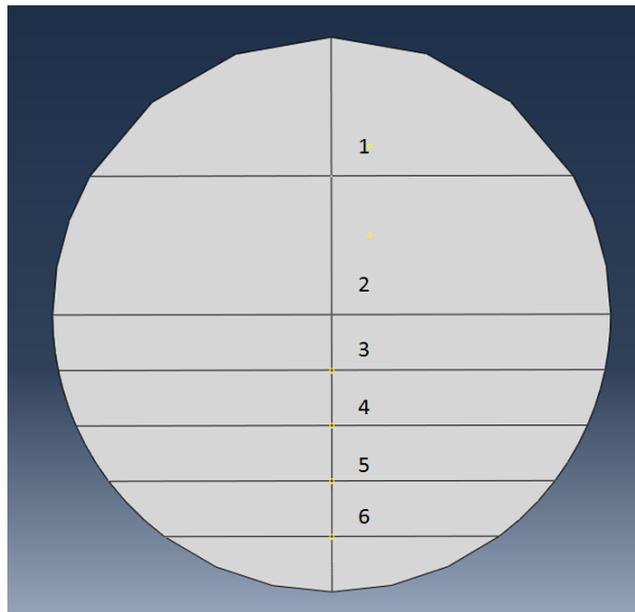


Figura 4.6. Particiones del eje longitudinales

En la *Figura 4.6.* se pueden apreciar seis particiones en el eje. Las particiones "2", "4" y "6" se utilizarán para situar los frentes de fisura y establecer los tipos de contacto entre las dos mitades para $\alpha = 0.5$, $\alpha = 0.25$ y $\alpha = 0.1$ respectivamente.

Las particiones "1" y "5" se utilizarán para facilitar la colocación de los apoyos en las condiciones de contorno cuando éstos estén a un ángulo $\theta = 45^\circ$ y $\theta = 135^\circ$.

Por último, la partición "3" se utilizará para facilitar la elaboración de un mallado más fino en esa zona.

- Módulo Property

Aquí, como se ha indicado antes, se crea el modelo del material con las propiedades del aluminio que recordamos son densidad $\rho=2800\text{Kg}/\text{m}^3$, coeficiente de Poisson $\nu=0.33$ y Módulo de Elasticidad $E=72\text{GPa}$. Posteriormente en este mismo módulo también asignamos el material creado a ambas partes. Nótese que en la *Figura 4.7.* el eje está de color verde con lo cual tiene el material asignado.

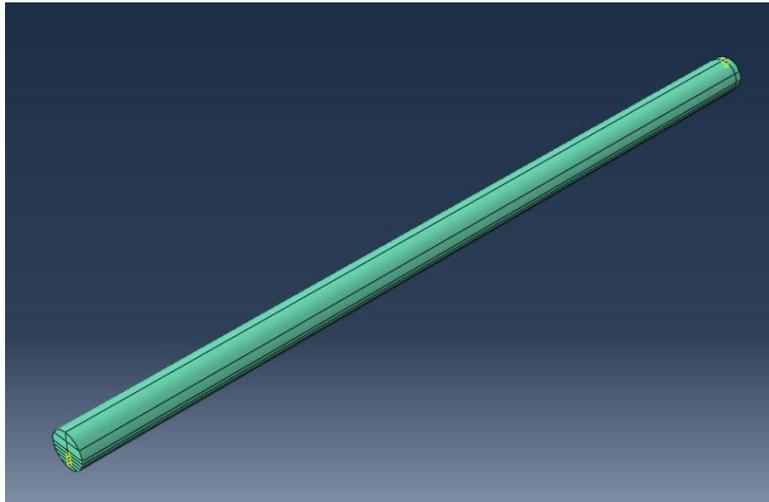


Figura 4.7. Material asignado en módulo Property

- Módulo Assembly

Este módulo se utilizará para unir las dos mitades del eje en el mismo sistema de coordenadas utilizando un solo "instance Part". Una vez unidos, creamos los "Reference Points". En total crearemos 10 "Reference Points", 2 por ángulo ϕ de la fuerza excéntrica ya que ésta en el siguiente módulo será dividida en 2.

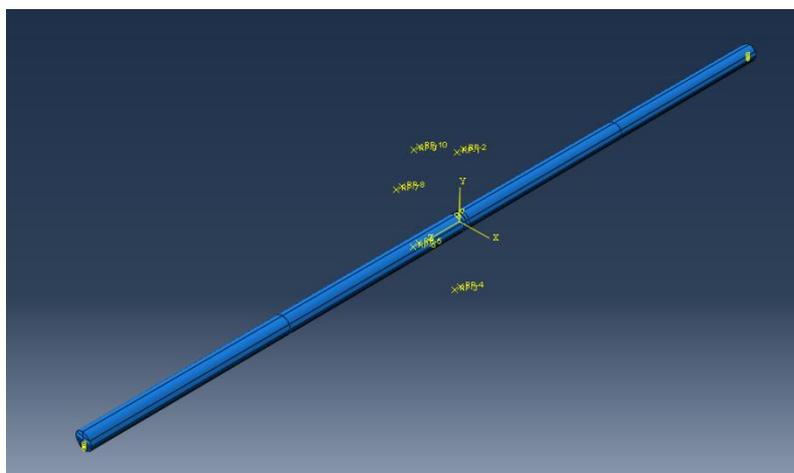


Figura 4.8: Ejes ensamblados y Reference Points

- Módulo Step

Aquí se disponen de 2 Steps distintos. El "*Step Initial*" con las condiciones de contorno iniciales y el Step que se crea en el que se someterá el eje al sistema de cargas correspondiente en cada caso.

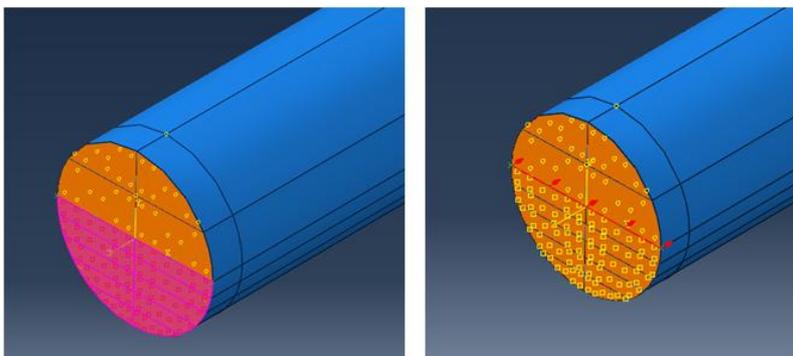
- Módulo Interaction

En este módulo se ha de establecer la relación entre las caras de los 2 cilindros que están en contacto dependiendo de la posición de la fisura.

En la parte que no está fisurada se seleccionará la opción "*Constraint*" del tipo "*Tie*" lo que representa que ambas partes están unidas como si de la misma se tratase. Para la parte fisurada, se tiene que seleccionar un contacto del tipo "*Surface to Surface*". Esto quiere decir que cada mitad del eje está en contacto con la otra mitad pero no unidas, y se utiliza para evitar que debido a la compresión una parte penetre en la otra.

Se define en este módulo los frentes de fisura, uno por cada mitad del eje, de los cuales mantendrán el nombre que vienen por defecto en el programa "*crack_1*" y "*crack_2*".

También, para simular el disco del rotor Jeffcot, se utilizará la opción "*Constraint*" del tipo "*Tie*" que ABAQUS interpreta como que la excentricidad forma parte del modelo creado ya que de no hacerla el programa daría un error debido a que hay una fuerza que actúa sobre un punto aislado del modelo.



$$\alpha = 0.5$$

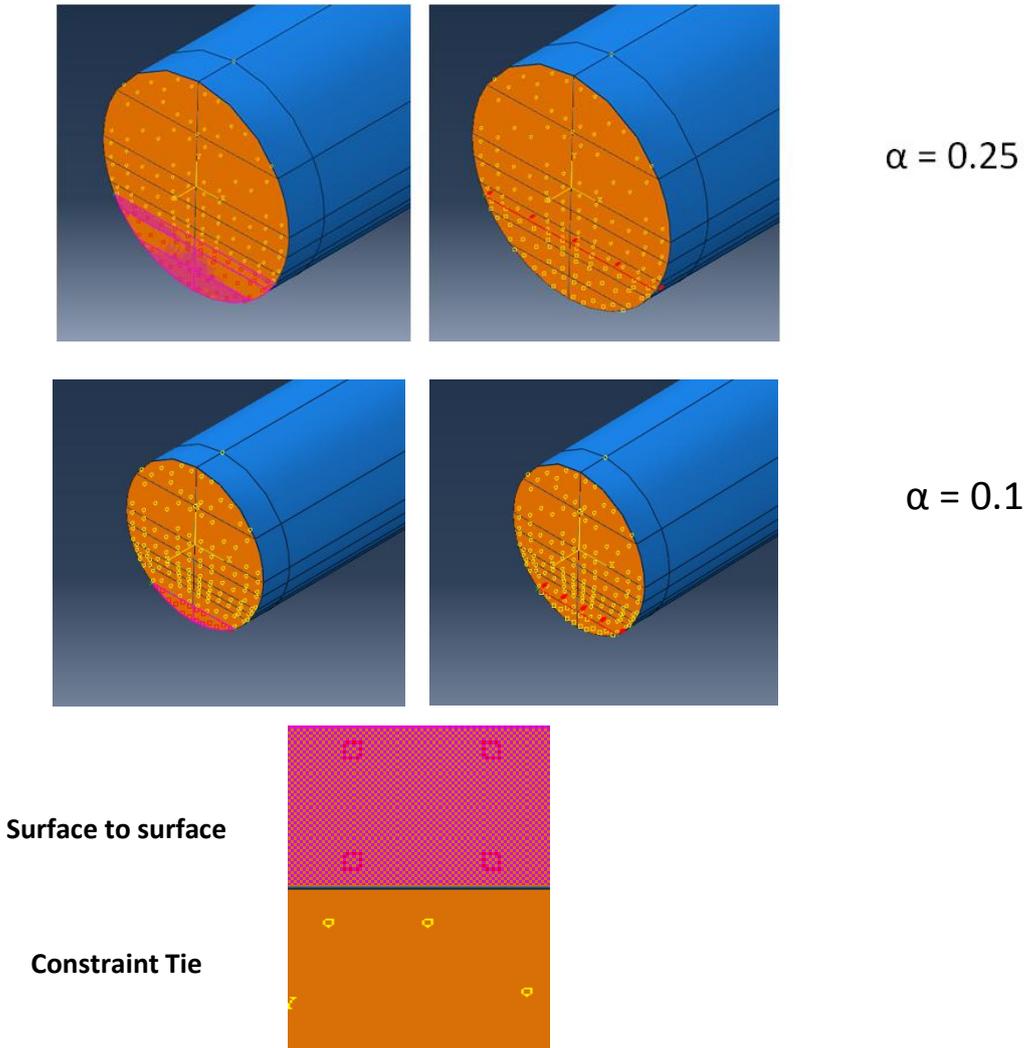


Figura 4.9. Contacto entre superficies y frentes de fisura

- Módulo Load

En este módulo se procederá a introducir las fuerzas que actúan sobre el eje. El peso, como se ha dicho anteriormente, se representará como una fuerza puntual dividida entre las dos mitades del eje con valor de 25N.

La fuerza excéntrica también será dividida entre las dos mitades del eje y tendrá el valor de:

$$F_e = m \cdot \Omega^2 \cdot e \quad [4.1]$$

Donde m es la masa de la excentricidad, Ω la velocidad angular y e , el valor de la distancia de la excentricidad, como se ha mencionado antes 80mm.

- Módulo Mesh

A continuación, se muestran en la *Figura 4.10*, los distintos mallados que variarán según el tamaño de la fisura α . Nótese, que el mallado es mucho más preciso cuanto más cerca está de la fisura.

Para realizar el mallado, el eje se ha dividido en unos 80.000-100.000 elementos, ya que aplicando mallados más precisos exigían un ordenador mucho más potente del que se ha utilizado. (Para dar una idea de la magnitud del cálculo, se mencionará que éste se ha realizado utilizando un procesador de 4 núcleos y 10 Gigabytes de memoria RAM). Con esto, cada uno de los 225 modelos tardaba en calcularse en un tiempo entre 45 minutos y 90 minutos.

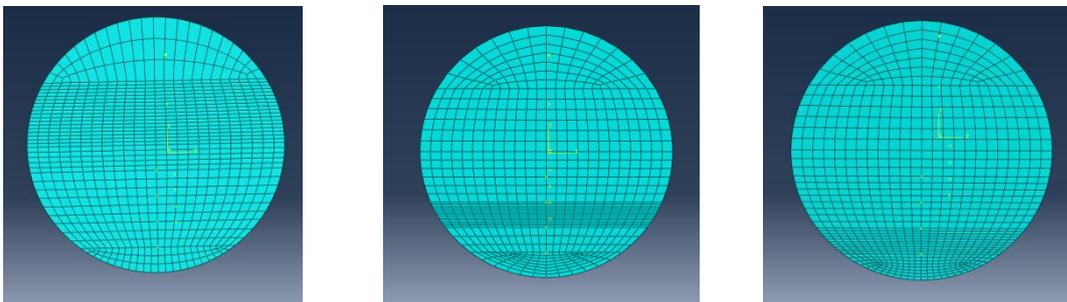


Figura 4.10. Mallado del sección transversal

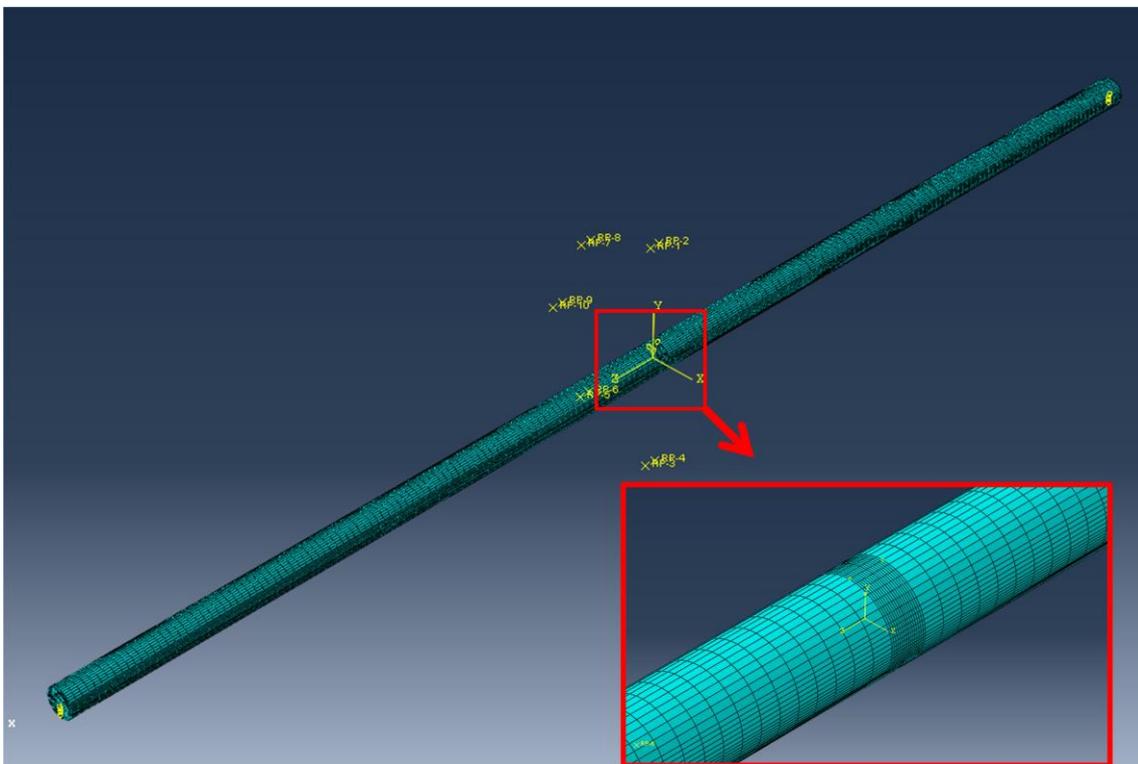


Figura 4.11. Mallado del eje longitudinal

- Módulo Visualization

Aquí se comprueban los resultados. En el caso de este trabajo, se utilizará la opción COPEN para comprobar el área que está abierta y se obtendrá también el Factor de Intensidad de Tensiones el cual dará el programa.

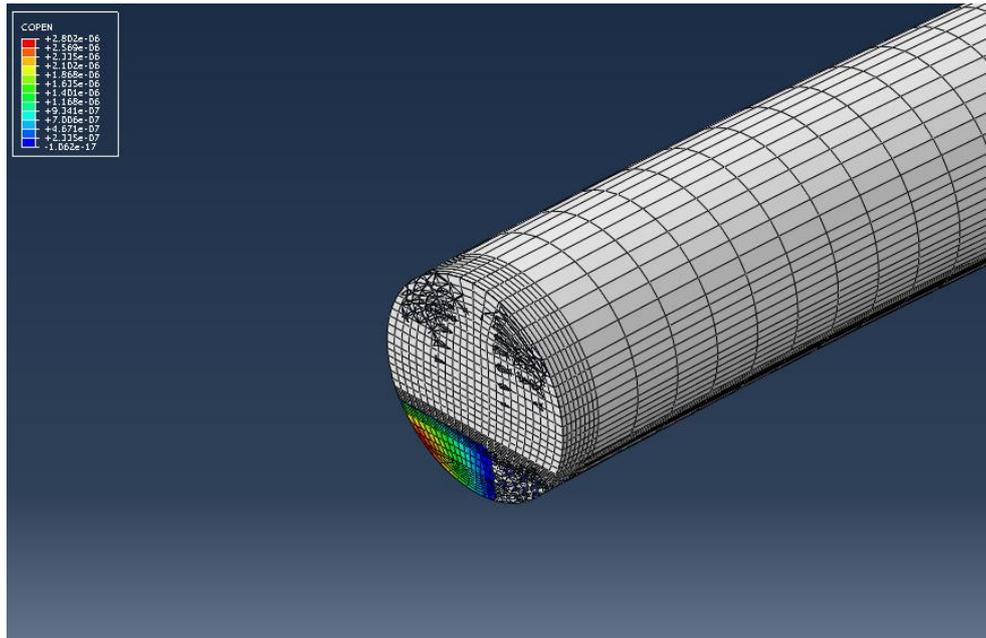


Figura 4.12. Área Fisurada abierta

Por último, para calcular el área abierta, se ha utilizado el programa SOLID EDGE V20 ya que tiene la opción de calcular áreas. De forma que introduciendo la imagen que obtenemos de ABAQUS insertándola en SOLID EDGE conseguimos calcular el área fisurada y el área total para obtener la proporción de área fisurada abierta entre la total.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1 FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

A continuación se expondrán los valores del Factor de Intensidad de Tensiones. Una vez realizado el cálculo se ha de seleccionar los valores para cada posición relativa del frente de fisura γ que queremos estudiar. ABAQUS, muestra el resultado del FIT para cada lado del eje. Para calcular el FIT total, se suman los FIT de un lado y otro, es decir, $K_I = K_{Icrack_1} + K_{Icrack_2}$. Por último, cabe señalar que cuando la fisura se encuentra abierta, el FIT tendrá un valor positivo. De lo contrario, cuando esté cerrada, el valor del FIT debería ser cero aunque ABAQUS nos lo mostrará como un valor negativo lo consideraremos en los resultados como cero. Esta consideración se ha obtenido como resultado de estudios previos como puede ser la Tesis Doctoral de la Dra. Patricia Rubio.

5.1.1 FIT para $\alpha = 0,1$

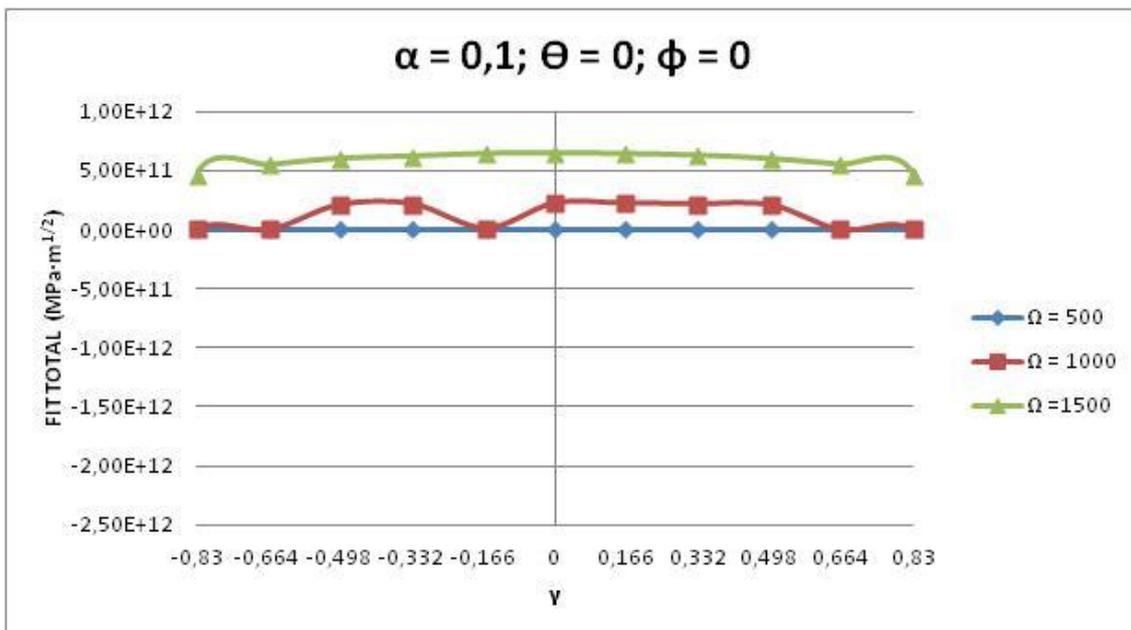


Figura 5.1: FIT para $\alpha=0.1$; $\theta=0$; $\varphi=0$

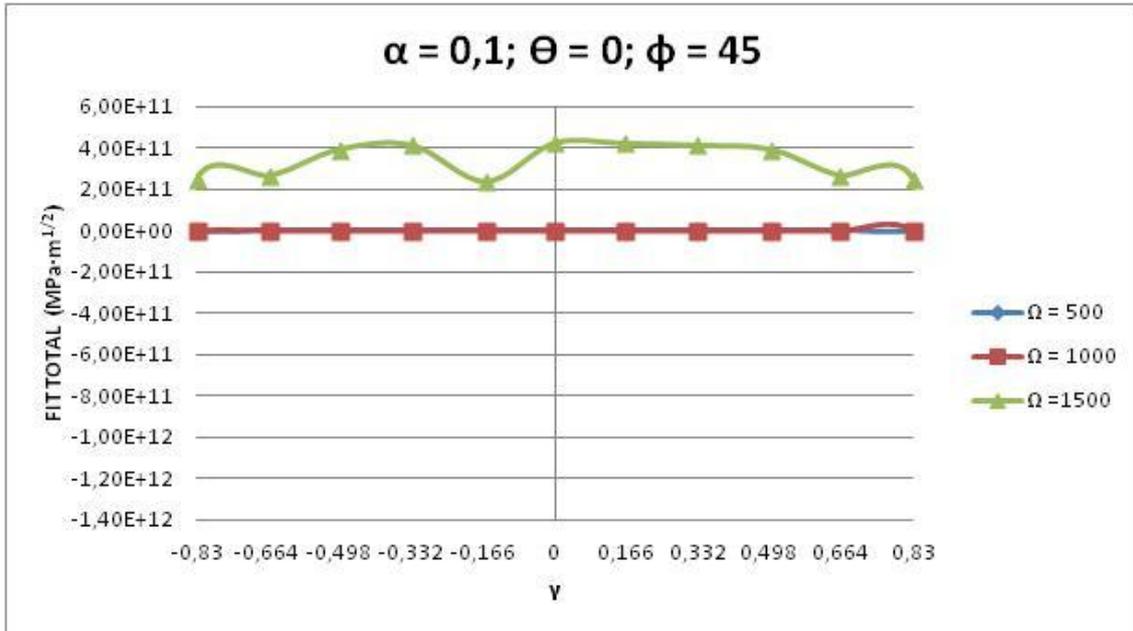


Figura 5.2: FIT para $\alpha=0.1; \theta=0; \phi=45$

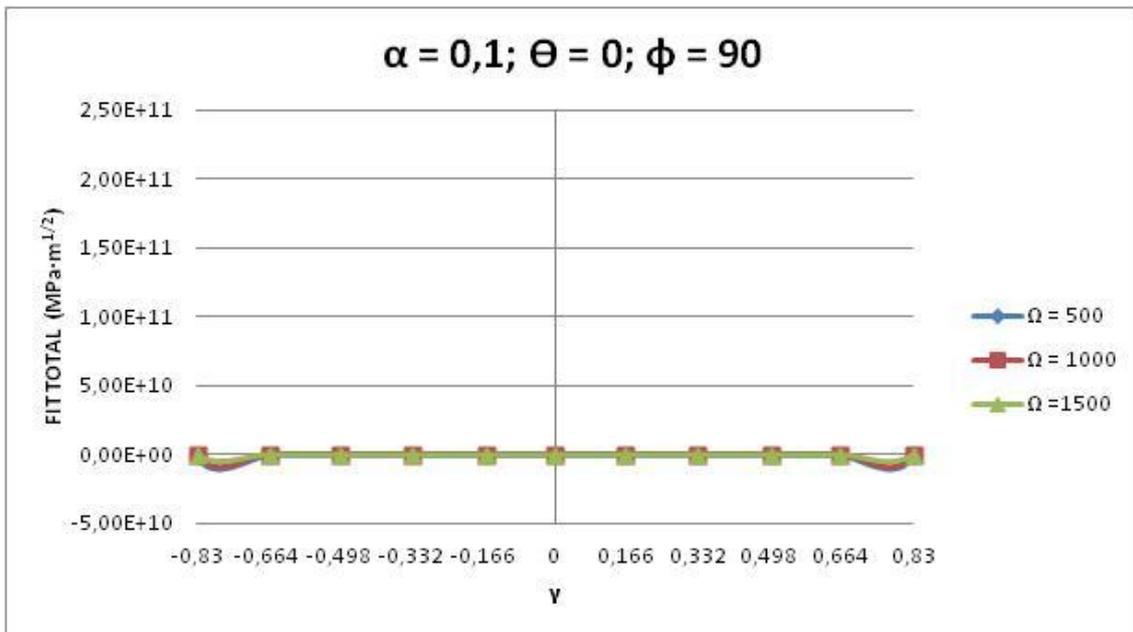


Figura 5.3: FIT para $\alpha=0.1; \theta=0; \phi=90$

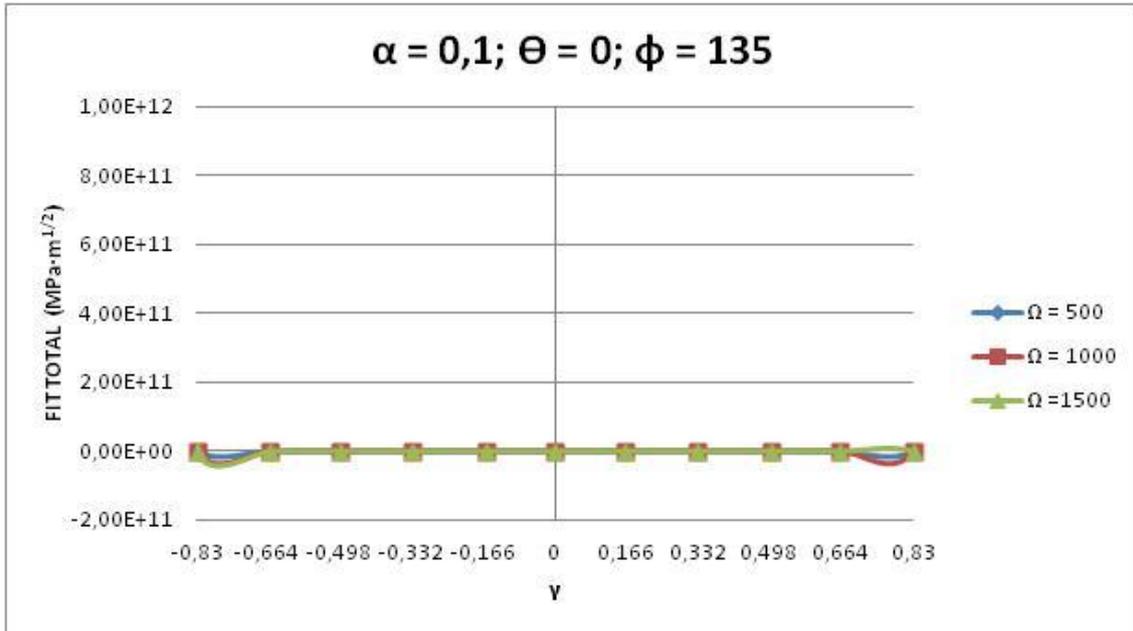


Figura 5.4: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=0; \phi=135$

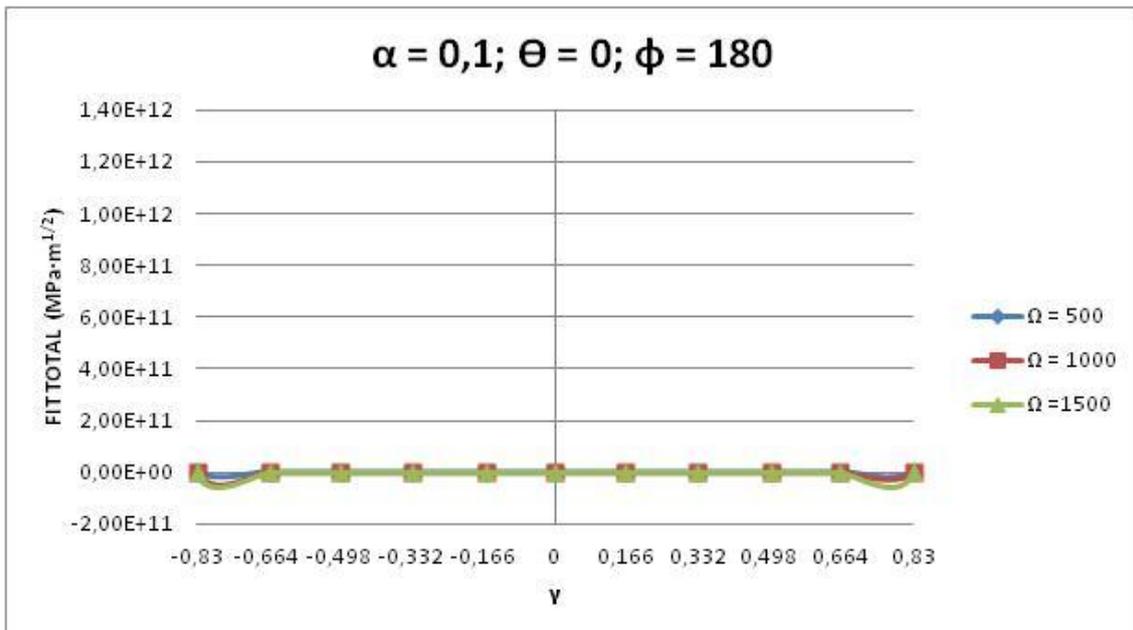


Figura 5.5: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=0; \phi=180$

Una vez hemos analizado el cambio de la posición de la excentricidad, se puede comprobar como para los ángulos ϕ menores de 90° se obtienen valores positivos para el FIT

lo que quiere decir que la fisura se abre, para los valores de $\phi=90^\circ$ y mayores, los valores del FIT son casi todos 0 lo cual indica que permanece cerrada.

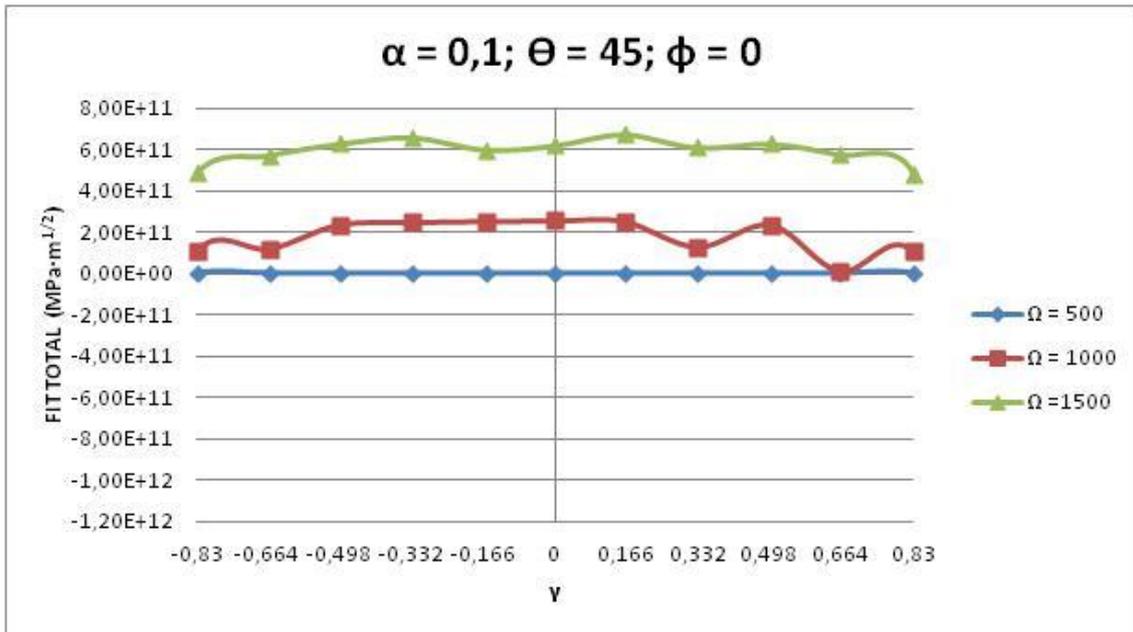


Figura 5.6: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=45; \phi=0$

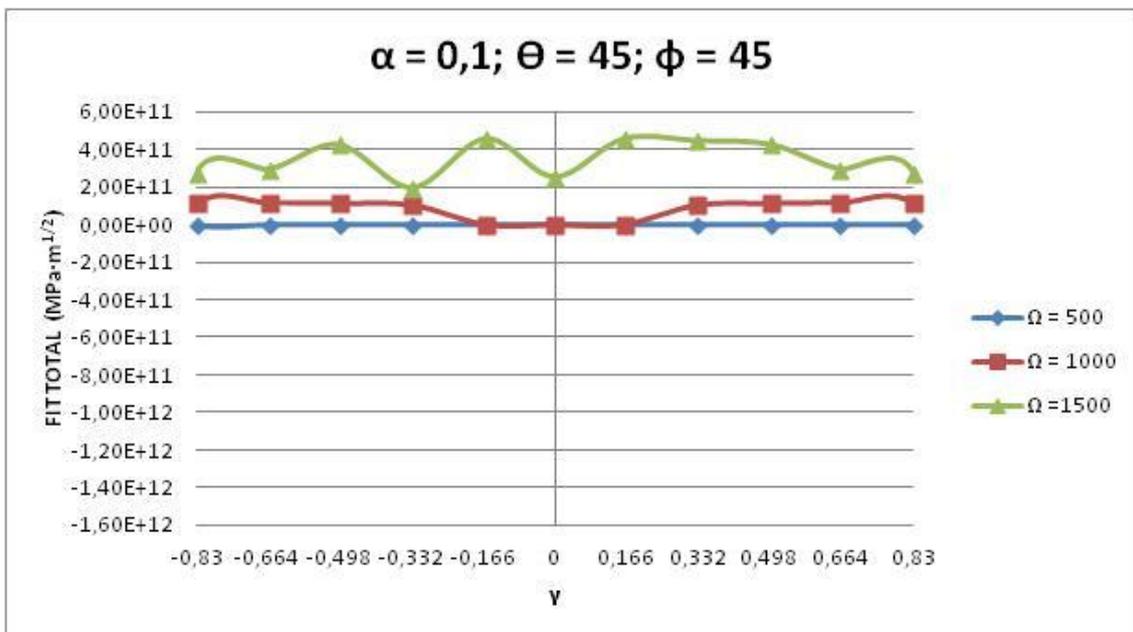


Figura 5.7: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=45; \phi=45$

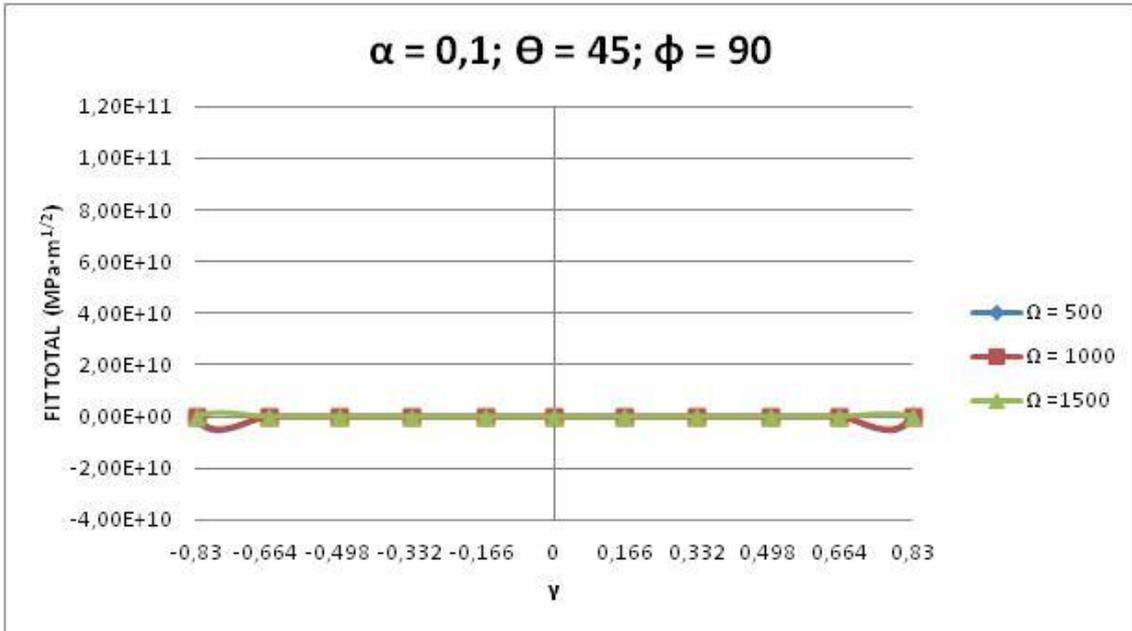


Figura 5.8: FIT para $\alpha=0.1; \theta=45; \phi=90$

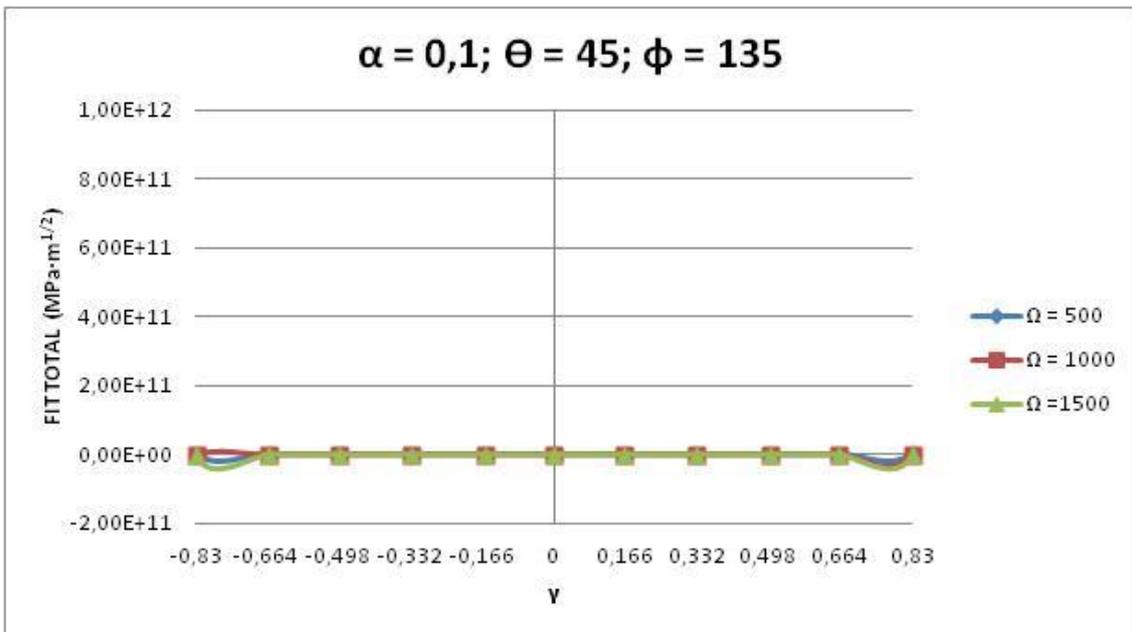


Figura 5.9: FIT para $\alpha=0.1; \theta=45; \phi=135$

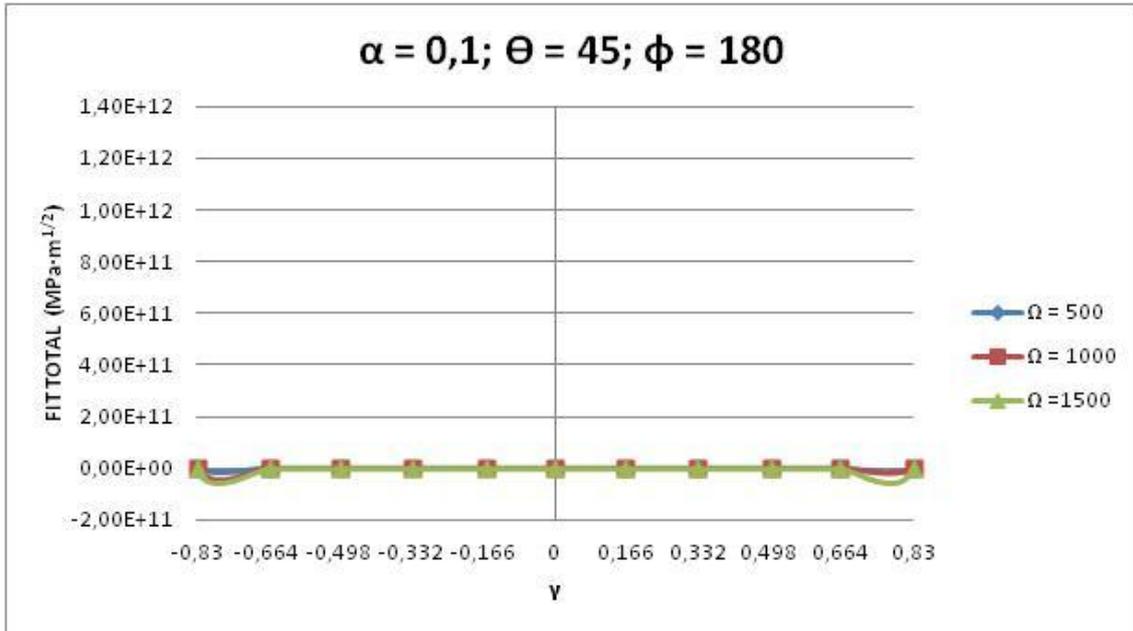


Figura 5.10: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=45; \phi=180$

Para el ángulo de rotación del eje de $\Theta=45^\circ$ como se puede ver en las gráficas anteriores, se cumple exactamente lo mismo que para $\Theta=0^\circ$, esto es porque la posición de la excentricidad es relativa a la posición de la fisura y no a los apoyos. Pasamos a comprobar ahora si esto se cumple para las sucesivas posiciones de la fisura.

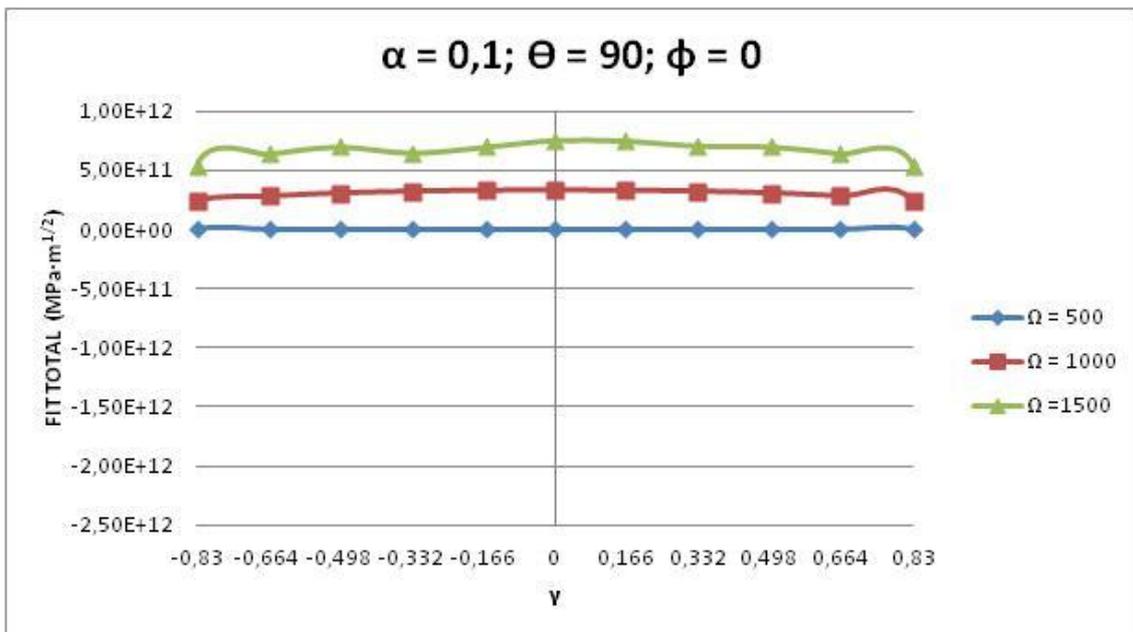


Figura 5.11: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=90; \phi=0$

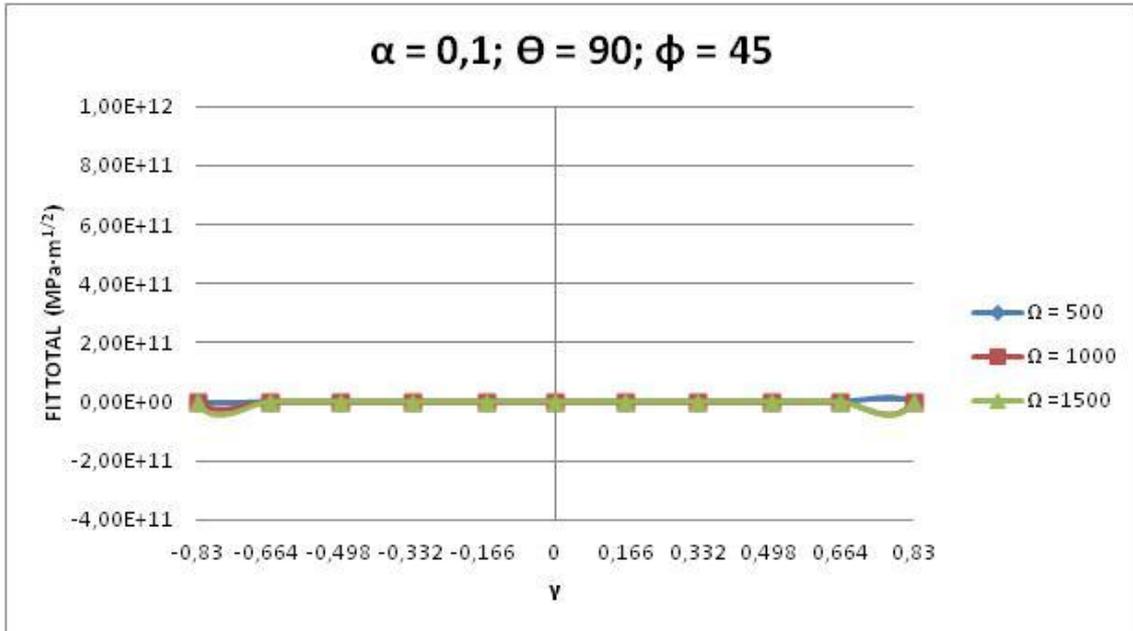


Figura 5.12: FIT para $\alpha=0.1; \theta=90; \phi=0$

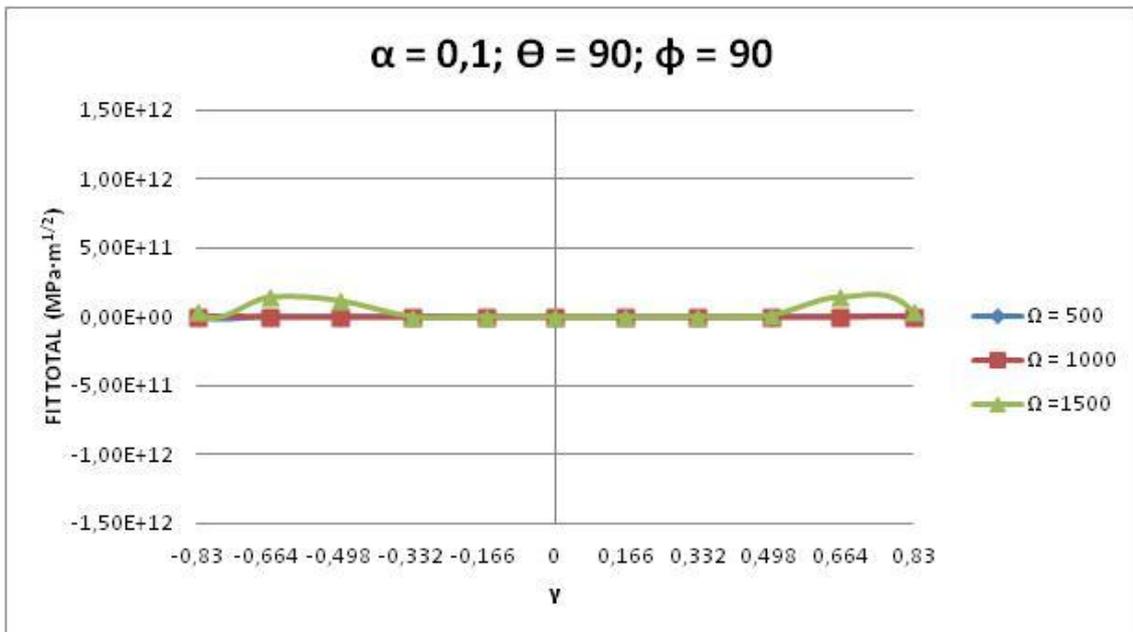


Figura 5.13: FIT para $\alpha=0.1; \theta=90; \phi=90$

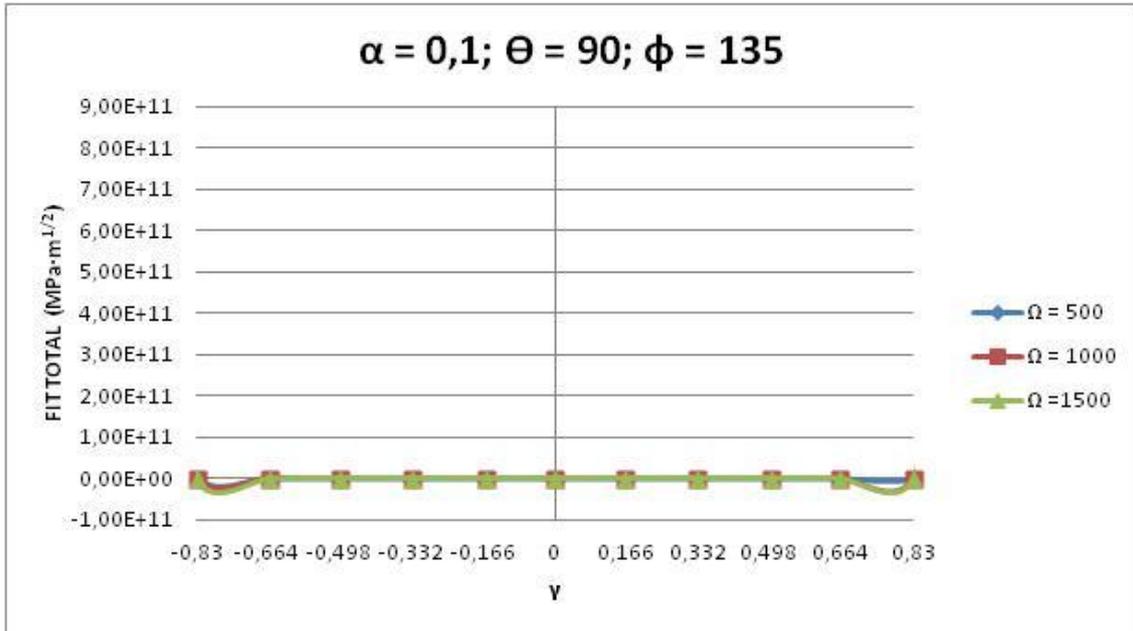


Figura 5.14: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=90; \phi=135$

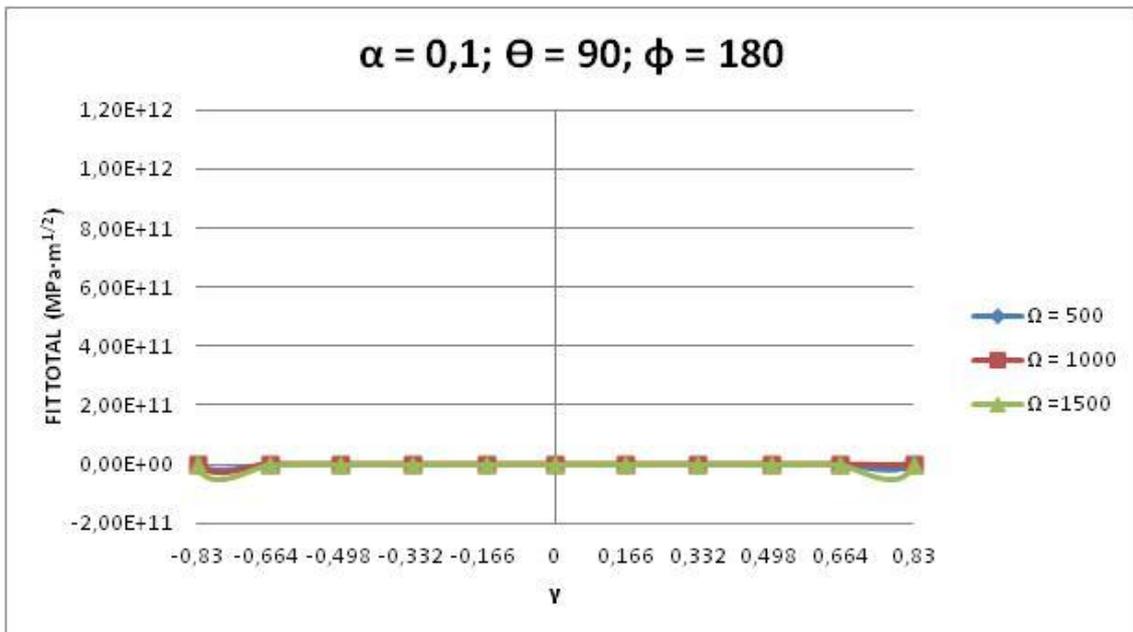


Figura 5.15: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=90; \phi=180$

Nuevamente, podemos comprobar como para los ángulos de excentricidad ϕ menores de 90° , la fisura se abre, mientras que para ángulos de 90° o mayores permanece cerrada.

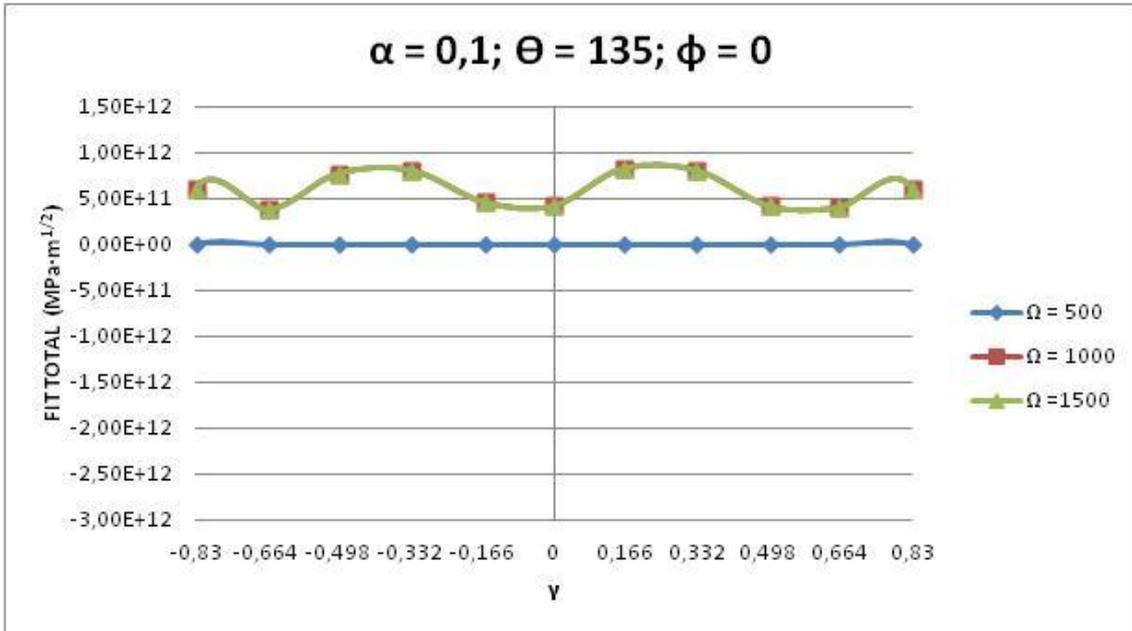


Figura 5.16: FIT para $\alpha=0.1; \theta=135; \phi=0$

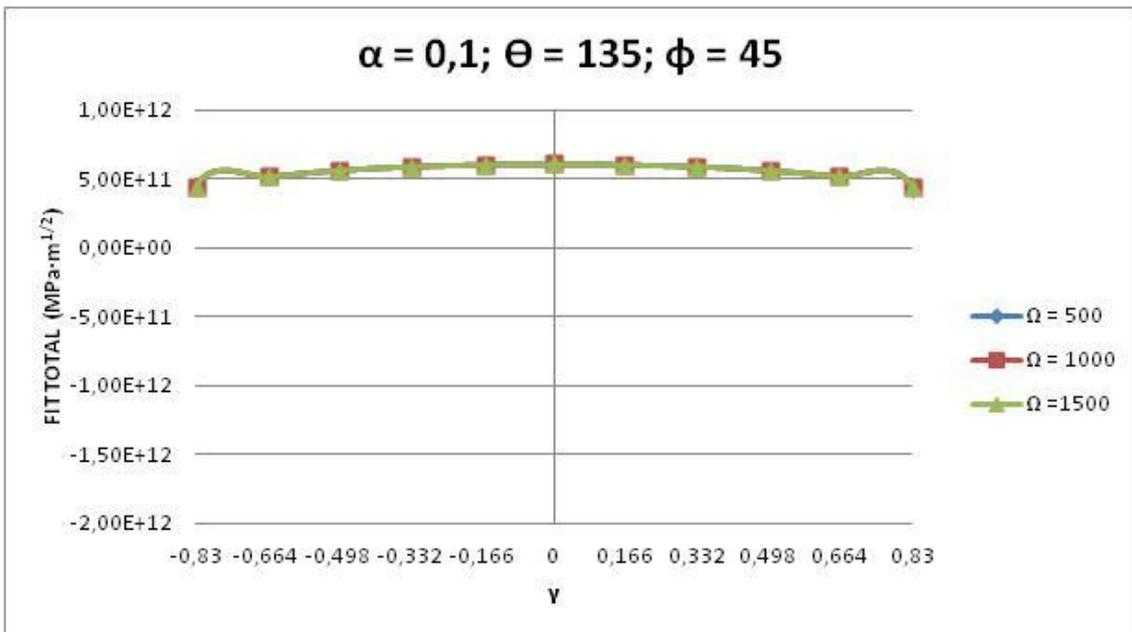


Figura 5.17: FIT para $\alpha=0.1; \theta=135; \phi=45$

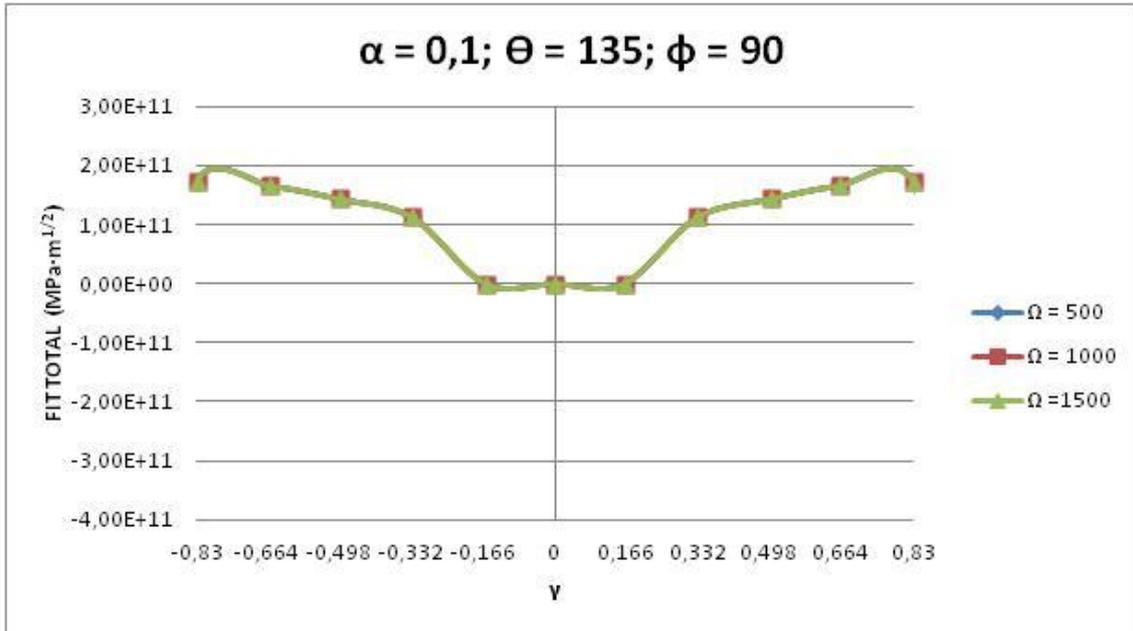


Figura 5.18: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=135; \phi=90$

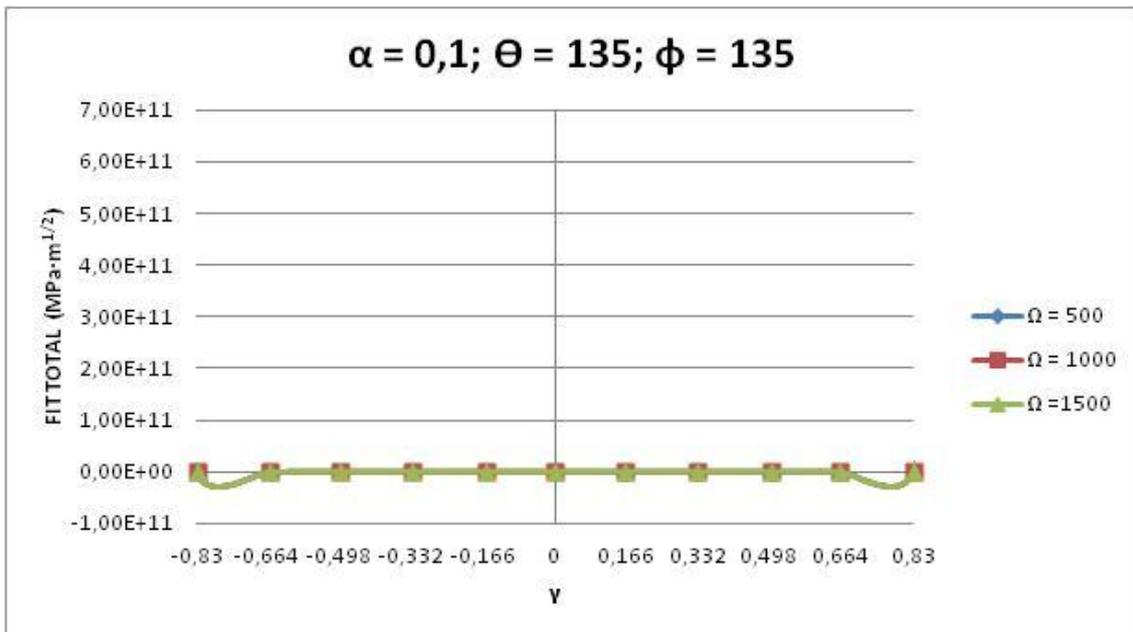


Figura 5.19: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=135; \phi=135$

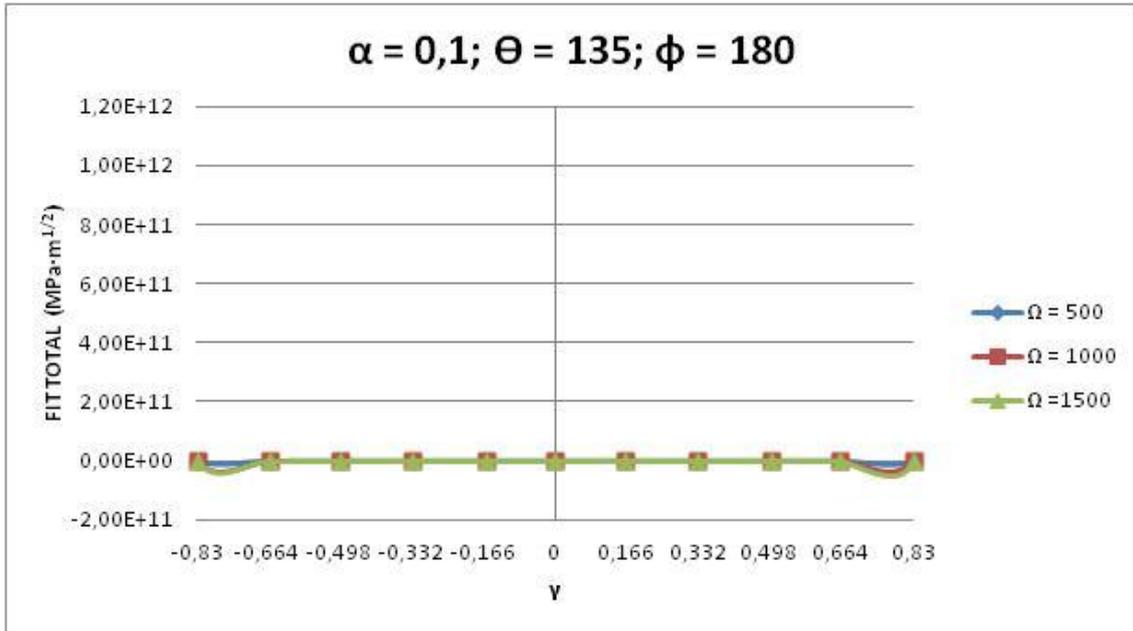


Figura 5.20: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=135; \phi=180$

Para el ángulo de la fisura $\Theta=135^\circ$, comprobamos que se sigue cumpliendo con alguna pequeña excepción el mismo resultado que con las anteriores posiciones de fisura.

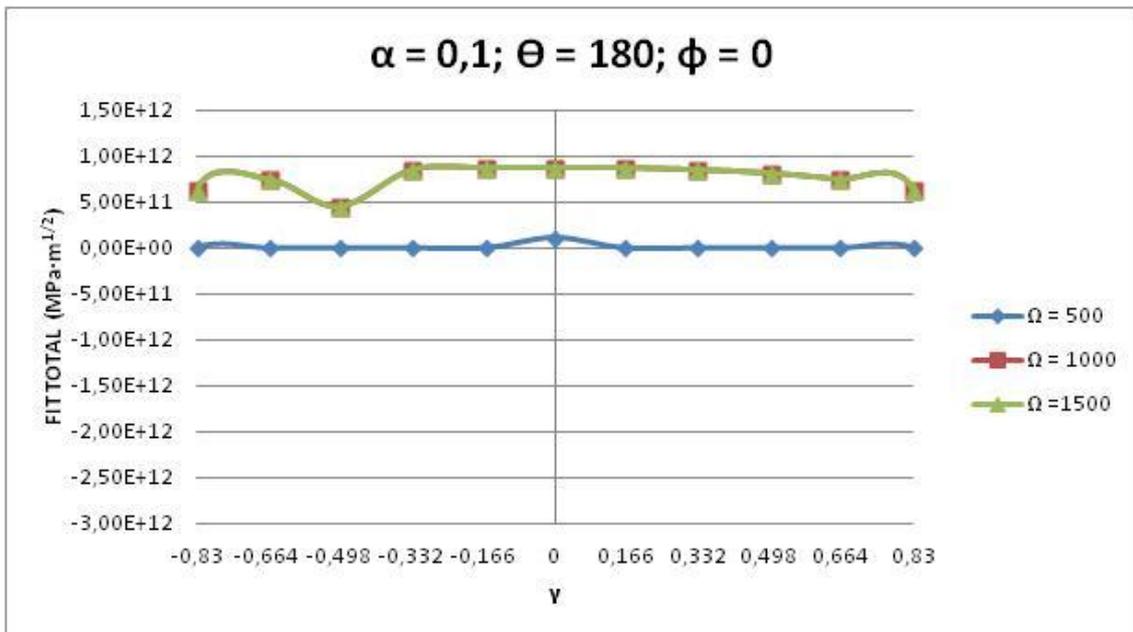


Figura 5.21: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=180; \phi=0$

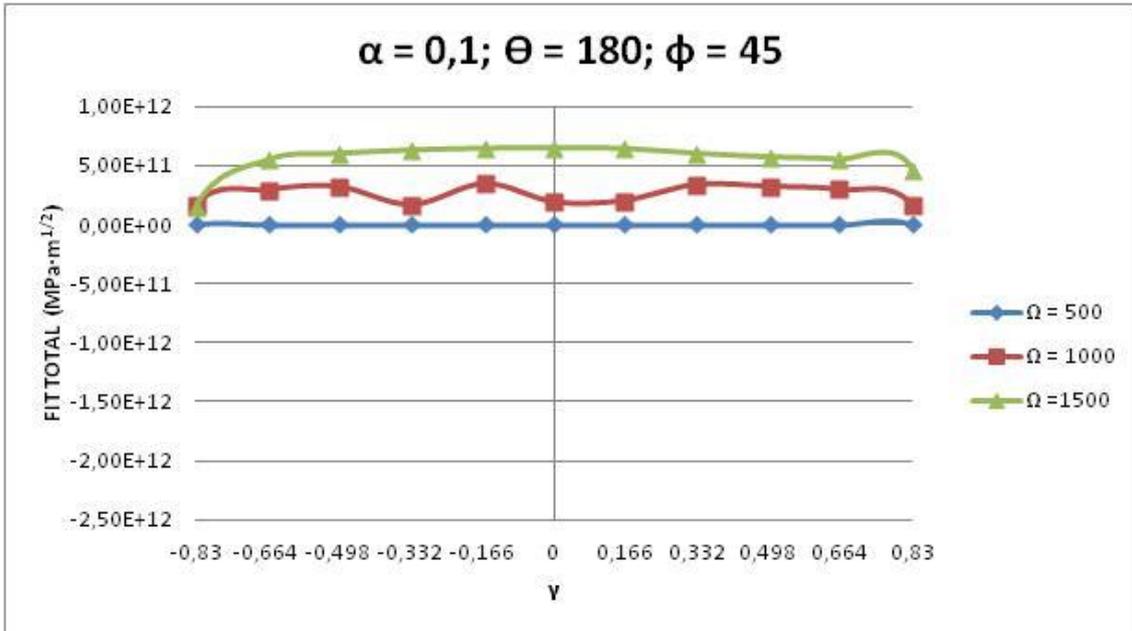


Figura 5.22: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=180; \phi=45$

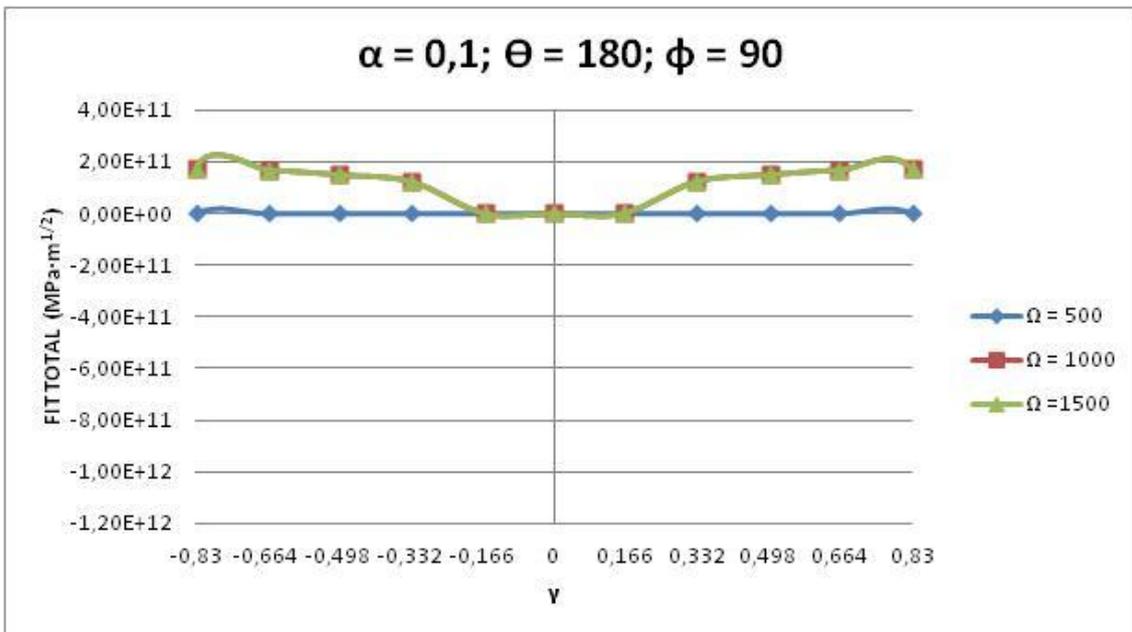


Figura 5.23: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=180; \phi=90$

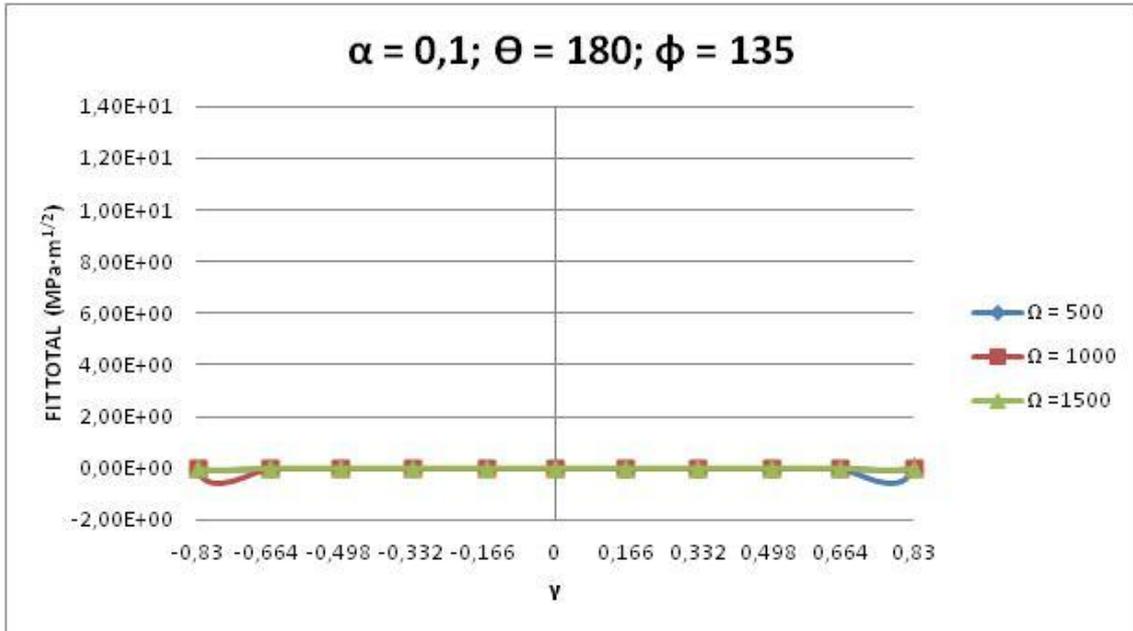


Figura 5.24: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=180; \phi=135$

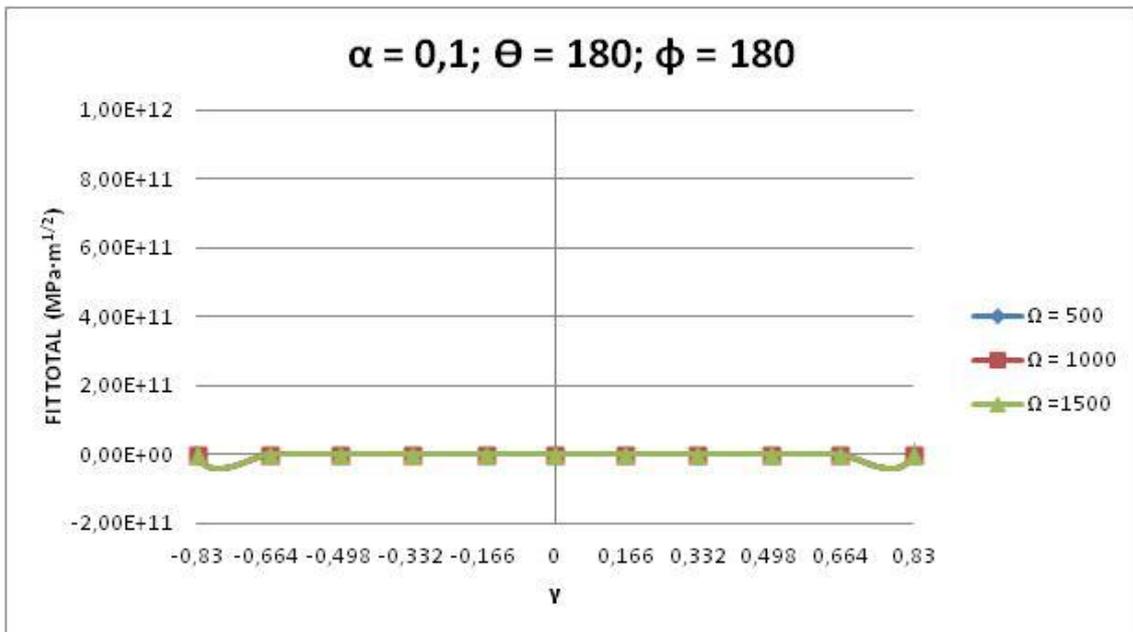


Figura 5.25: FIT para $\alpha=0.1; \Theta=180; \phi=180$

Por último, para los ángulos rotación del eje $\Theta=180^\circ$, también se cumple que para los ángulos de la excentricidad menores de 90° , la fisura se abre, mientras que para mayores o iguales de 90° permanece cerrada.

5.1.2 Efecto del ángulo de rotación

Ahora vamos a analizar cómo influye el ángulo de rotación del eje en el FIT mediante una serie de gráficas comparativas escogidas entre las expuestas ahora. Tanto para valores en los que la fisura se encuentra abierta como cerrada se analizará el efecto del ángulo θ de ésta.

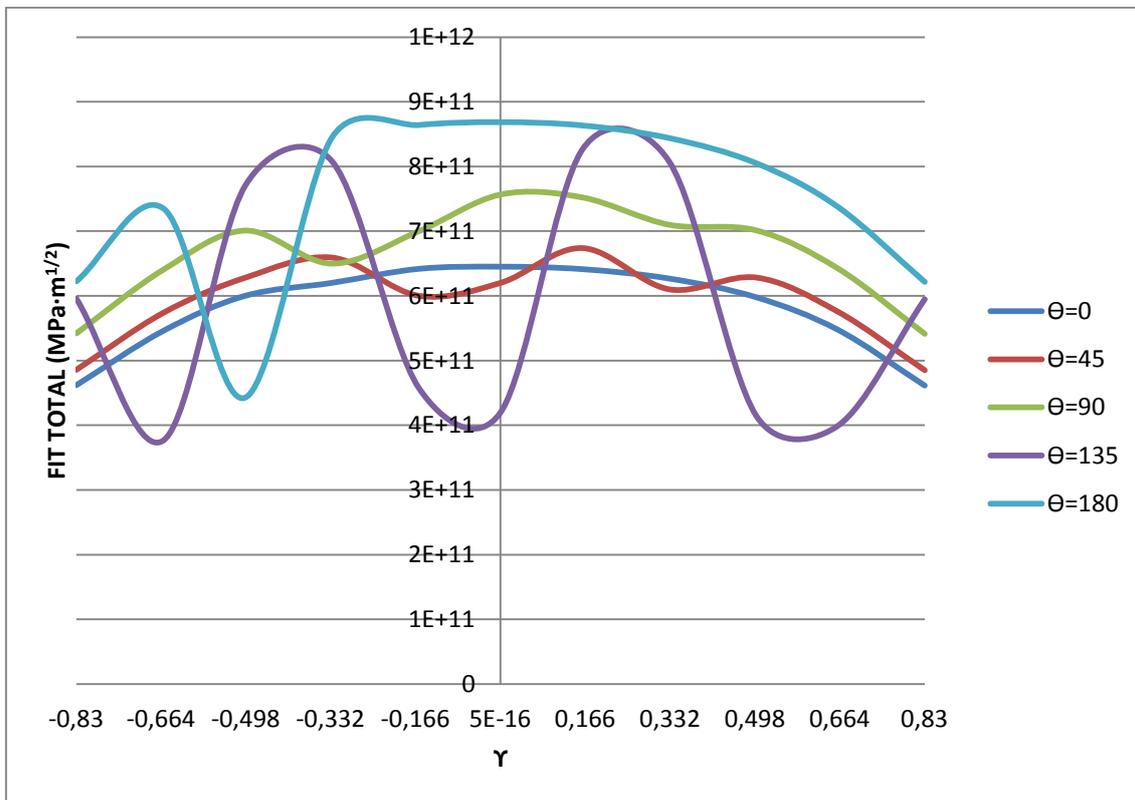


Figura 5.26: Valores del FIT para $\varphi=0^\circ$

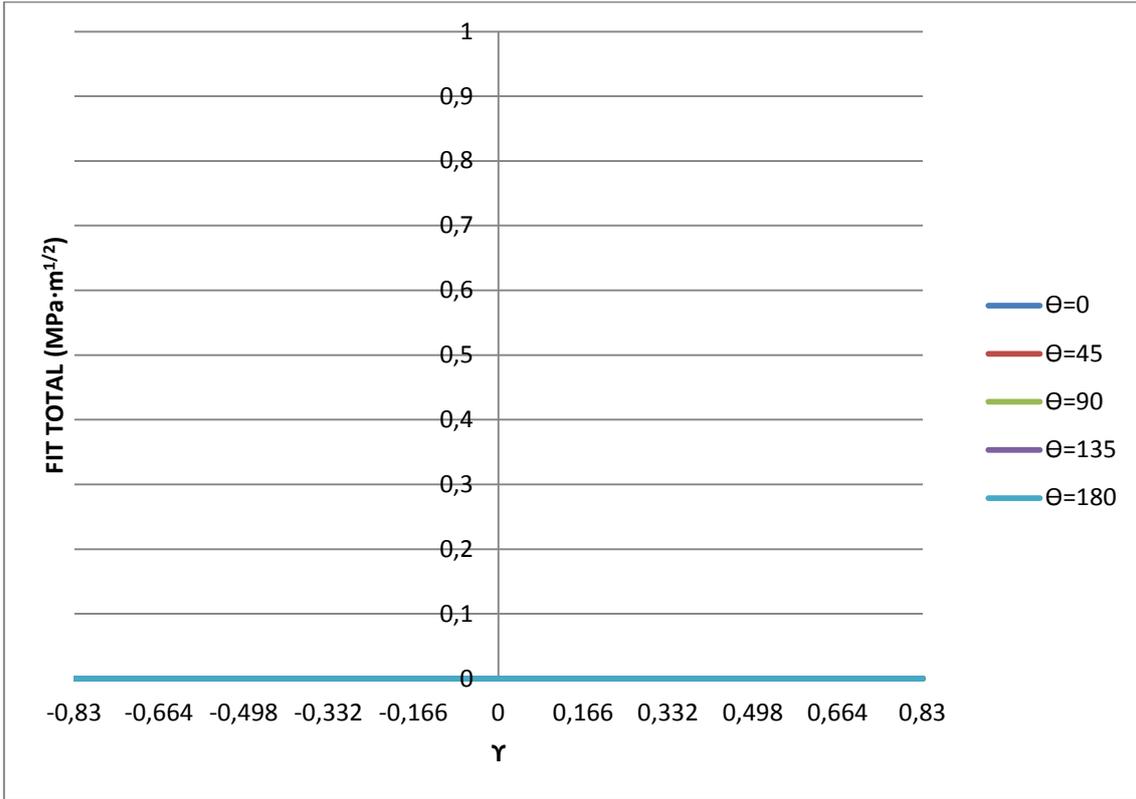


Figura 5.27: Valores del FIT para $\varphi=90^\circ$

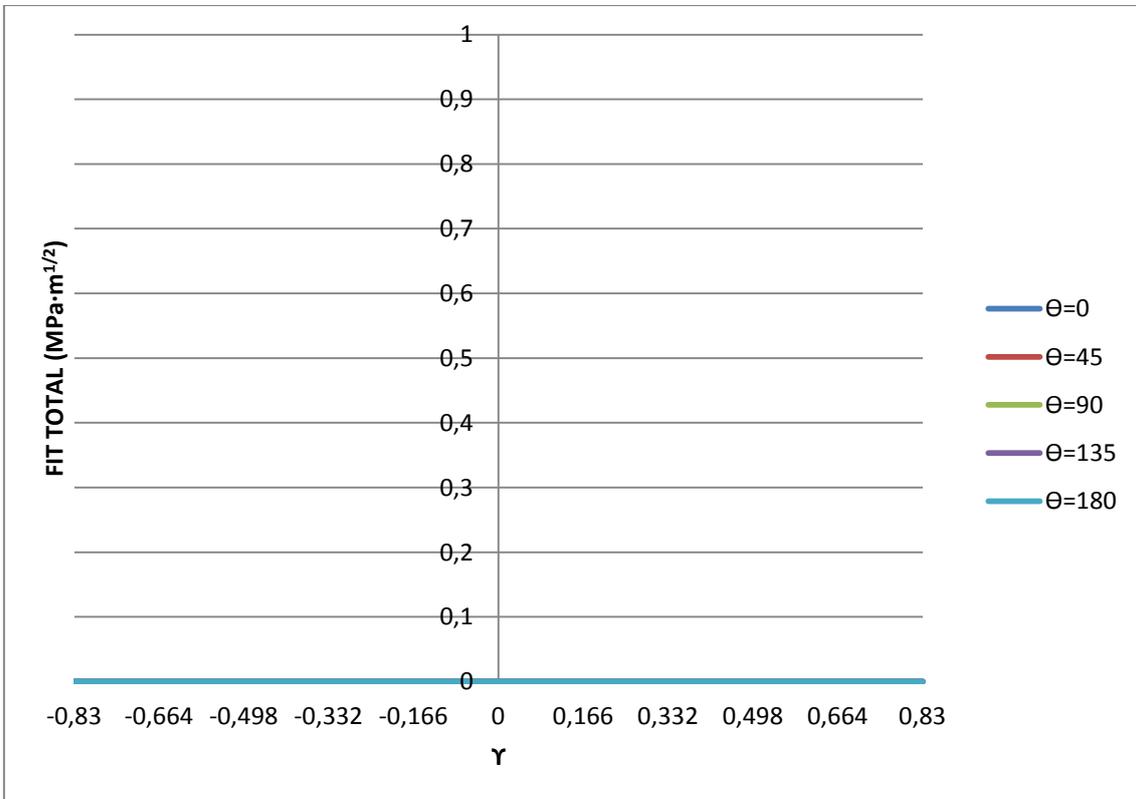


Figura 5.28: Valores del FIT para $\varphi=180^\circ$

Como se puede comprobar en la *Figura 5.26*, a medida que va girando la fisura, el FIT es cada vez mayor. Es decir, la fisura se va abriendo cada vez mas. Para el valor de $\phi=90^\circ$, se puede ver como los valores del FIT permanecen igual a cero. Y por último, para $\phi=180^\circ$ como los valores del FIT siguen siendo cero ya que la fisura permanece cerrada.

Se puede extraer como conclusión que a medida que va girando el eje, el FIT aumenta es decir, la fisura se abre mas a medida que va girando exceptuando los casos para ángulos de excentricidad ϕ iguales o mayores de 90° que permanecen cerrados.

A continuación y una vez realizado el análisis de cómo afecta el ángulo de rotación del eje, se muestran las gráficas para los modelos realizados con el tamaño de fisura $\alpha = 0.25$ y $\alpha = 0.5$. Posteriormente se procederá a analizar cómo afecta el tamaño de la fisura en el FIT.

5.1.3 FIT para $\alpha = 0,25$

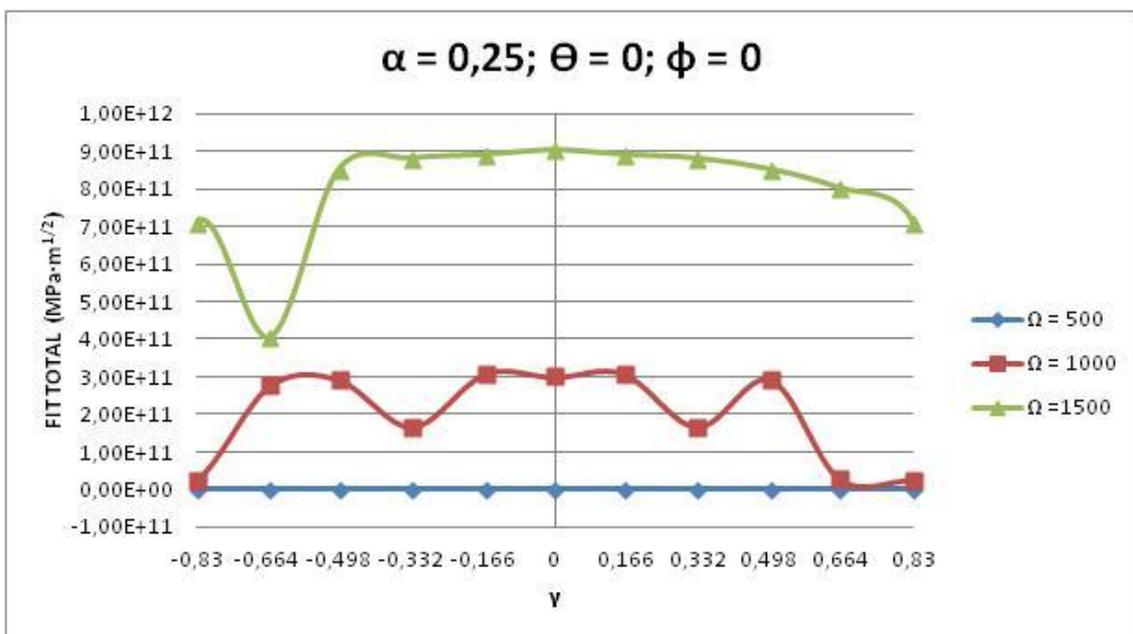


Figura 5.29: FIT para $\alpha=0.25$; $\theta=0$; $\phi=0$

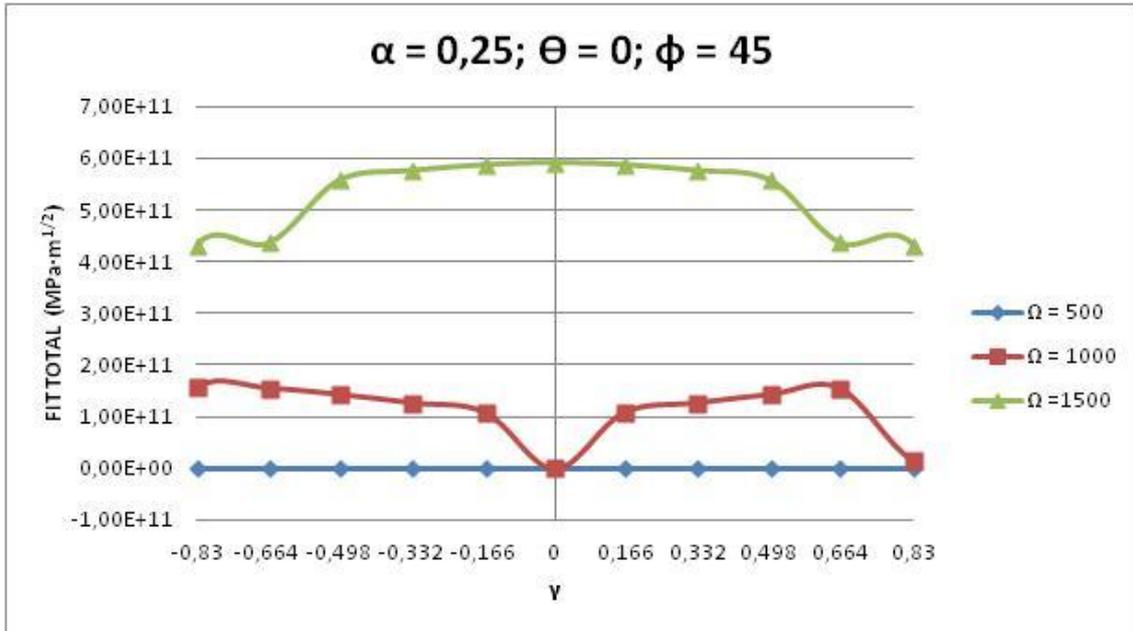


Figura 5.30: FIT para $\alpha=0.25; \theta=0; \phi=45$

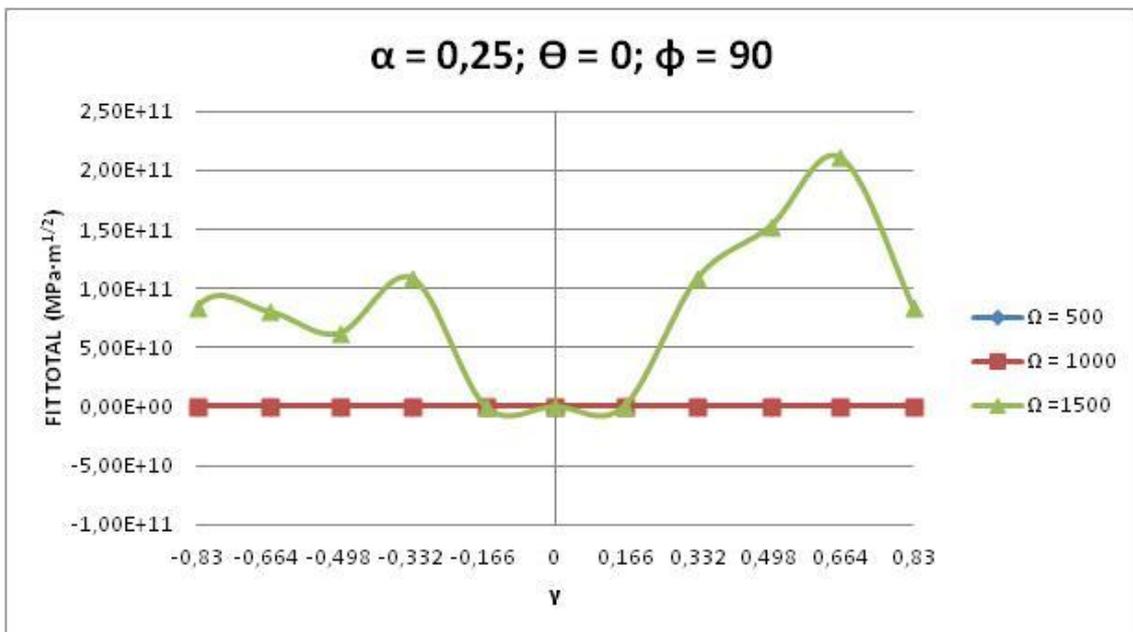


Figura 5.31: FIT para $\alpha=0.25; \theta=0; \phi=90$

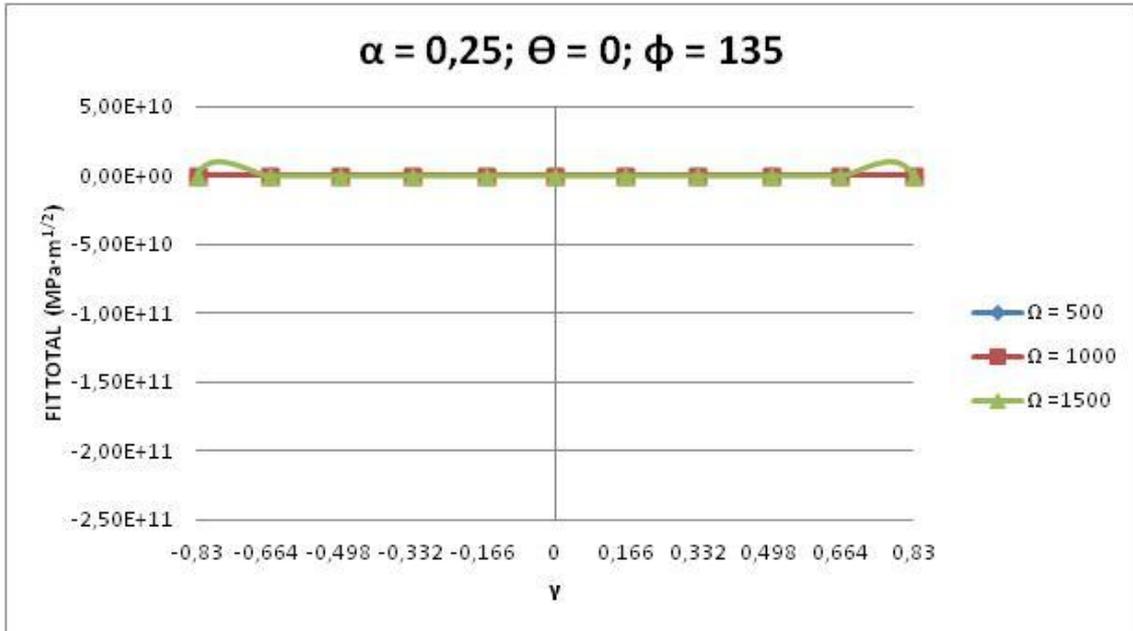


Figura 5.32: FIT para $\alpha=0.25; \theta=0; \phi=135$

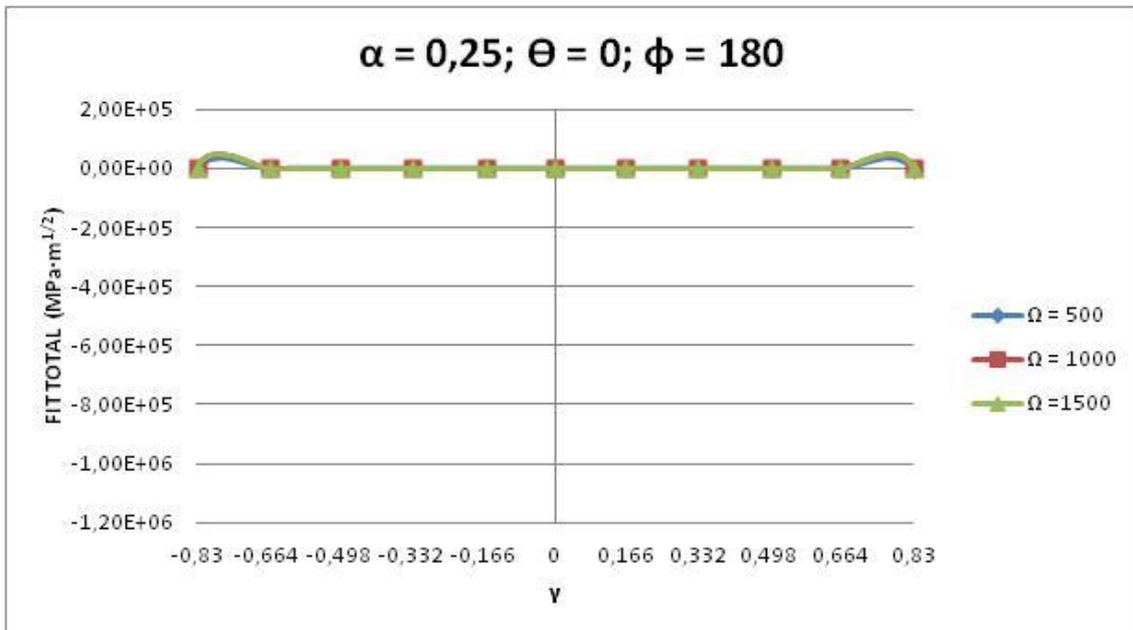


Figura 5.33: FIT para $\alpha=0.25; \theta=0; \phi=180$

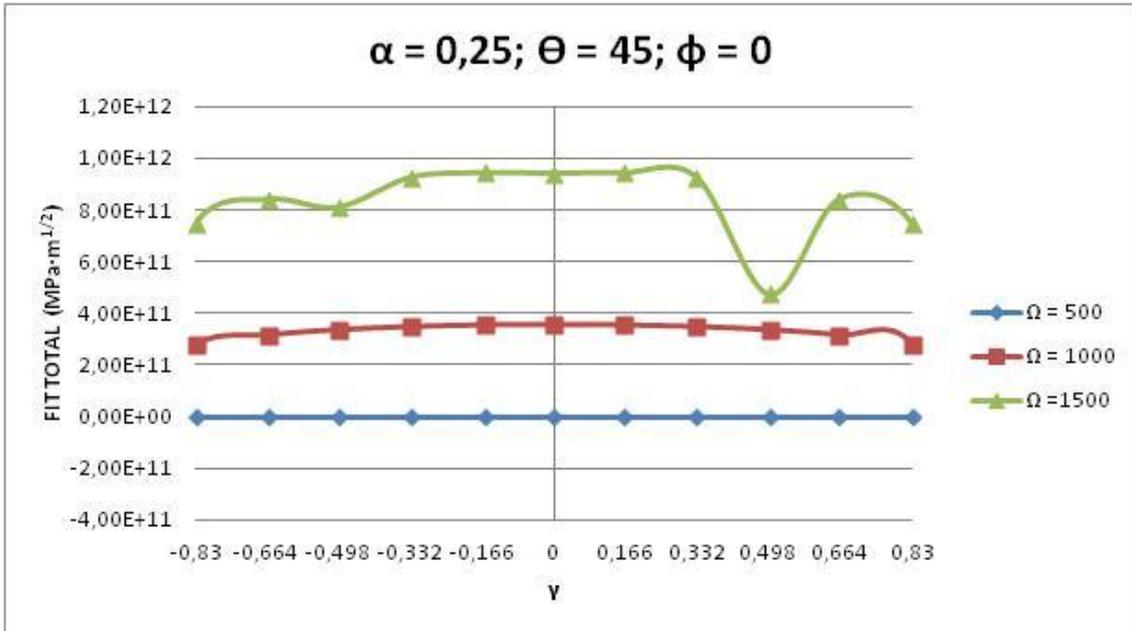


Figura 5.34: FIT para $\alpha=0.25; \theta=45; \phi=0$

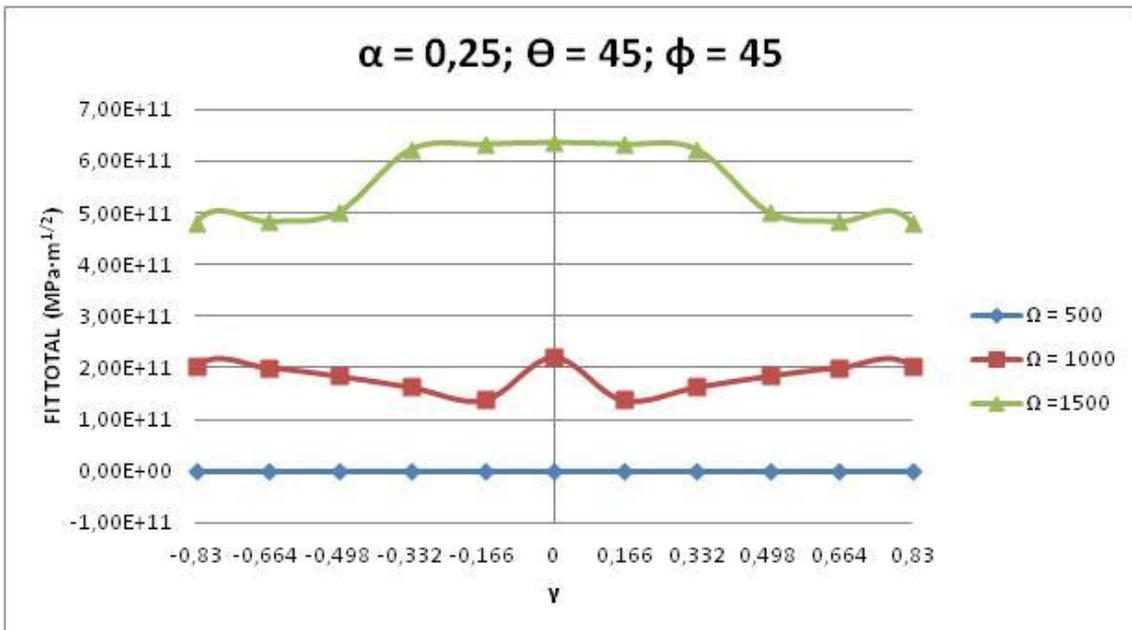


Figura 5.35: FIT para $\alpha=0.25; \theta=45; \phi=45$

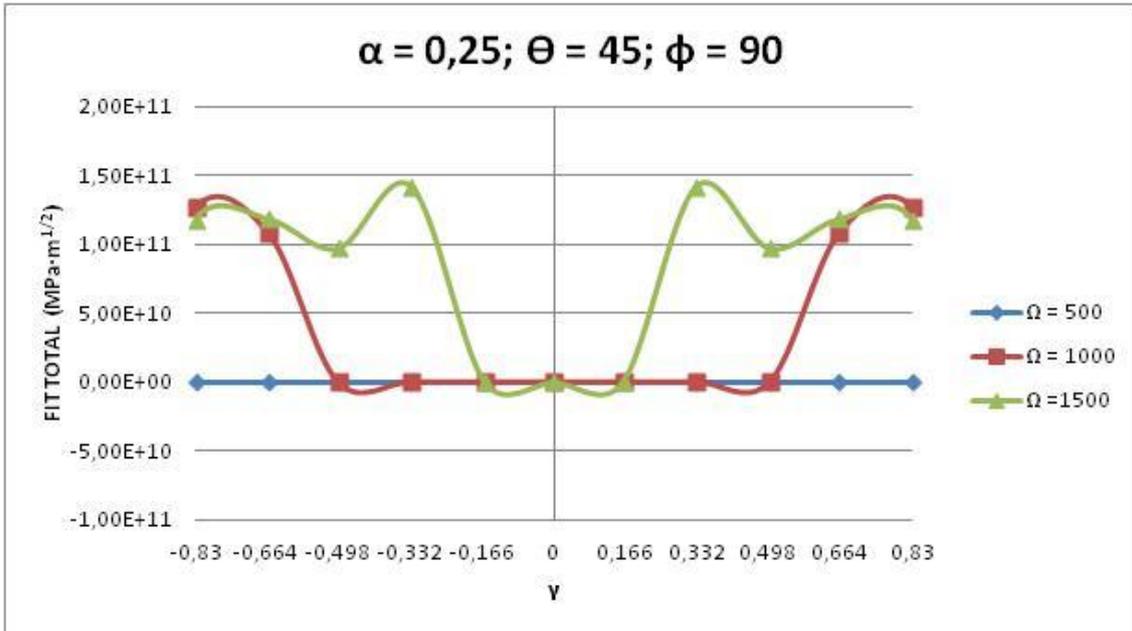


Figura 5.36: FIT para $\alpha=0.25; \theta=45; \phi=90$

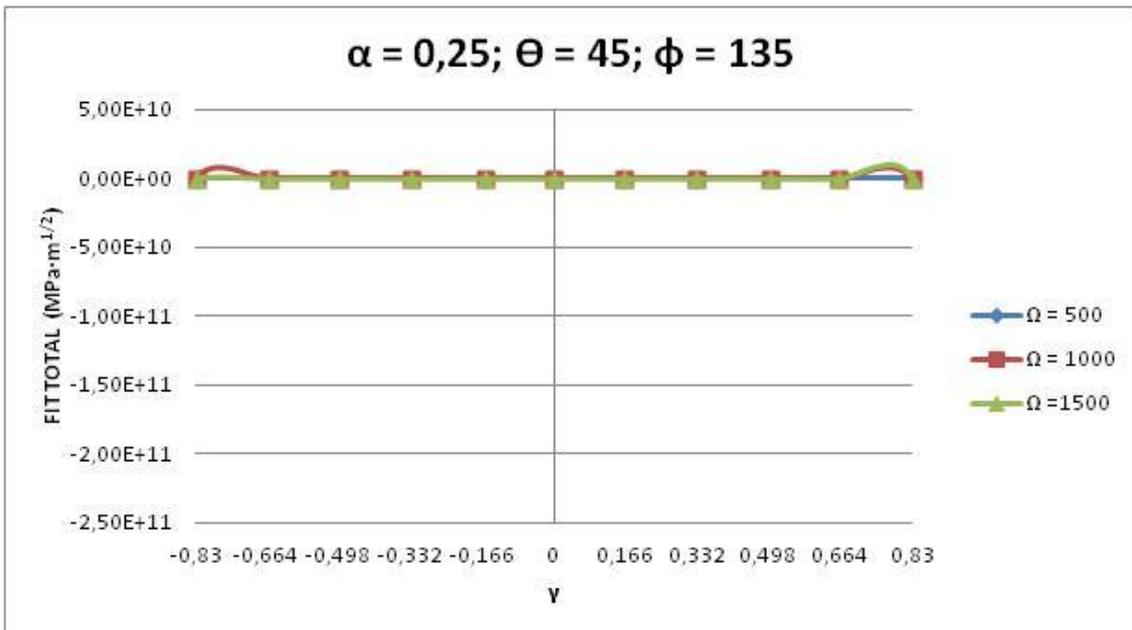


Figura 5.37: FIT para $\alpha=0.25; \theta=45; \phi=135$

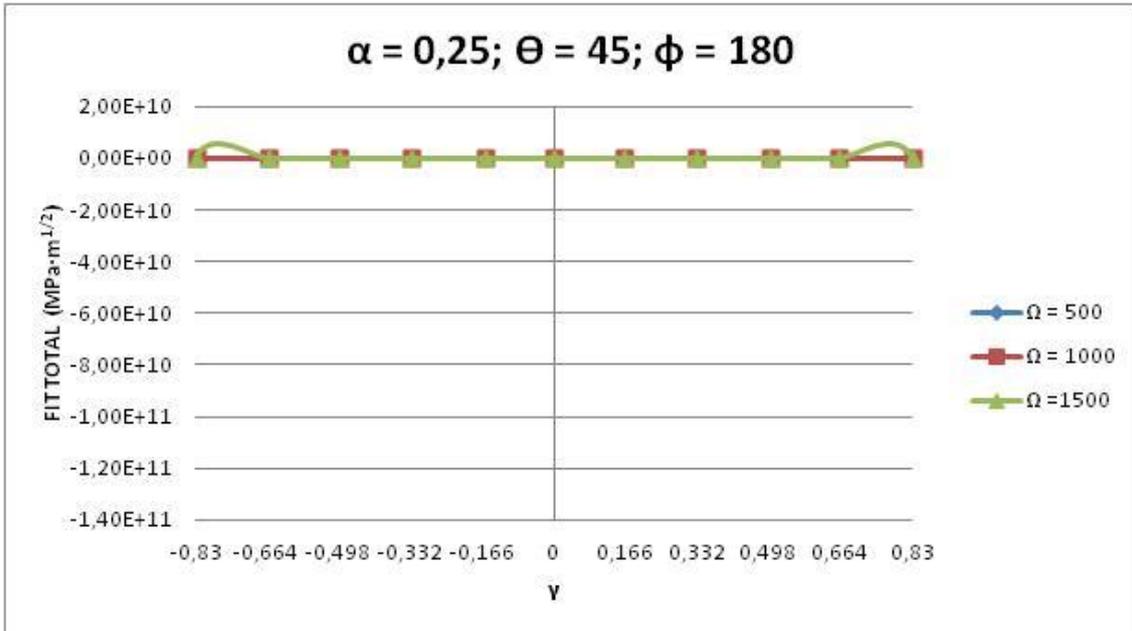


Figura 5.38: FIT para $\alpha=0.25; \theta=45; \phi=180$

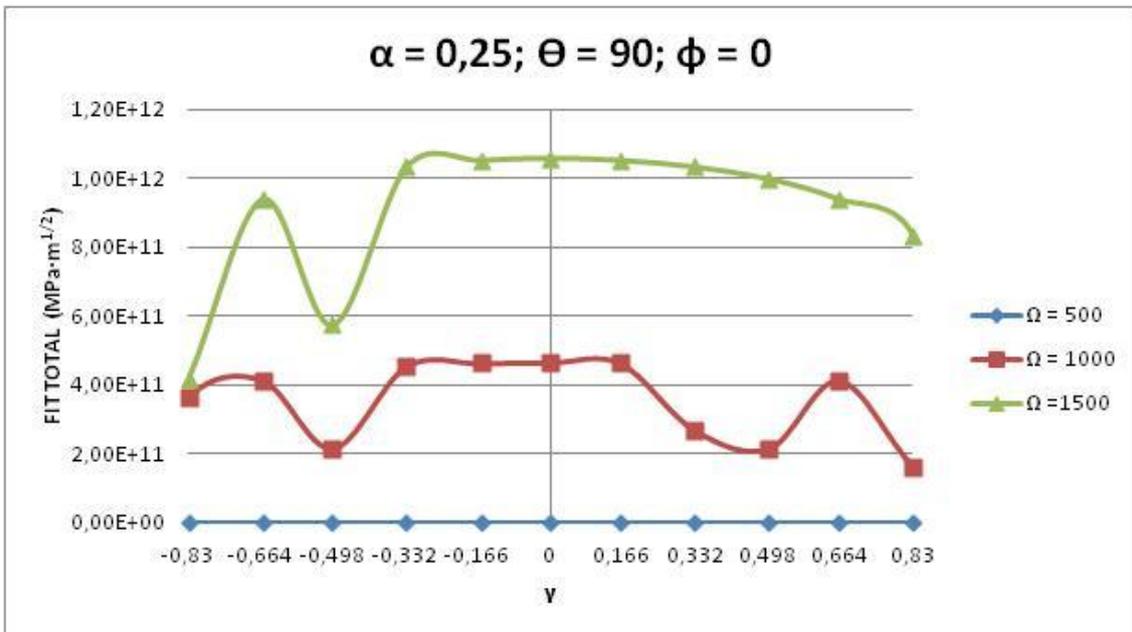


Figura 5.39: FIT para $\alpha=0.25; \theta=90; \phi=0$

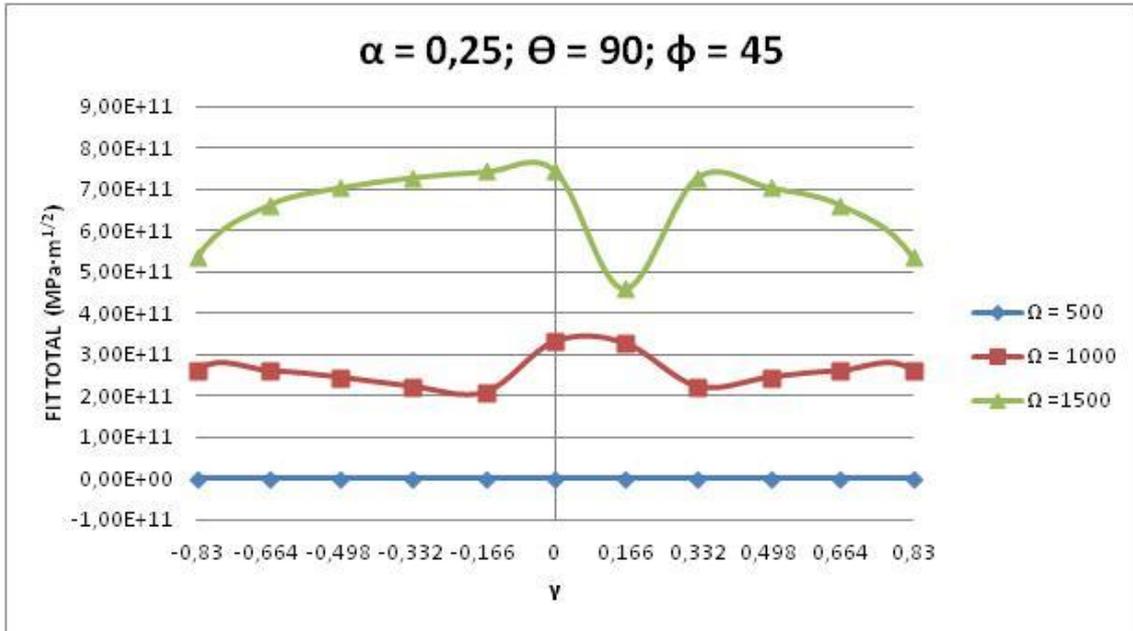


Figura 5.40: FIT para $\alpha=0.25; \Theta=90; \phi=45$

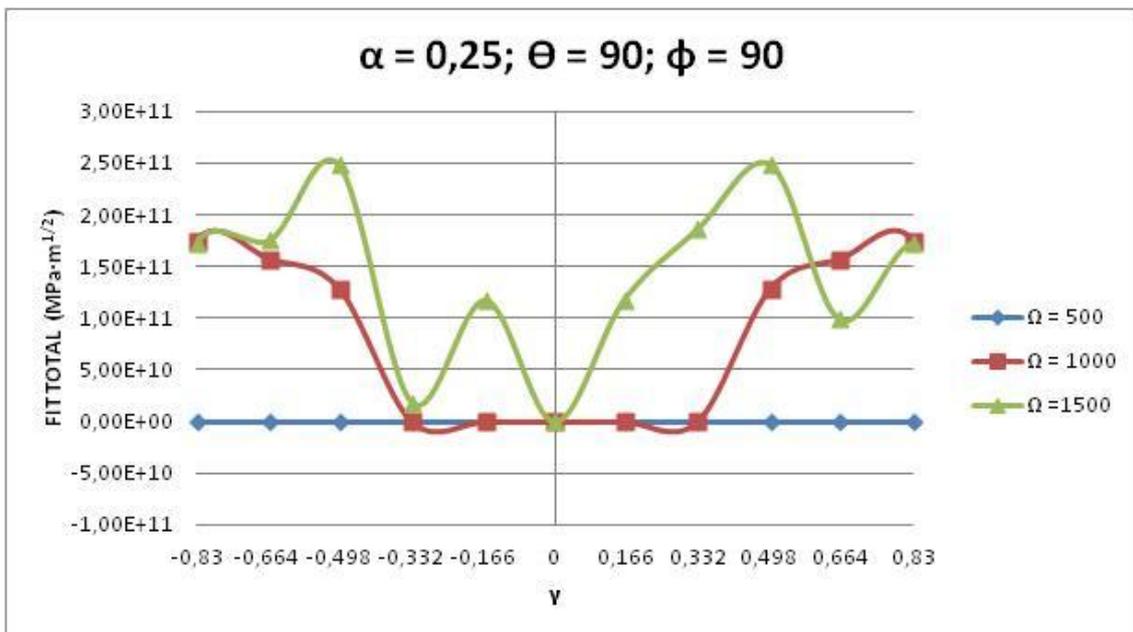


Figura 5.41: FIT para $\alpha=0.25; \Theta=90; \phi=90$

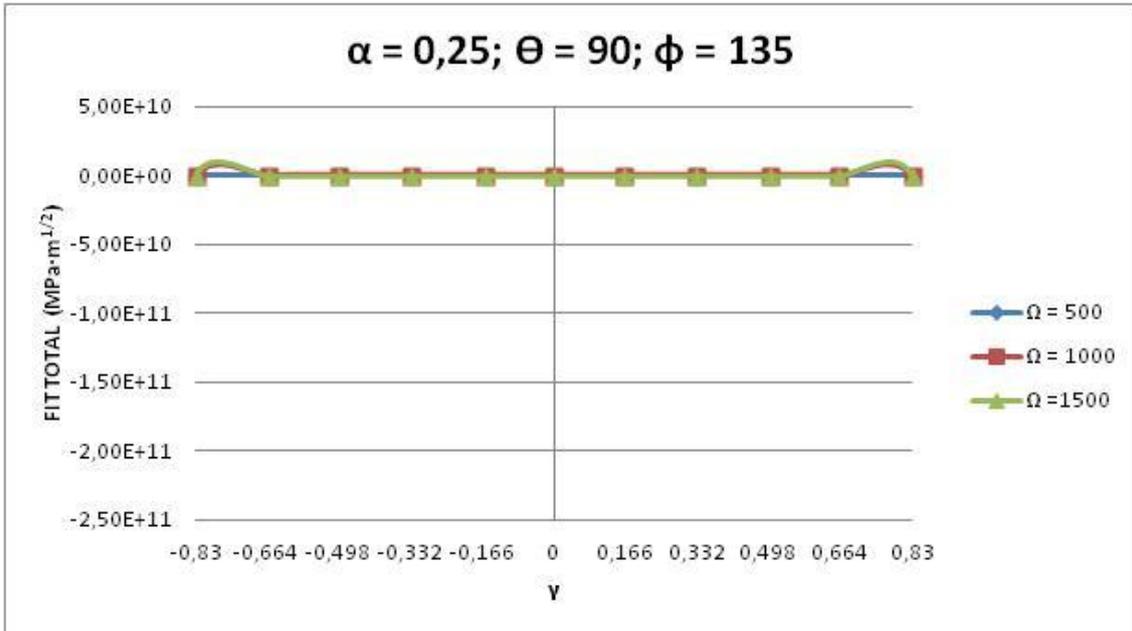


Figura 5.42: FIT para $\alpha=0.25; \theta=90; \phi=135$

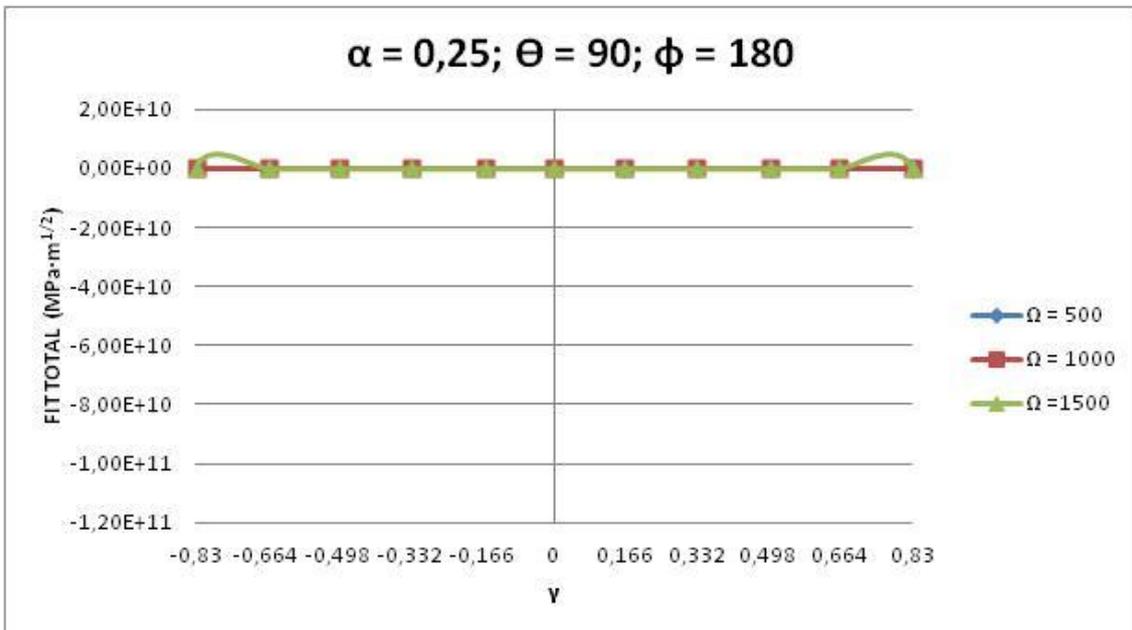


Figura 5.43: FIT para $\alpha=0.25; \theta=90; \phi=180$

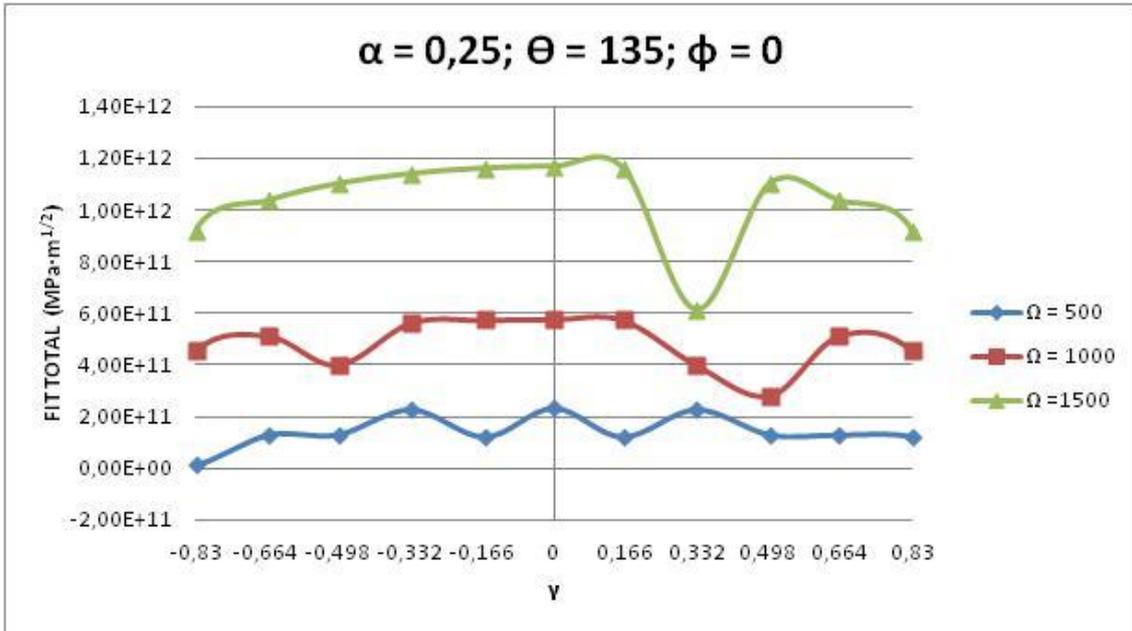


Figura 5.44: FIT para $\alpha=0.25; \theta=135; \phi=0$

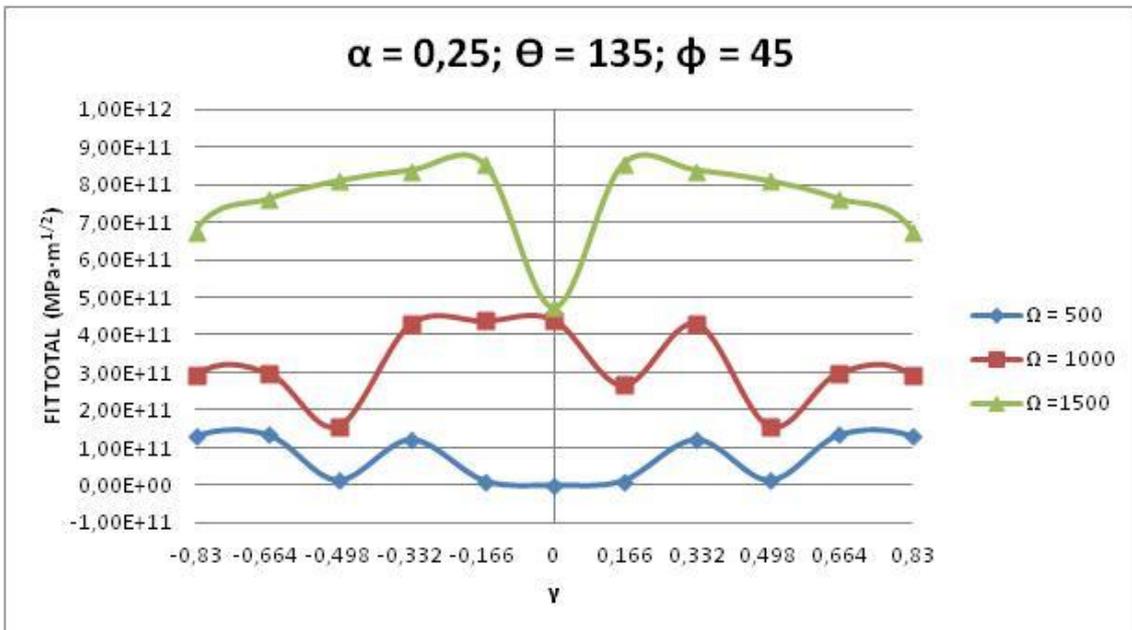


Figura 5.45: FIT para $\alpha=0.25; \theta=135; \phi=45$

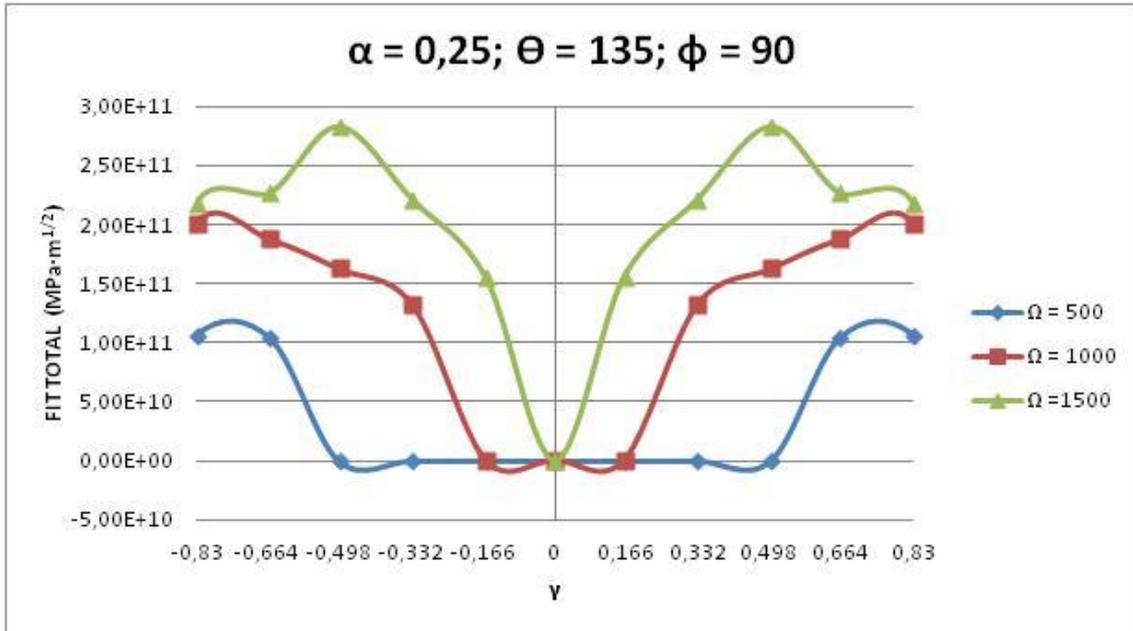


Figura 5.46: FIT para $\alpha=0.25; \theta=135; \phi=90$

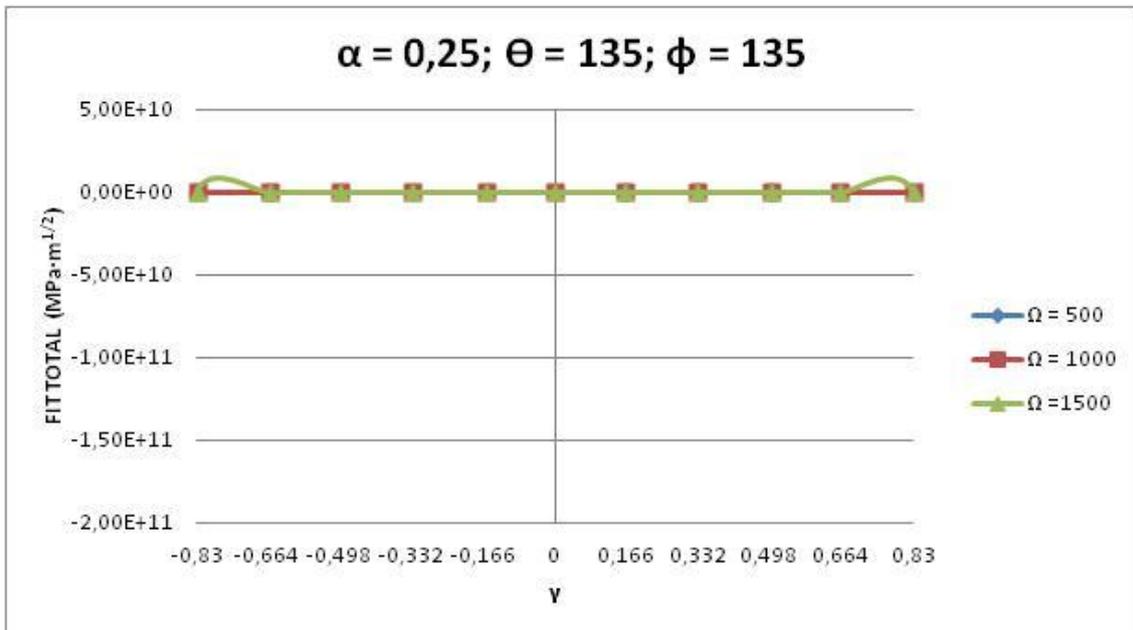


Figura 5.47: FIT para $\alpha=0.25; \theta=135; \phi=135$

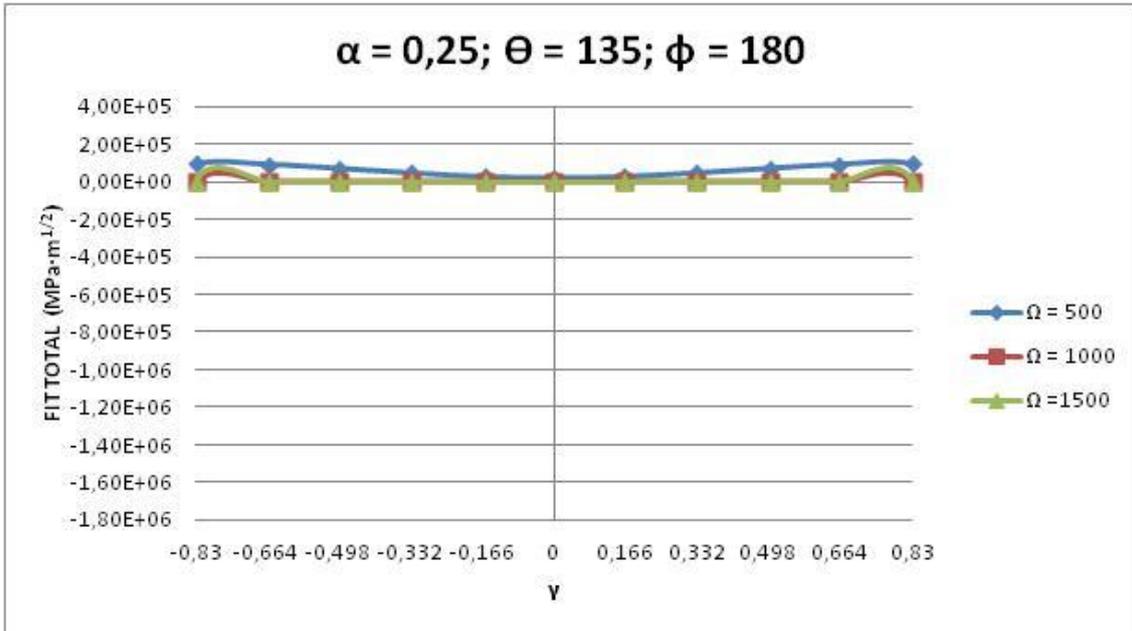


Figura 5.48: FIT para $\alpha=0.25; \Theta=135; \phi=180$

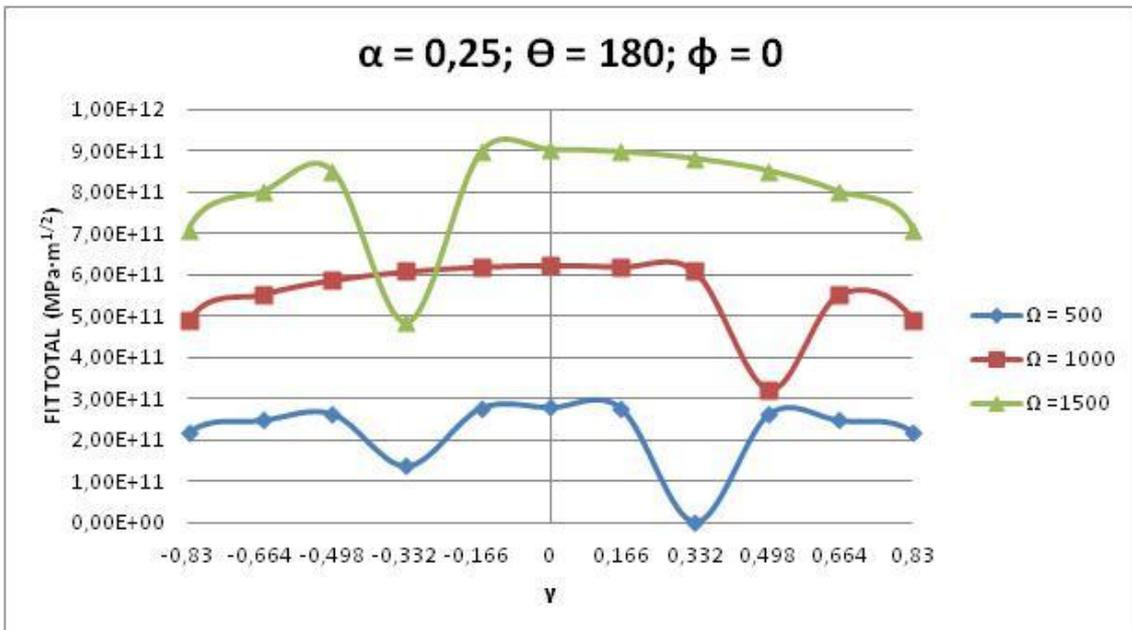


Figura 5.49: FIT para $\alpha=0.25; \Theta=180; \phi=0$

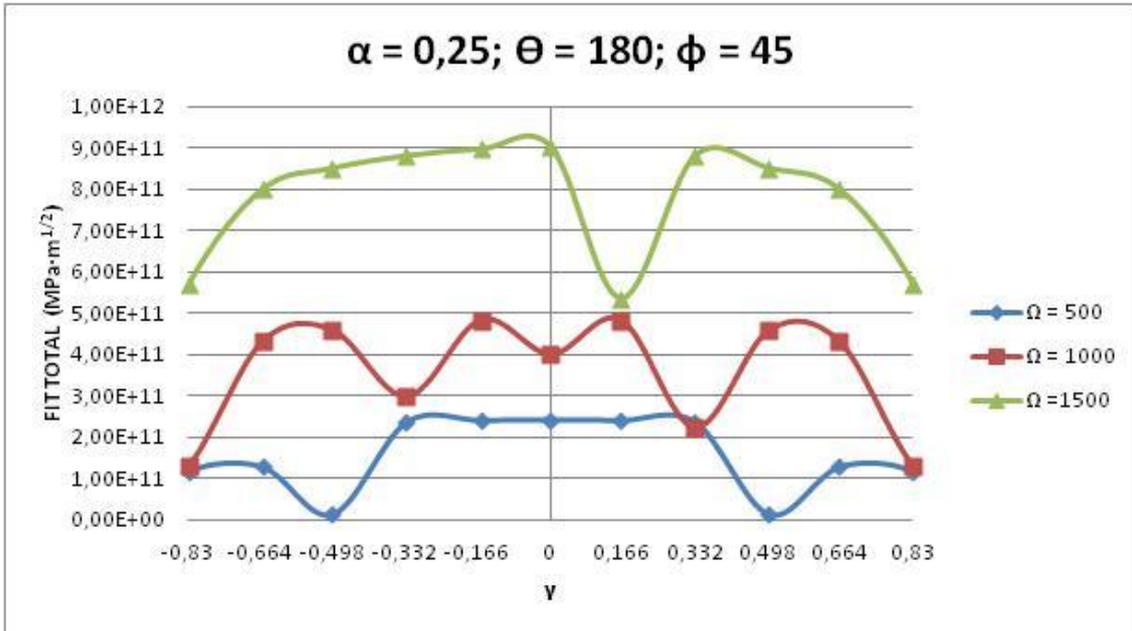


Figura 5.50: FIT para $\alpha=0.25; \theta=180; \phi=45$

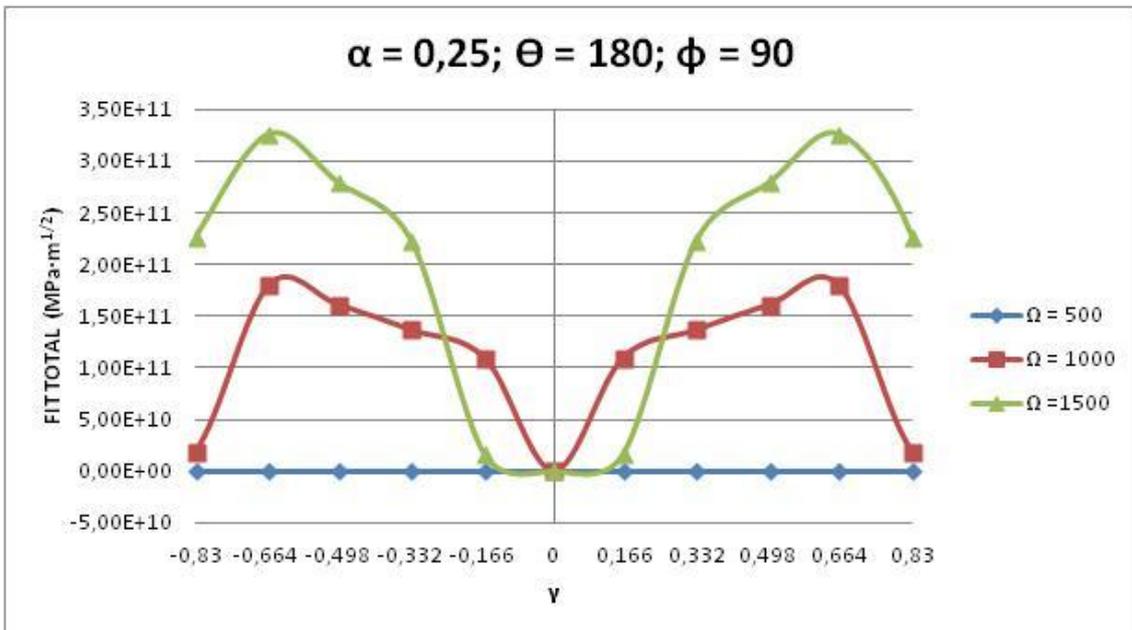


Figura 5.51: FIT para $\alpha=0.25; \theta=180; \phi=90$

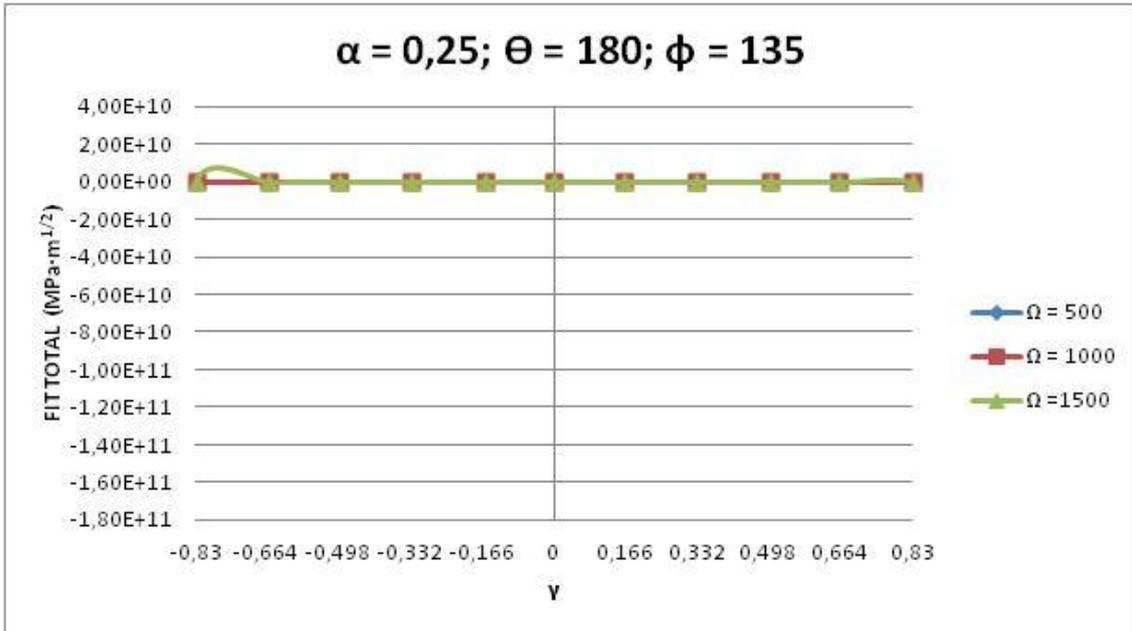


Figura 5.52: FIT para $\alpha=0.25; \Theta=180; \phi=135$

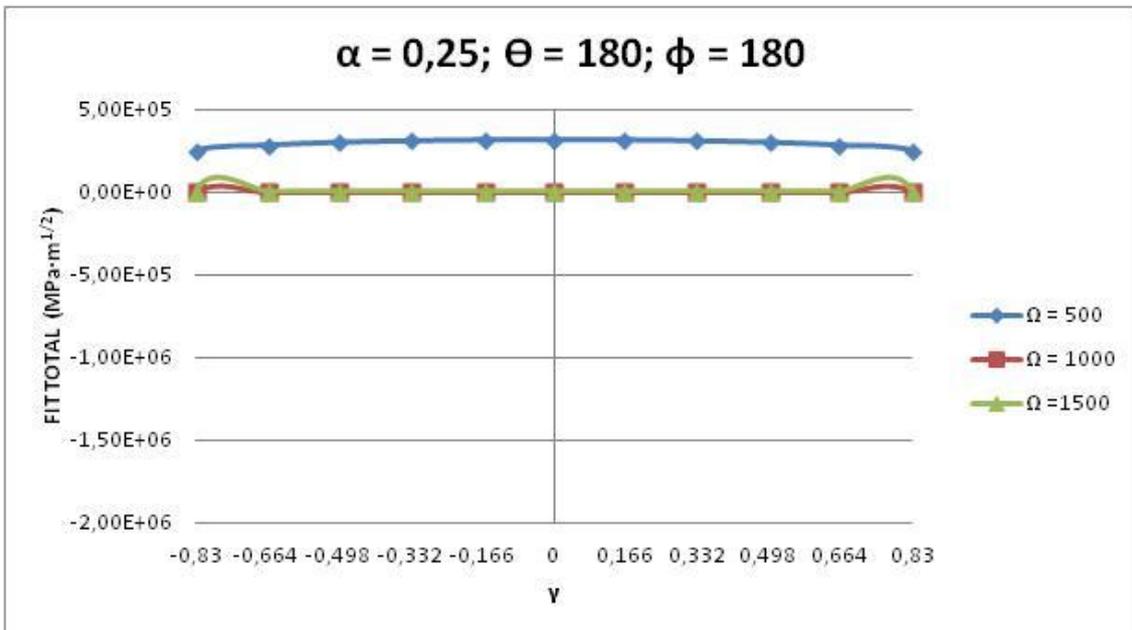


Figura 5.53: FIT para $\alpha=0.25; \Theta=180; \phi=180$

Tras analizar estos resultados, y los resultados para $\alpha = 0.1$, se puede concluir, a la vista de las gráficas, que la velocidad angular Ω influye en el eje abriendo la fisura cuanto mayor es.

Como se puede apreciar en la mayoría de los modelos en los que el tamaño de la fisura es $\alpha = 0.25$, la fisura permanece cerrada para valores de $\Omega = 500\text{rpm}$ pero los valores del FIT van aumentando, es decir, hay más probabilidades de que la fisura se abra para $\Omega = 1.000$ y 1.500rpm .

Otro factor a analizar, es la influencia del tamaño de la fisura α . Si antes se ha comprobado que para un ángulo de excentricidad, ϕ igual o mayor que 90° la fisura se cerraba, ahora se puede ver como la fisura permanece abierta a las velocidades angulares de 500 rpm .

Con lo que se concluye, que la influencia del tamaño de la fisura es mayor que la del ángulo de la excentricidad a falta de hacer la comprobación para un tamaño de fisura $\alpha = 0.5$.

Ahora, se procederá a ver si los valores del FIT, para $\alpha = 0.5$, cumplen estas premisas.

5.1.4 FIT para $\alpha = 0,5$

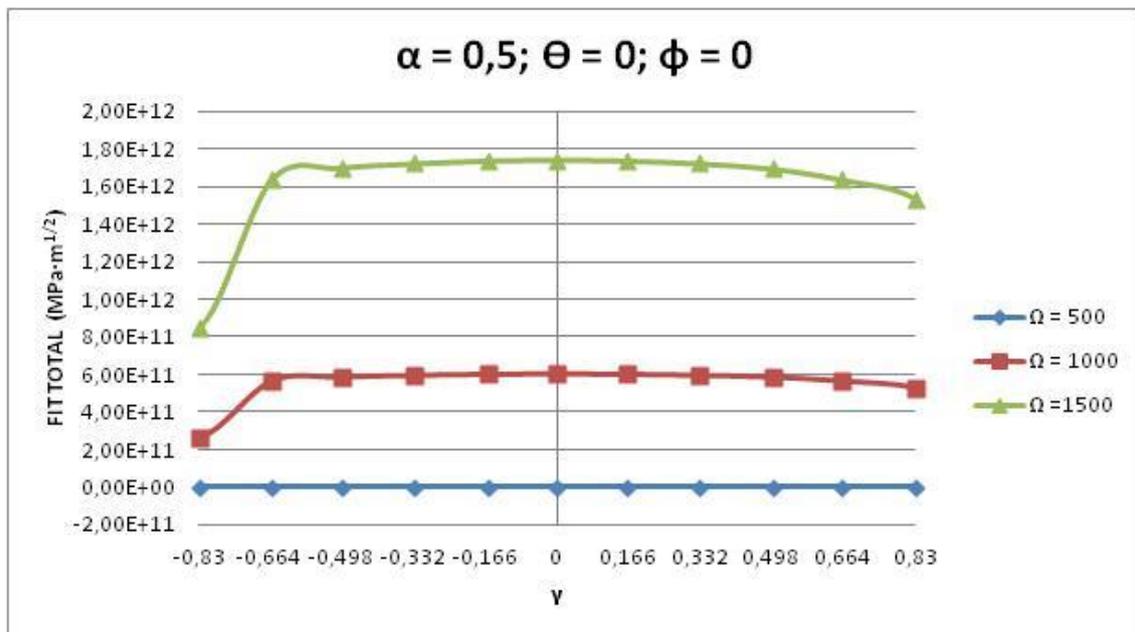


Figura 5.54: FIT para $\alpha=0.5; \Theta=0; \varphi=0$

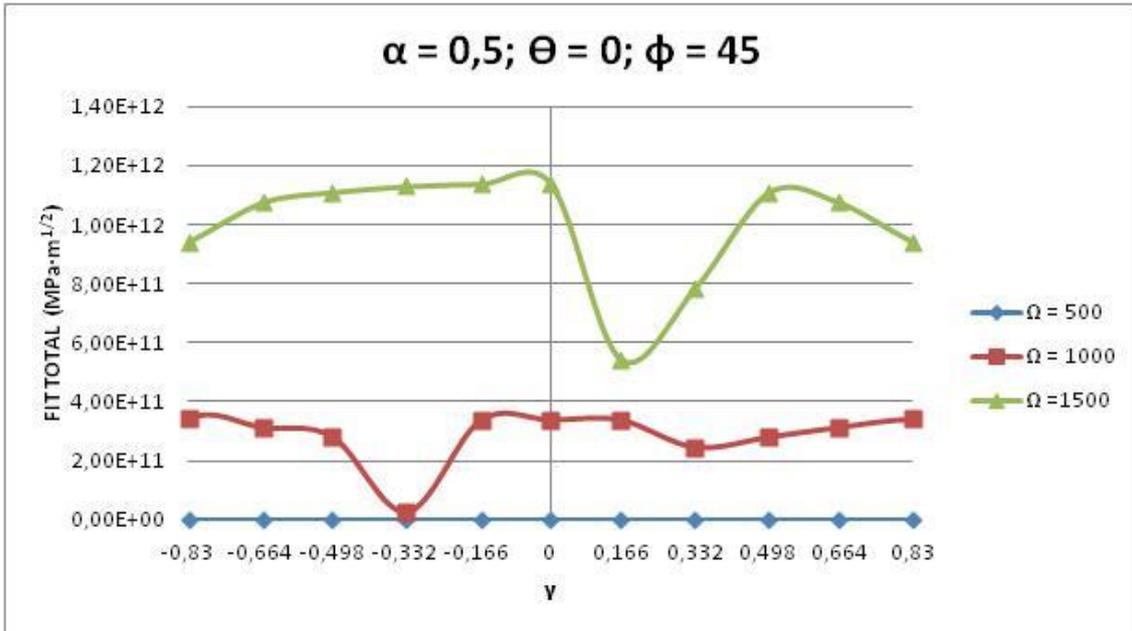


Figura 5.55: FIT para $\alpha=0.5; \theta=0; \phi=45$

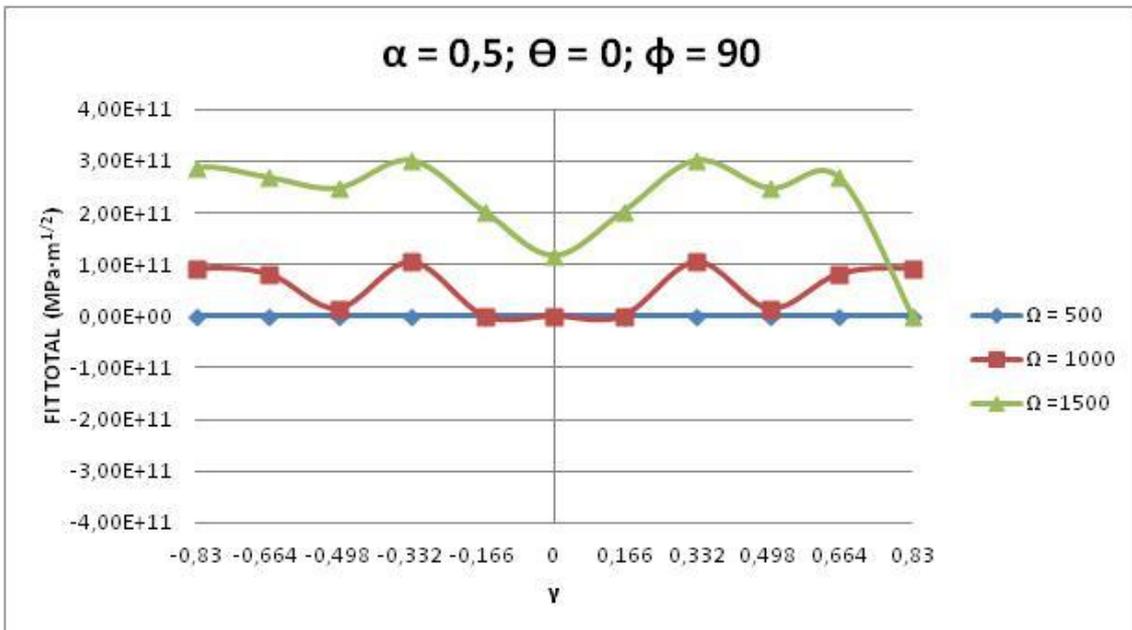


Figura 5.56: FIT para $\alpha=0.5; \theta=0; \phi=90$

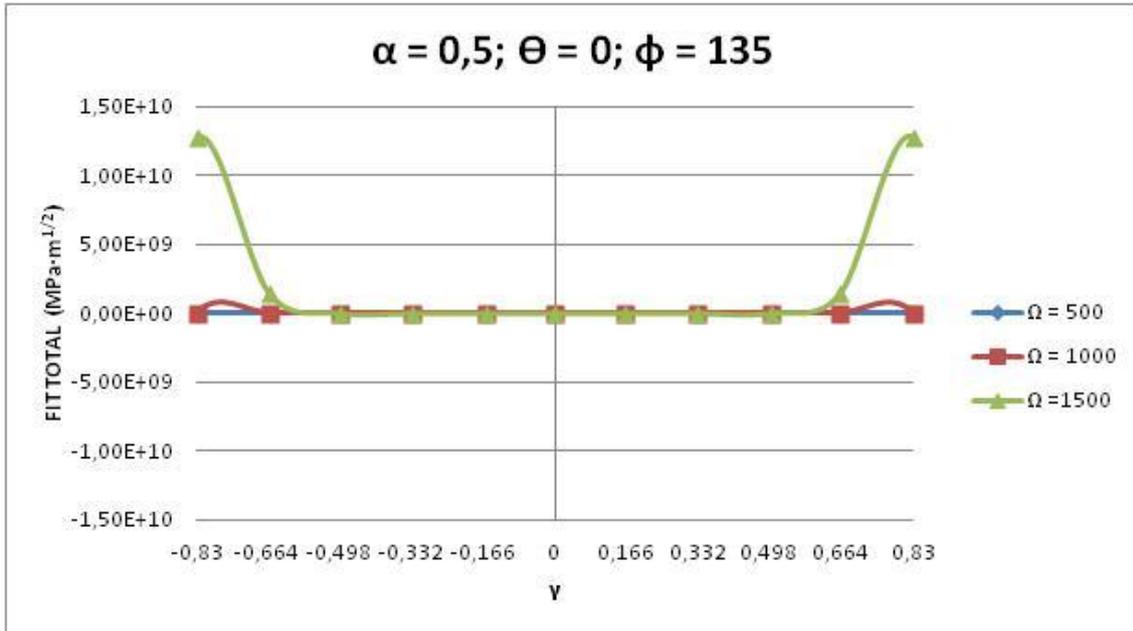


Figura 5.57: FIT para $\alpha=0.5; \theta=0; \phi=135$

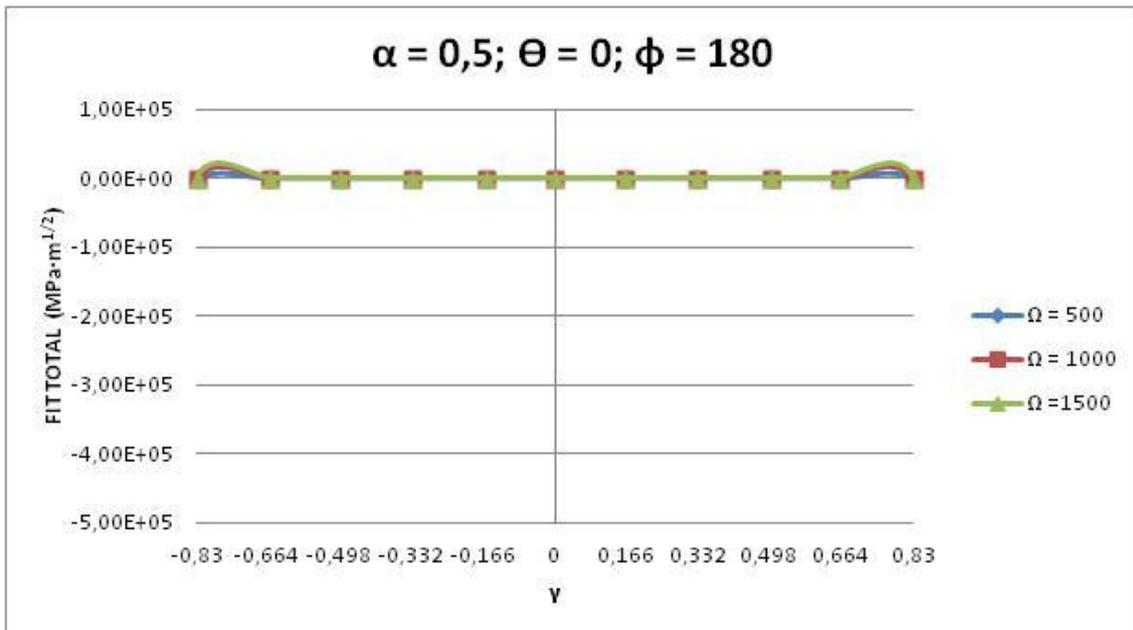


Figura 5.58: FIT para $\alpha=0.5; \theta=0; \phi=180$

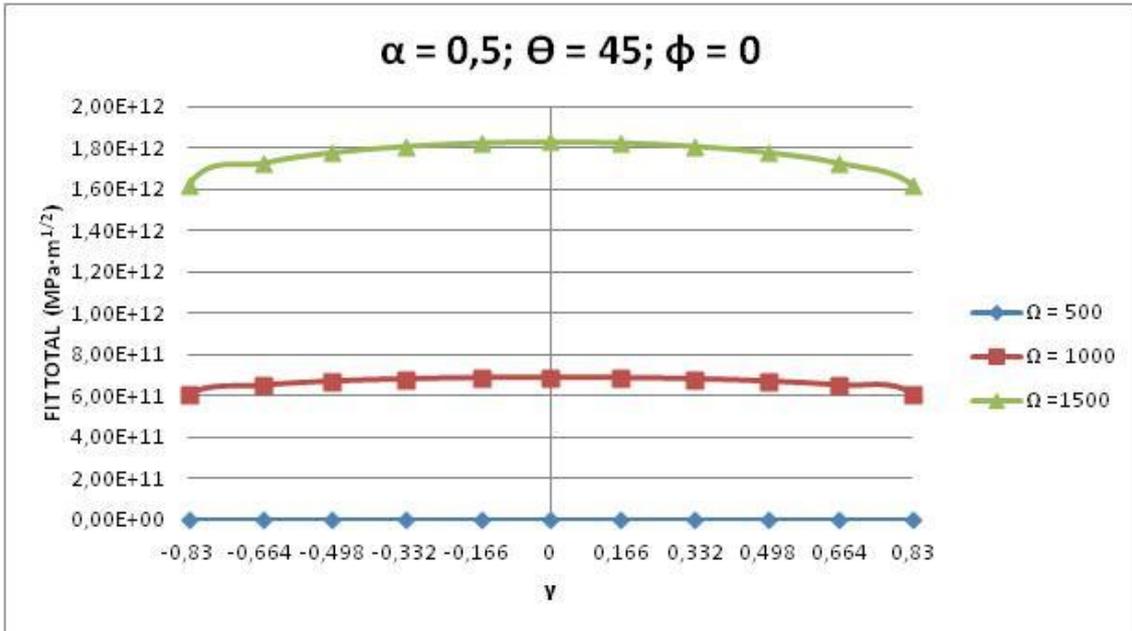


Figura 5.59: FIT para $\alpha=0.5; \theta=45; \phi=0$

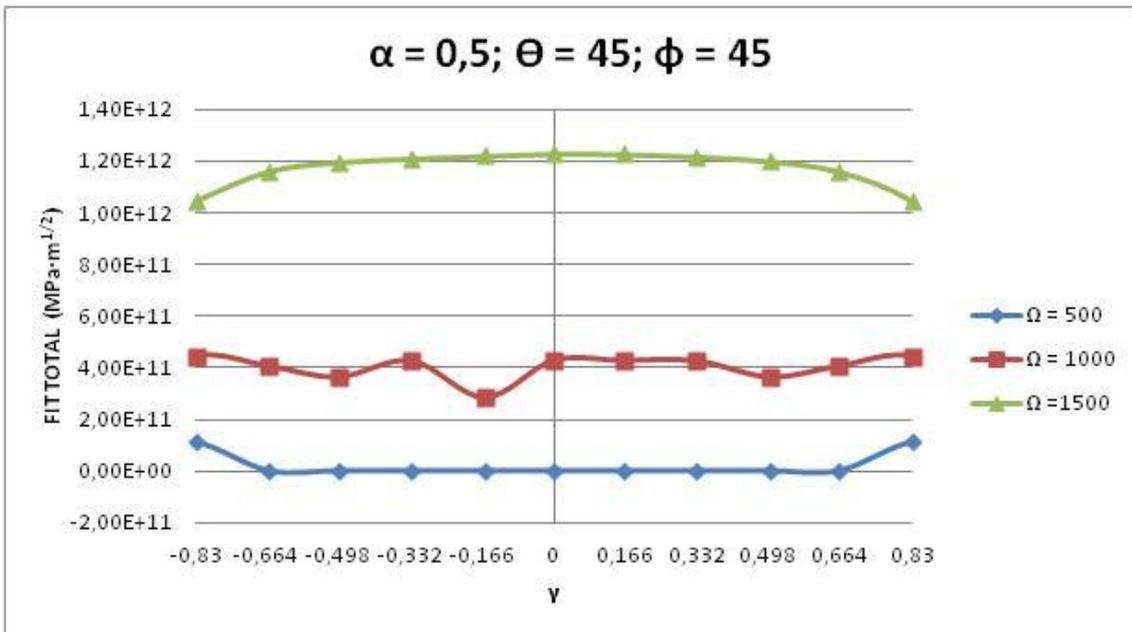


Figura 5.60: FIT para $\alpha=0.5; \theta=45; \phi=45$

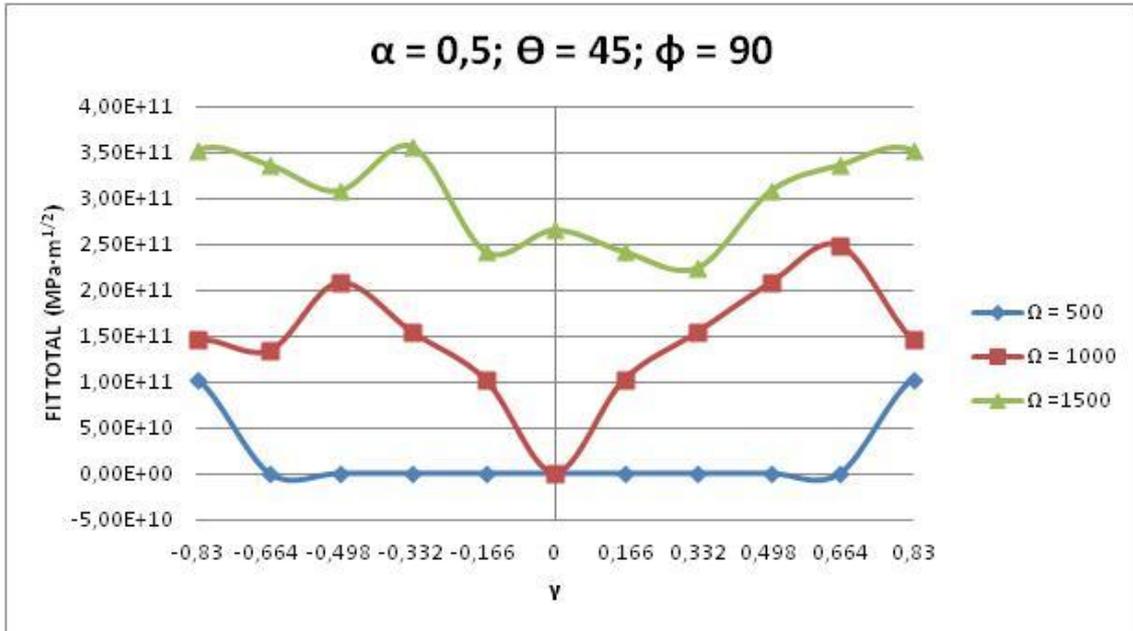


Figura 5.61: FIT para $\alpha=0.5; \theta=45; \phi=90$

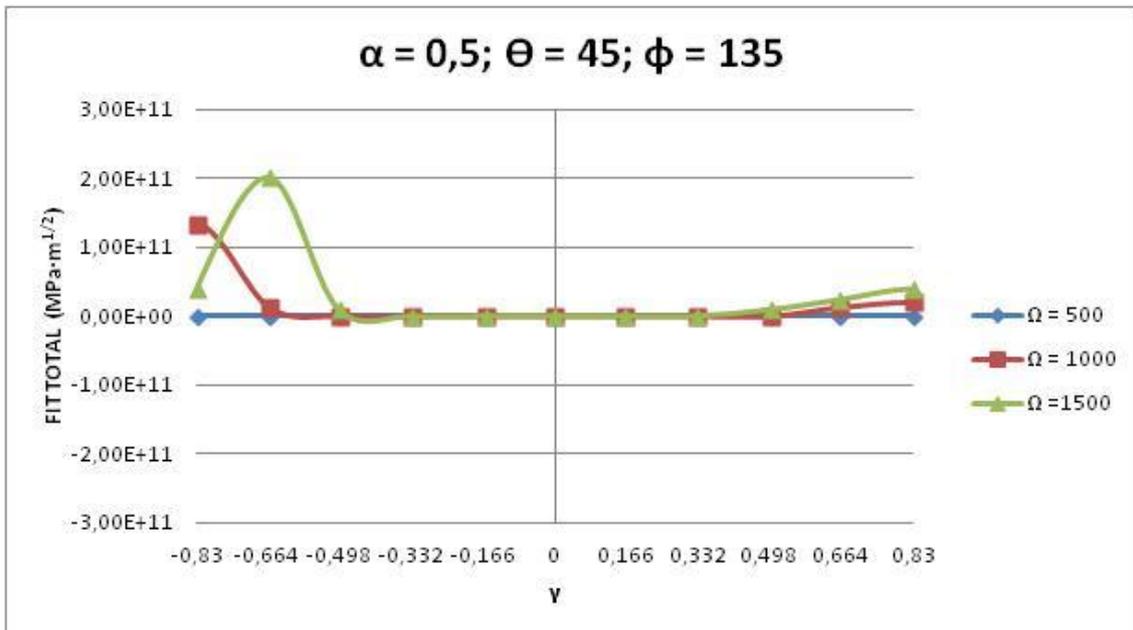


Figura 5.62: FIT para $\alpha=0.5; \theta=45; \phi=135$

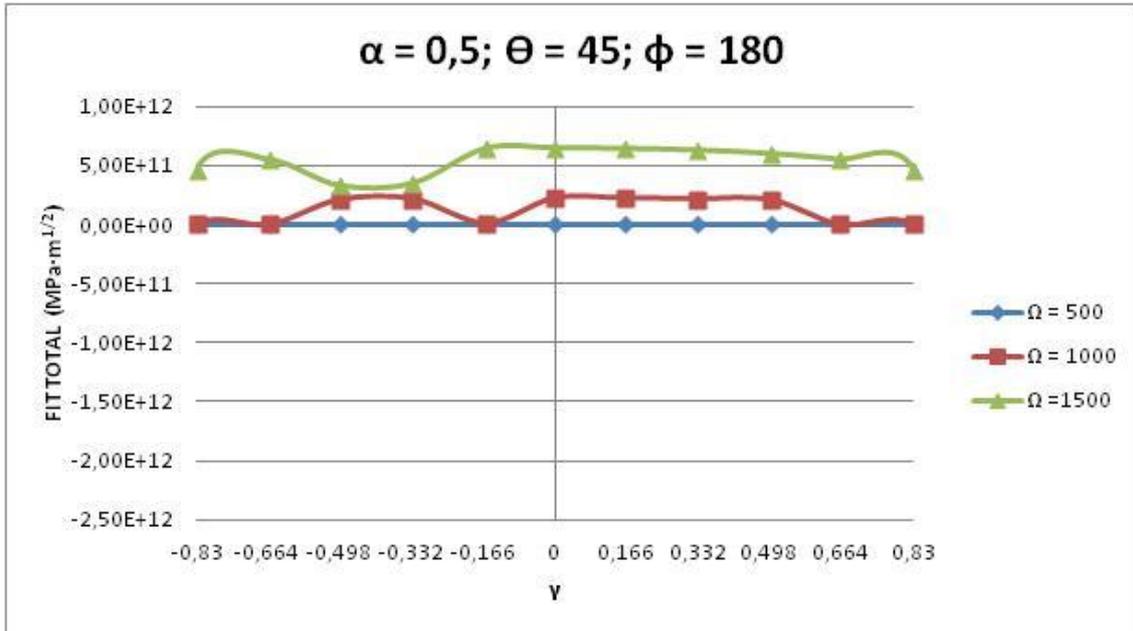


Figura 5.63: FIT para $\alpha=0.5; \theta=45; \phi=180$

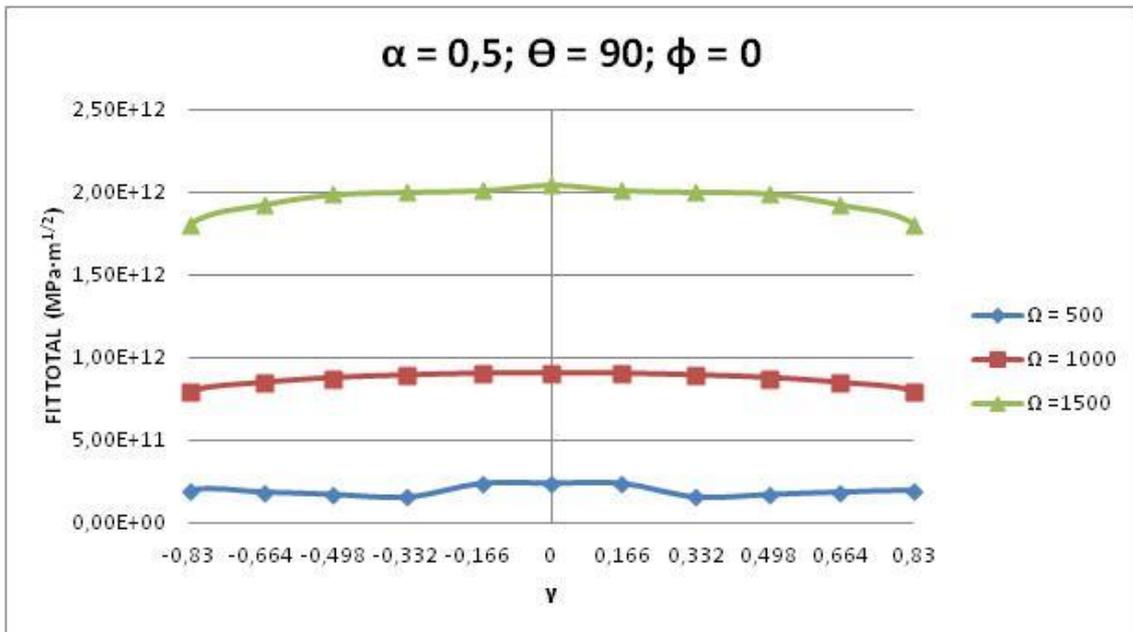


Figura 5.64: FIT para $\alpha=0.5; \theta=90; \phi=0$

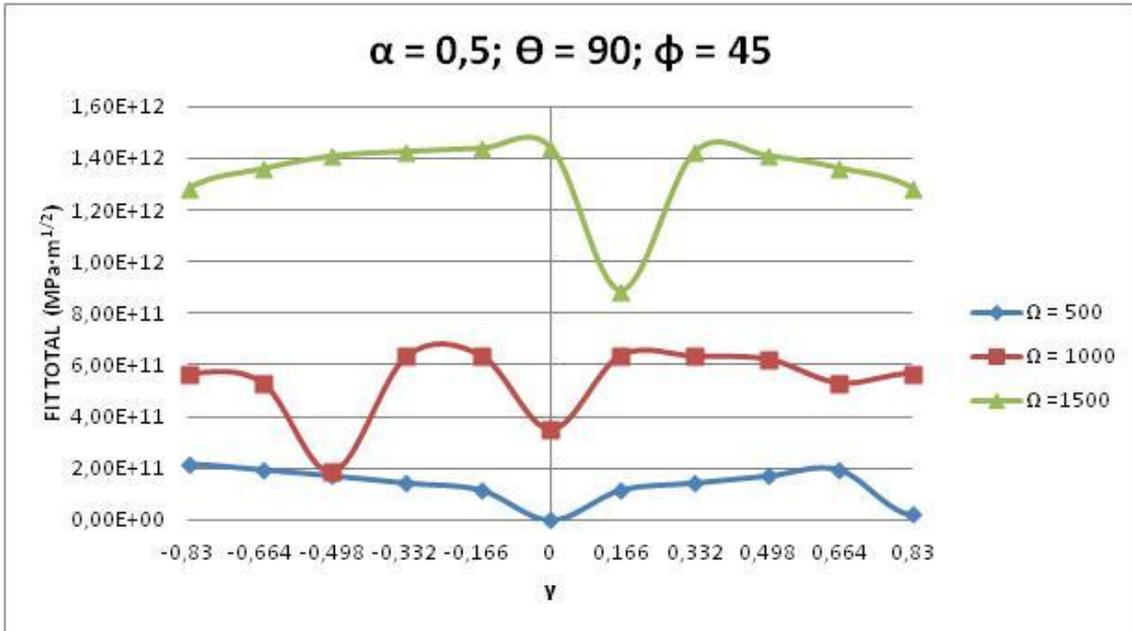


Figura 5.65: FIT para $\alpha=0.5; \theta=90; \phi=45$

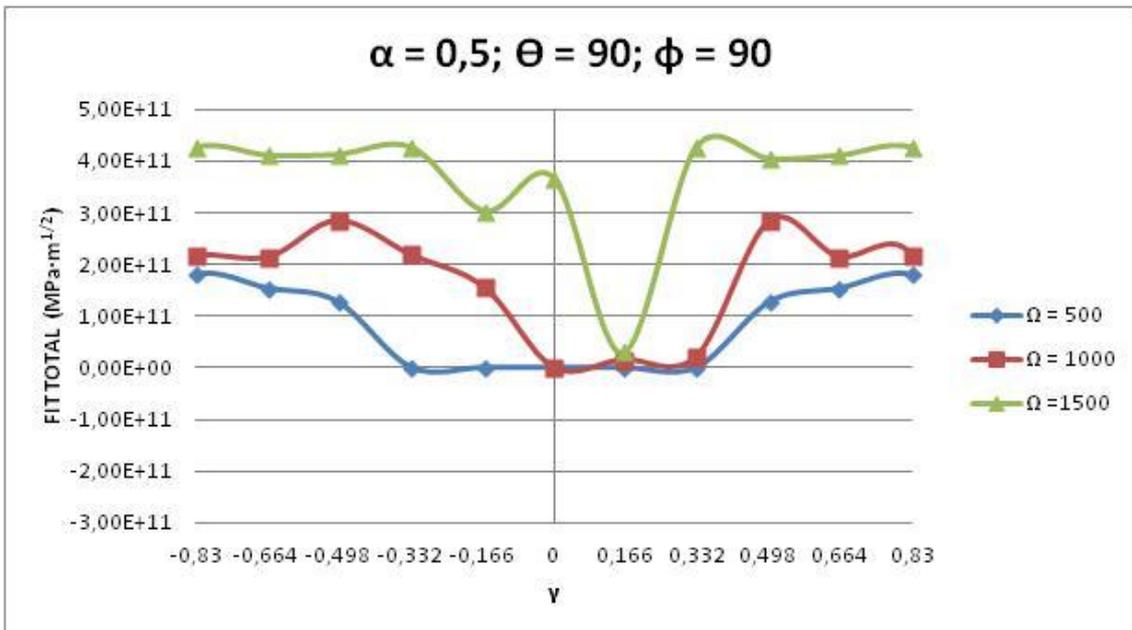


Figura 5.66: FIT para $\alpha=0.5; \theta=90; \phi=90$

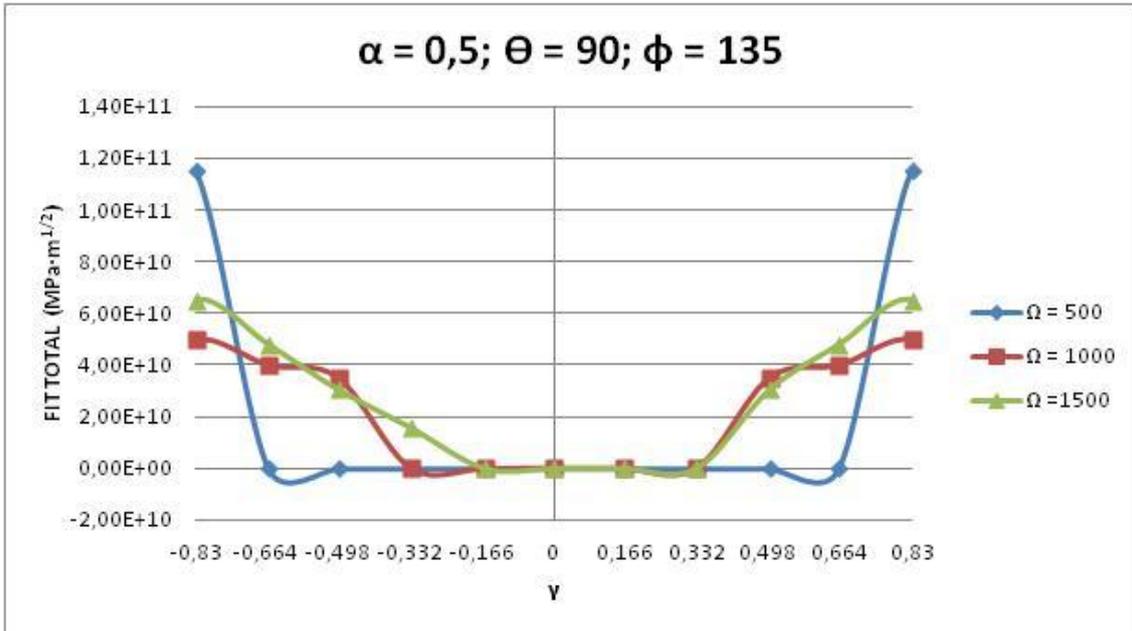


Figura 5.67: FIT para $\alpha=0.5; \theta=90; \phi=135$

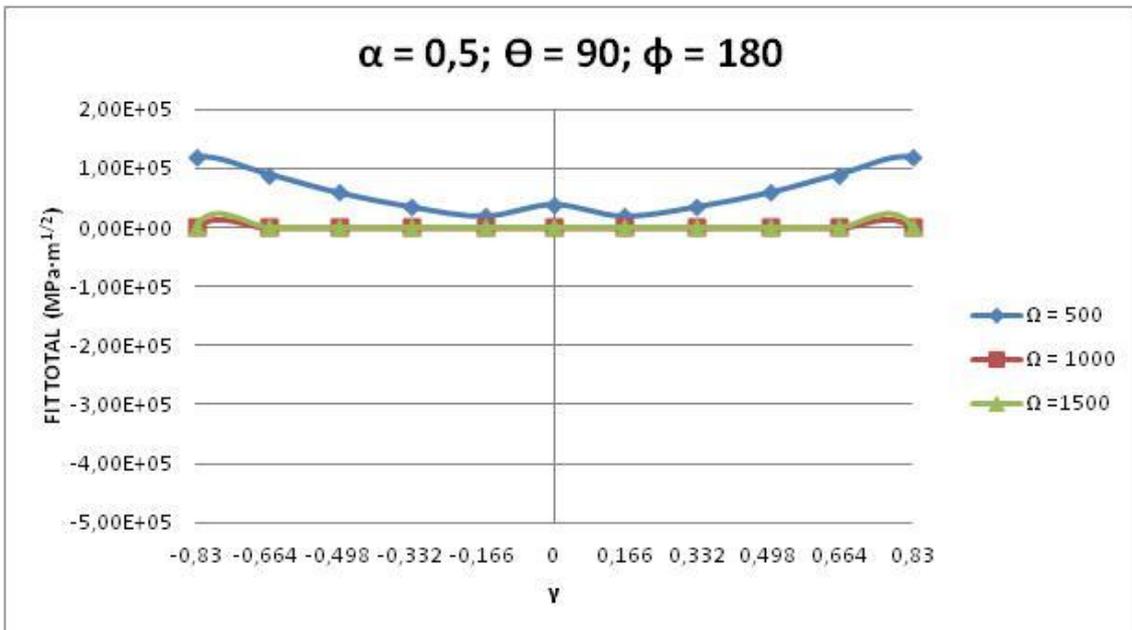


Figura 5.68: FIT para $\alpha=0.5; \theta=90; \phi=180$

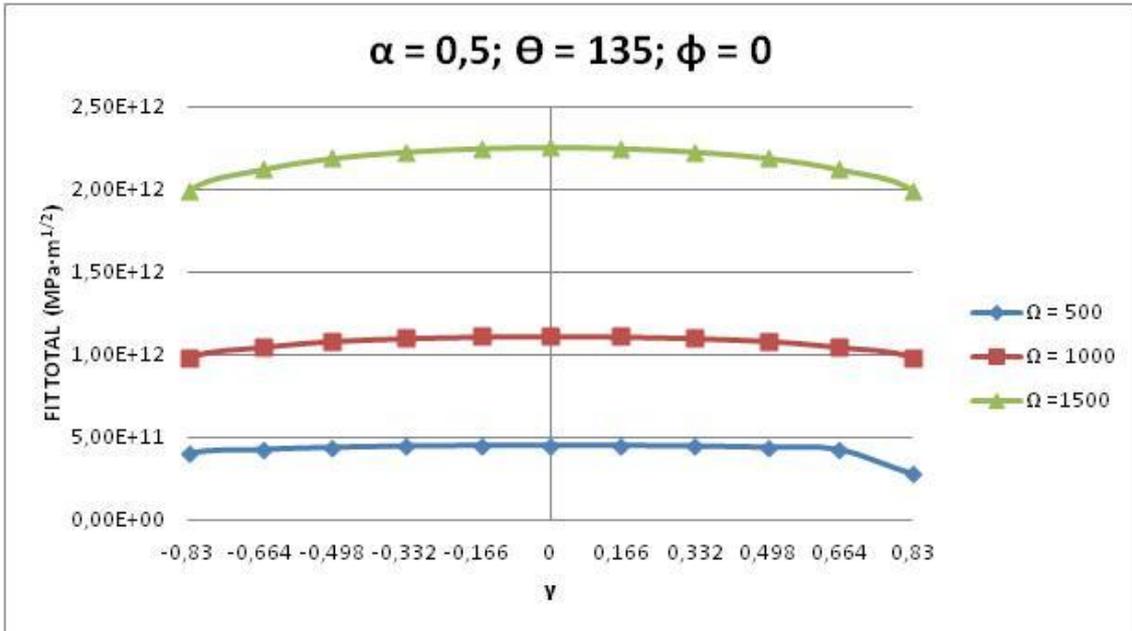


Figura 5.69: FIT para $\alpha=0.5; \theta=135; \phi=0$

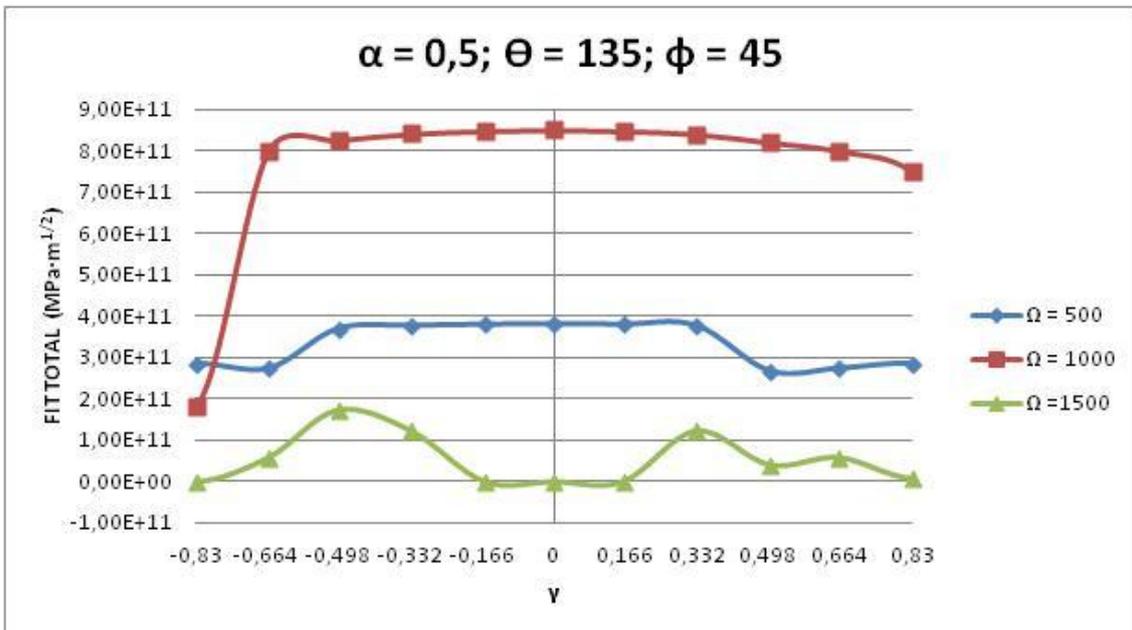


Figura 5.70: FIT para $\alpha=0.5; \theta=135; \phi=45$

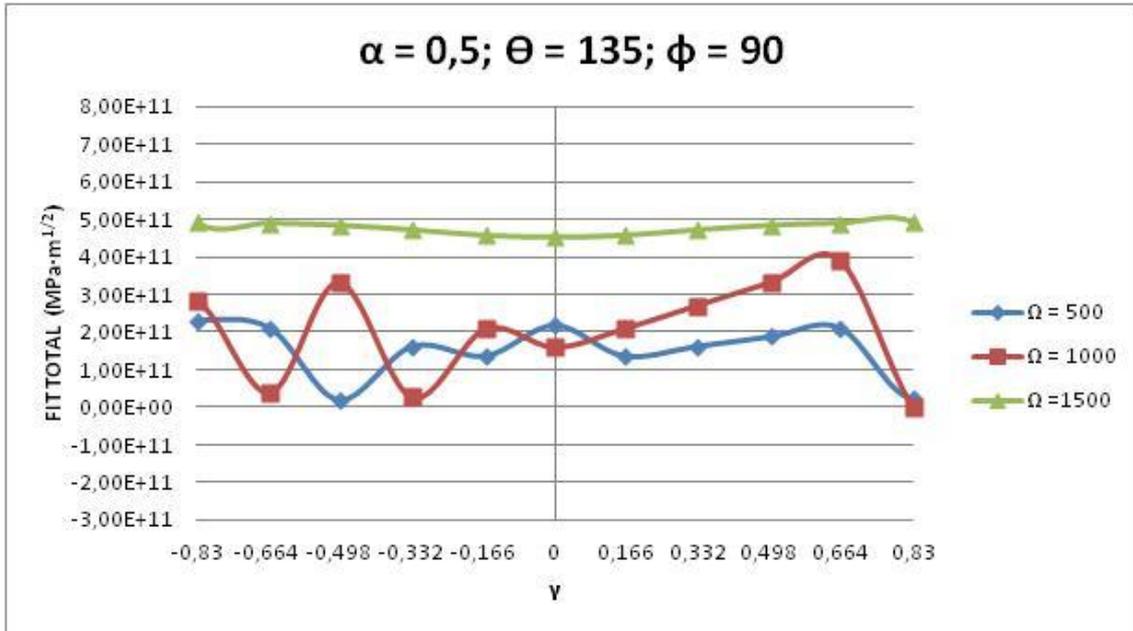


Figura 5.71: FIT para $\alpha=0.5; \Theta=135; \phi=90$

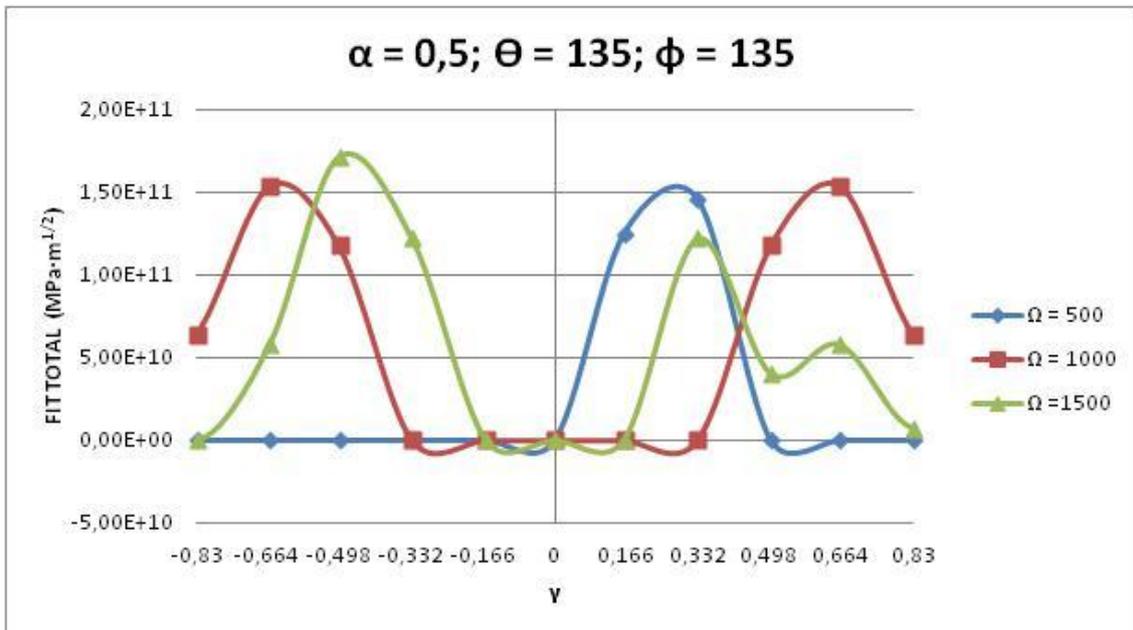


Figura 5.72: FIT para $\alpha=0.5; \Theta=135; \phi=135$

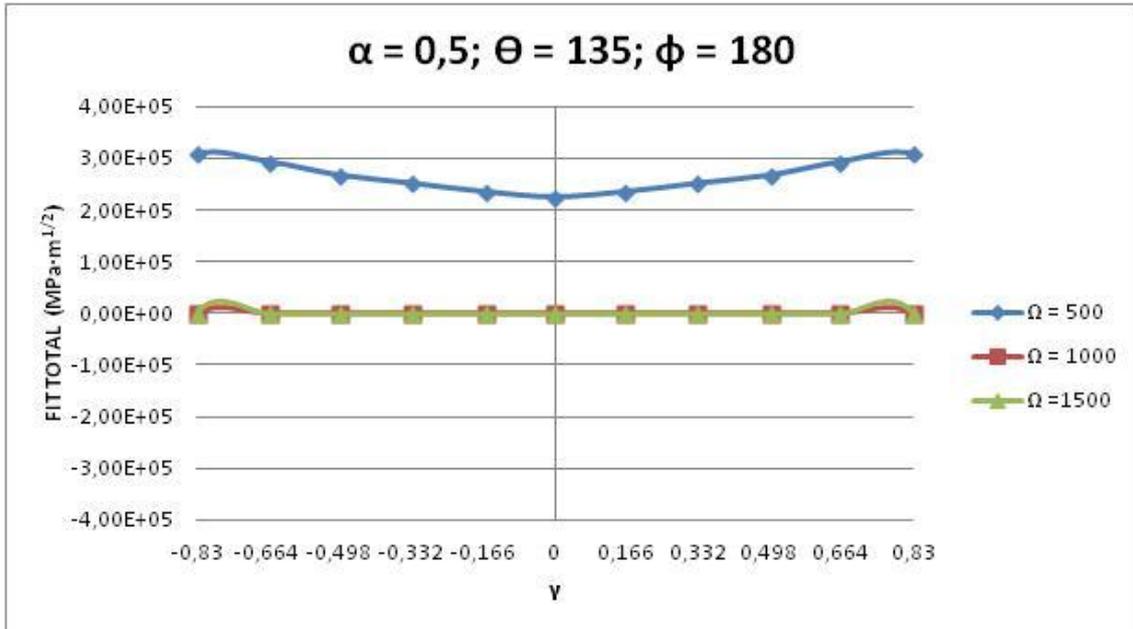


Figura 5.73: FIT para $\alpha=0.5; \theta=135; \phi=180$

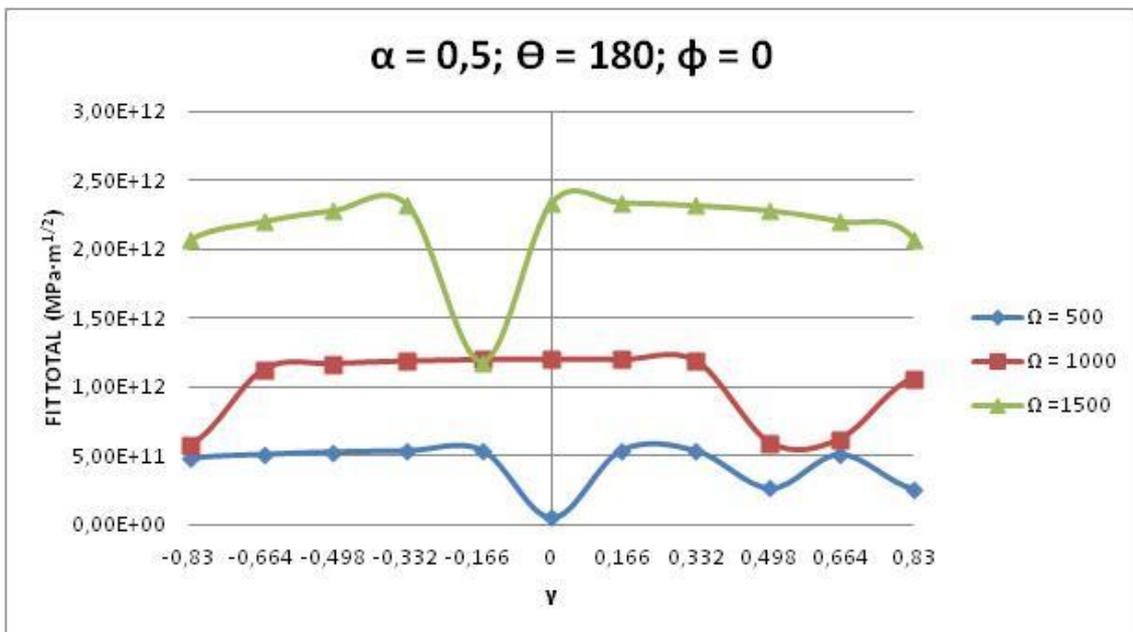


Figura 5.74: FIT para $\alpha=0.5; \theta=180; \phi=0$

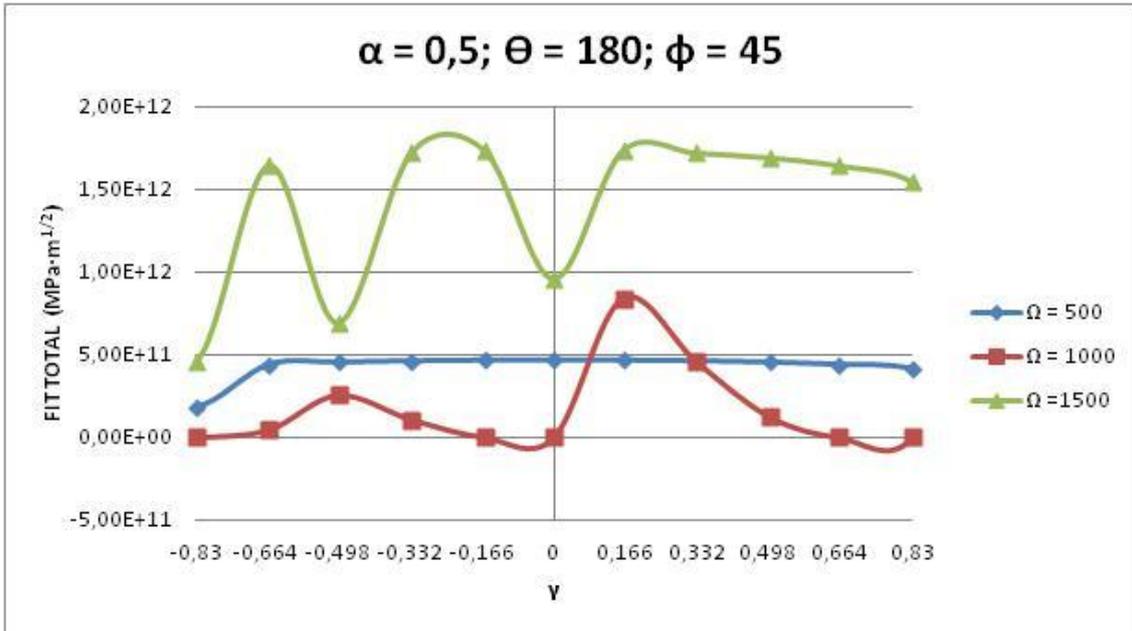


Figura 5.75: FIT para $\alpha=0.5; \Theta=180; \phi=45$

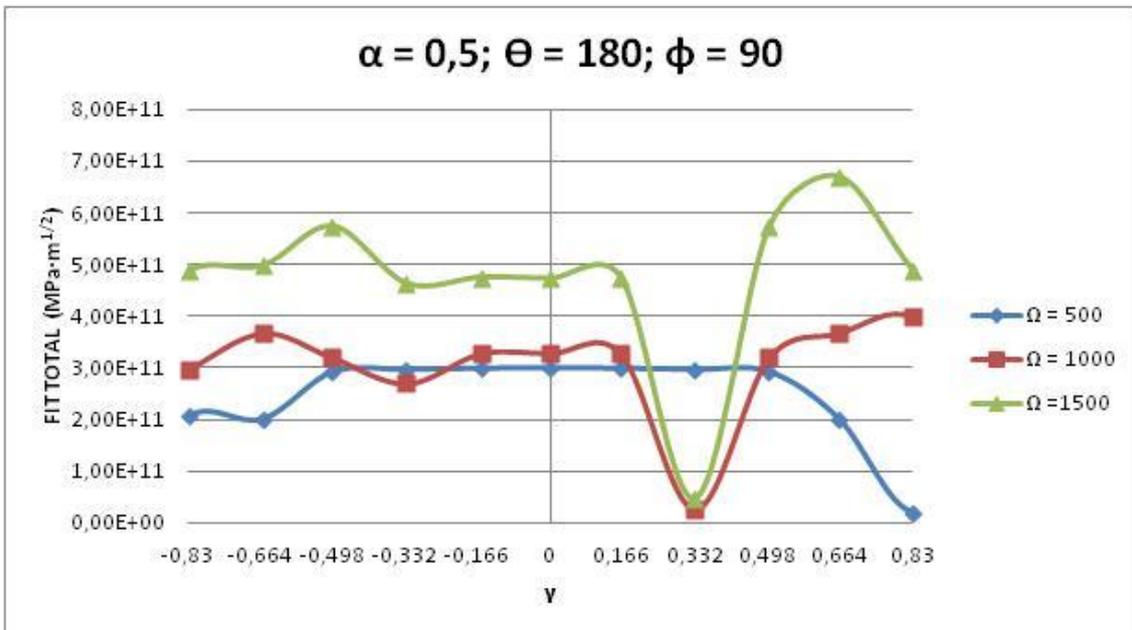


Figura 5.76: FIT para $\alpha=0.5; \Theta=180; \phi=90$

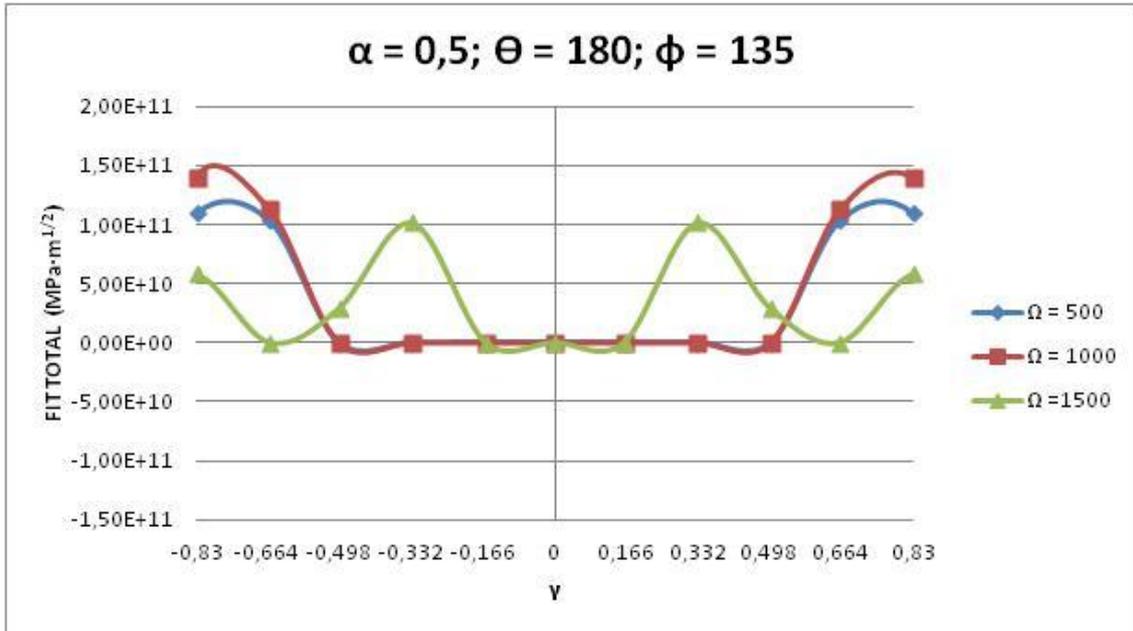


Figura 5.77: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=135$

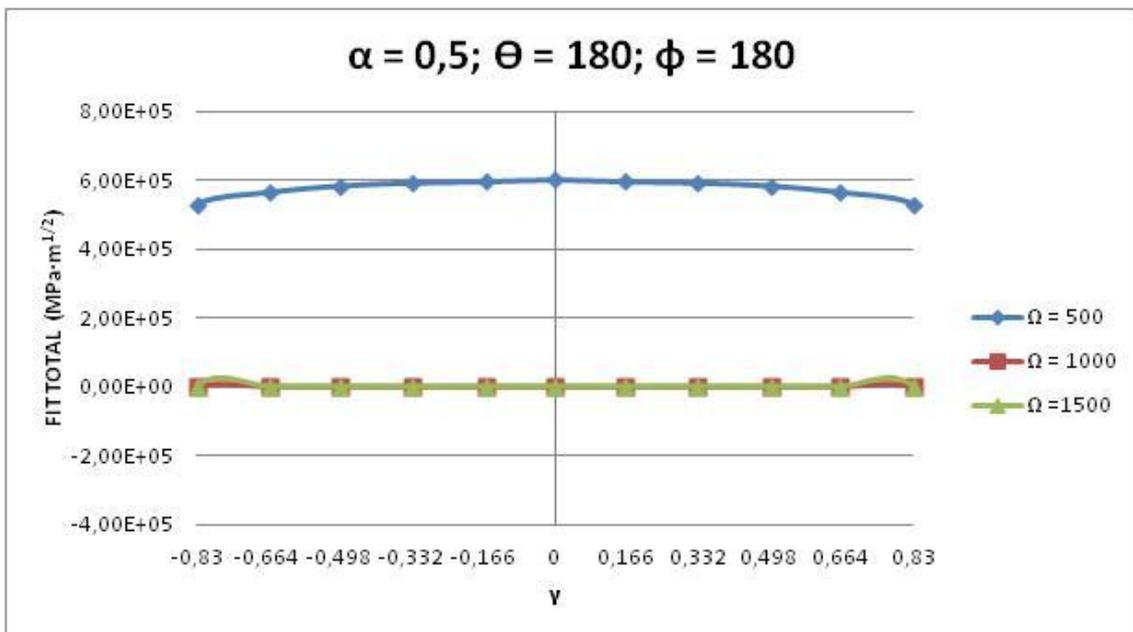


Figura 5.78: FIT para $\alpha=0.5$; $\Theta=180$; $\phi=180$

Tras analizar las gráficas para el tamaño de fisura $\alpha = 0.5$, se confirma la hipótesis que se ha realizado tras el análisis de los modelos para tamaño de fisura $\alpha = 0.25$. A mayor tamaño de fisura, deja de tener importancia el ángulo en la que está situada la masa excéntrica.

En lo respecta al ángulo de giro de la fisura, se puede comprobar cómo, a rasgos generales, mientras mayor sea éste, mayor suele ser el FIT en valor absoluto, es decir, para los casos en los que el tamaño de la fisura es mayor, como ésta debido a la influencia de α se abre, el FIT tomará valores positivos y cada vez mayores según vaya girando.

5.1.5 Efecto del tamaño de la fisura α

A continuación se muestran una serie de gráficas en las que se puede comparar el efecto del tamaño de la fisura a igualdad de ángulo de rotación, excentricidad y velocidad angular.

Se puede comprobar, como también se ha mencionado un poco más arriba, que a la vista de los datos de las Figuras 79, 80 y 81, a mayor tamaño de fisura, mayor será el valor del FIT y por tanto mayor será la probabilidad de que la fisura se abra.

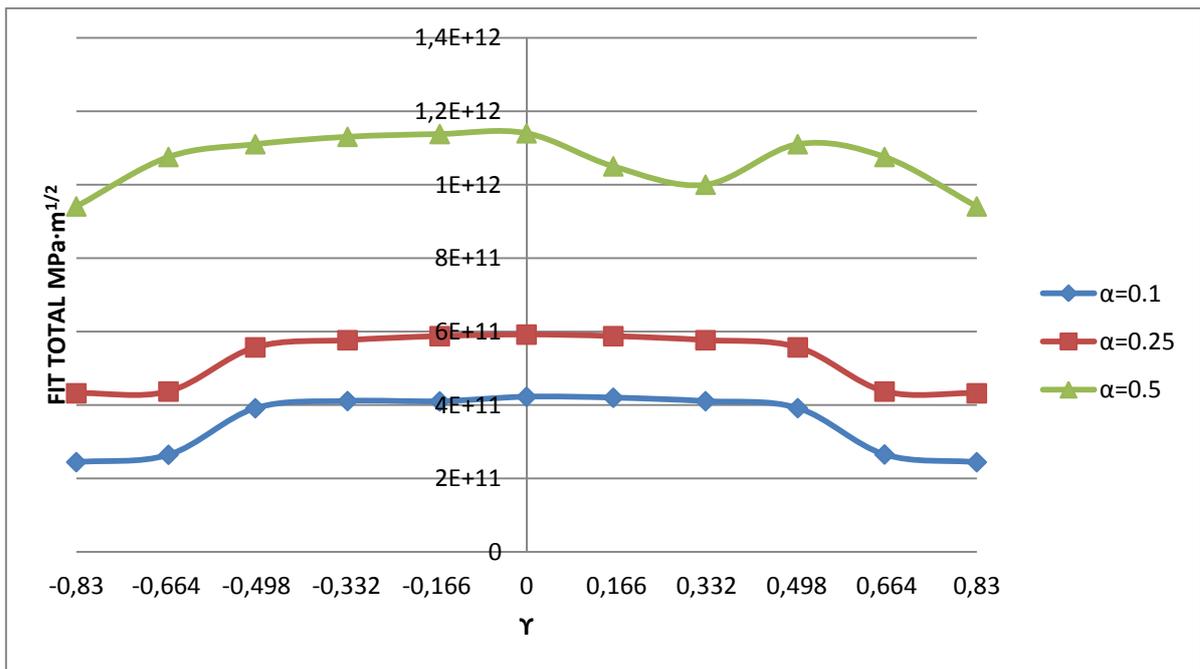


Figura 5.79: Comparación de FIT con $\theta=0$; $\varphi=45$; $\Omega=500$

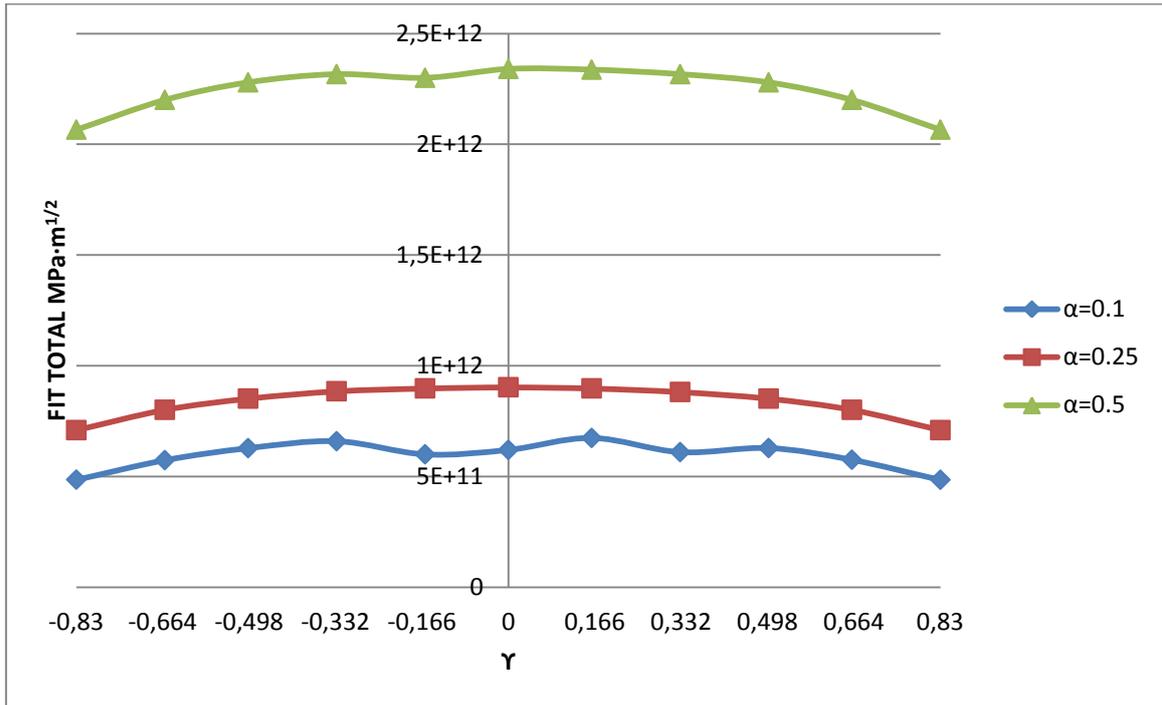


Figura 5.80: Comparación de FIT con $\theta=180$; $\varphi=0$; $\Omega=1000$

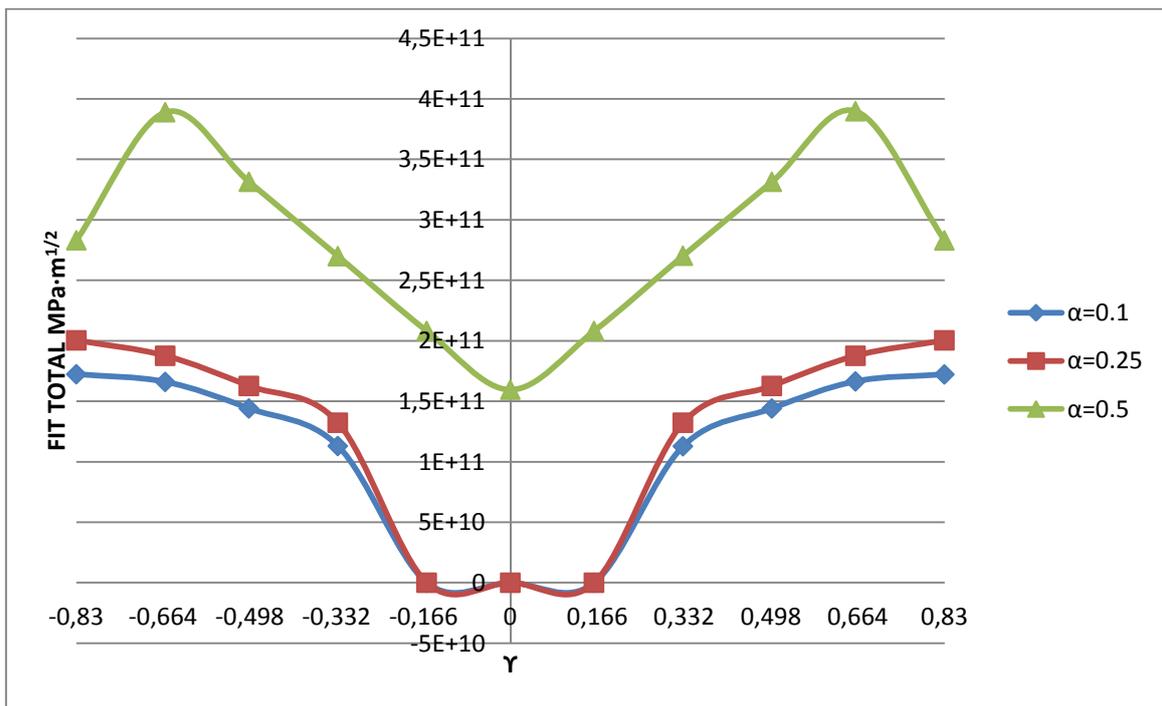


Figura 5.81: Comparación de FIT con $\theta=135$; $\varphi=90$; $\Omega=1000$

5.2 ÁREA DE FISURA ABIERTA

El otro estudio que se ha realizado en el actual Proyecto ha sido comprobar cualitativa y cuantitativamente el área de la fisura que se abre y cual permanece cerrada. Como se ha dicho anteriormente, ABAQUS tiene la opción de mostrar esto mediante la pestaña COPEN .

En la *Figura 5.82* se muestra como el módulo COPEN indica que proporción de la fisura se abre y cuál permanece cerrada.

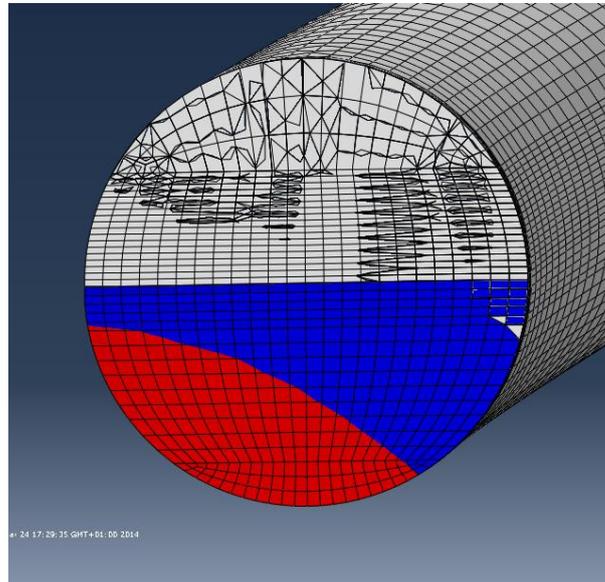


Figura 5.82: Módulo COPEN con apertura de fisura

Luego, para calcular la proporción de área abierta respecto al área transversal del eje, se ha utilizado el programa SOLID EDGE V20, que mediante la opción de cálculo de áreas que integra, ha permitido calcular éstas.

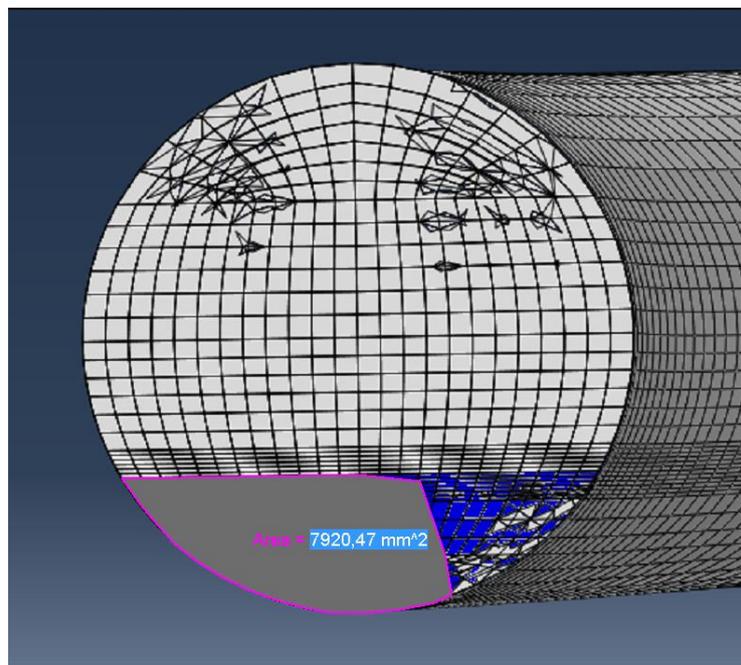


Figura 5.83: Obtención de áreas fisuradas abiertas mediante SOLID EDGE

El porcentaje de apertura de la fisura para la comparativa de los resultados se define de la siguiente manera.

$$\text{Apertura de la fisura} = \frac{\text{Área fisurada abierta}}{\text{Área sección transversal}} \quad [6.1]$$

A continuación se exponen en 3 gráficas, según el tamaño de la fisura, grado de apertura de las fisuras.

5.2.1 Para $\alpha=0.1$

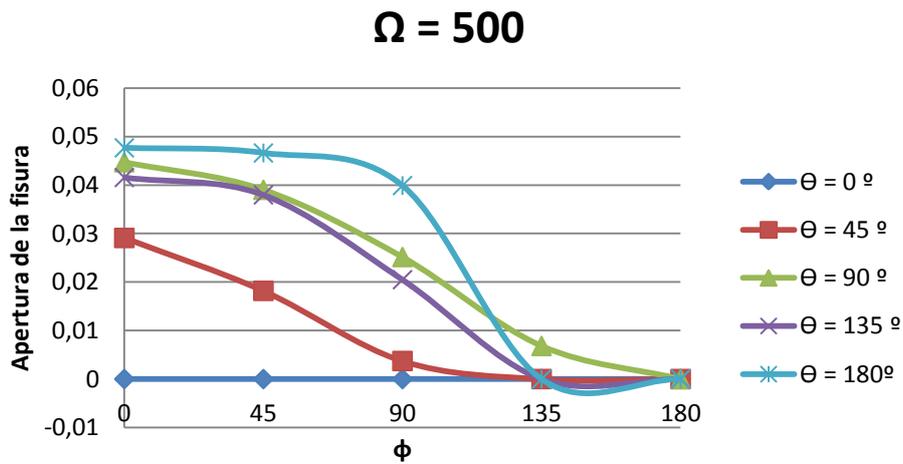


Figura 5.84: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.1$ y $\Omega=500rpm$

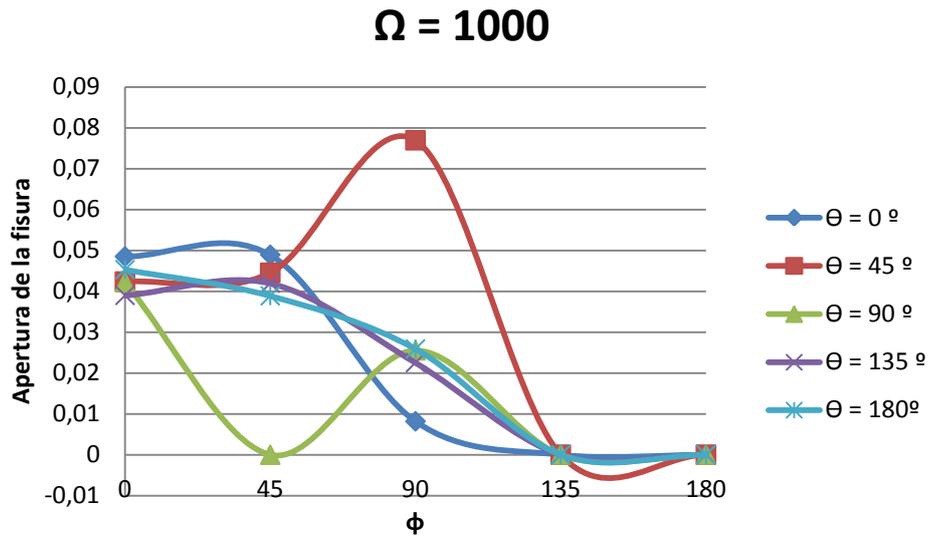


Figura 5.85: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.1$ y $\Omega=1000$ rpm

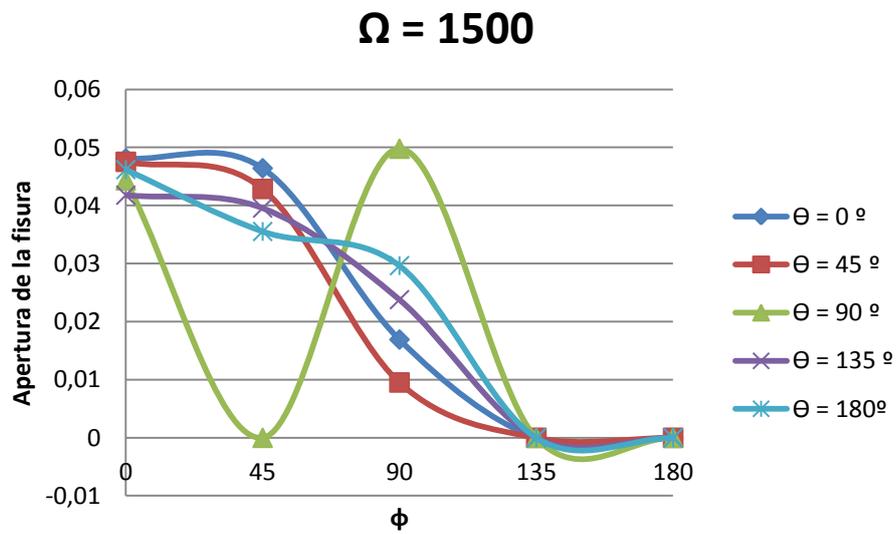


Figura 5.86: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.1$ y $\Omega=500$ rpm

5.2.2 Para $\alpha=0.25$

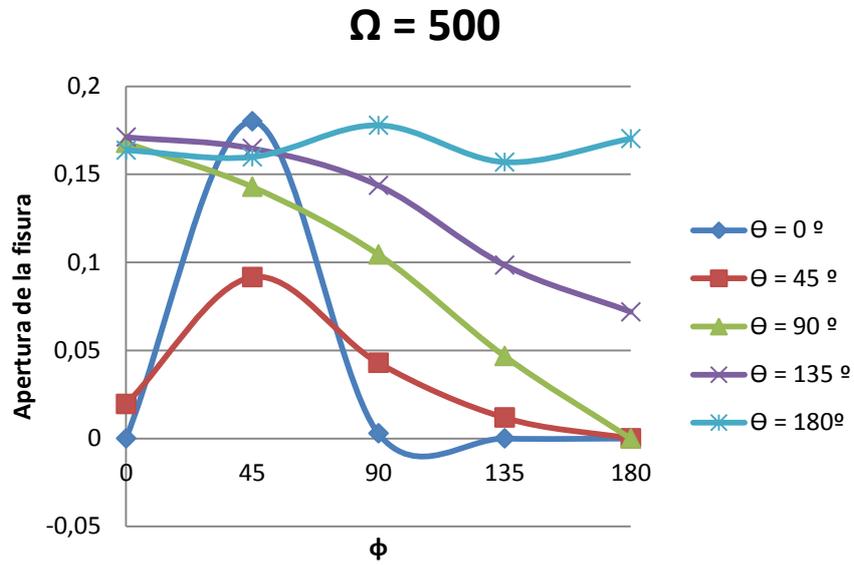


Figura 5.87: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.25$ y $\Omega=500$ rpm

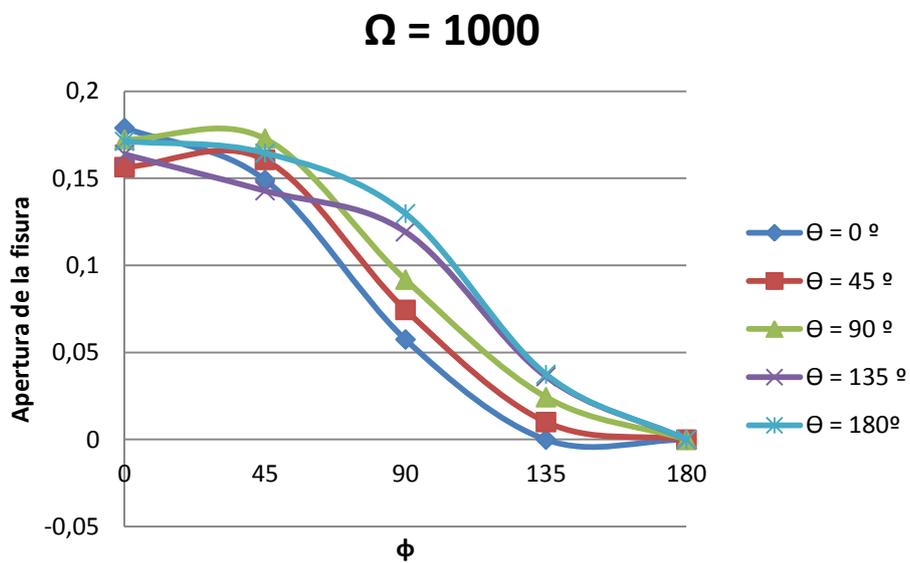


Figura 5.88: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.25$ y $\Omega=1000$ rpm

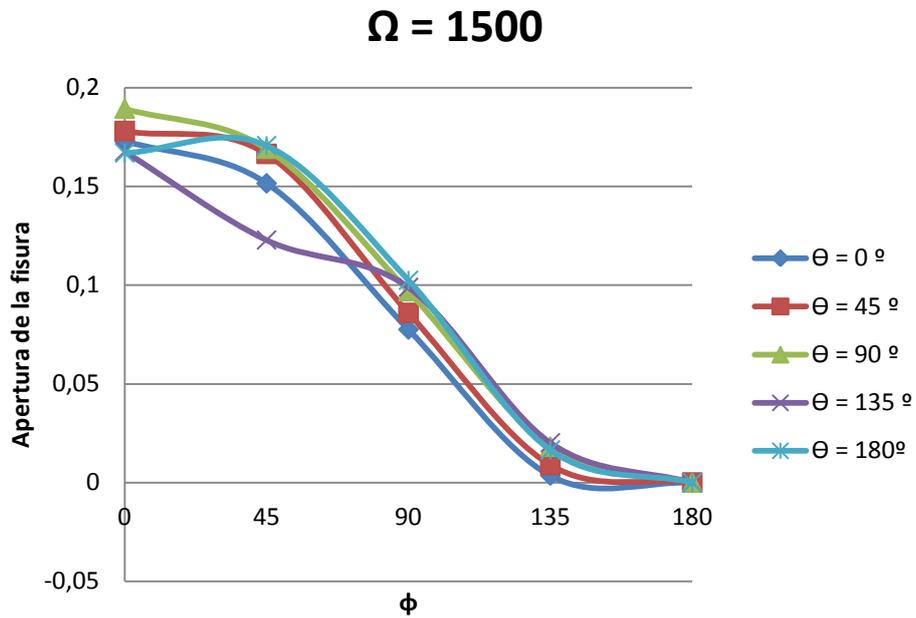


Figura 5.89: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.25$ y $\Omega=1500$ rpm

5.2.3 Para $\alpha=0.5$

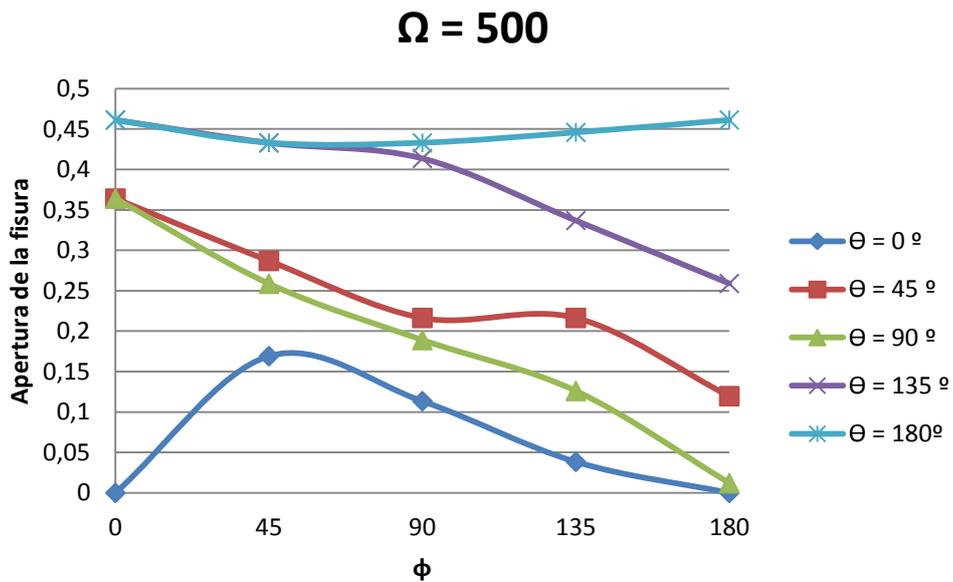


Figura 5.90: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.5$ y $\Omega=500$ rpm

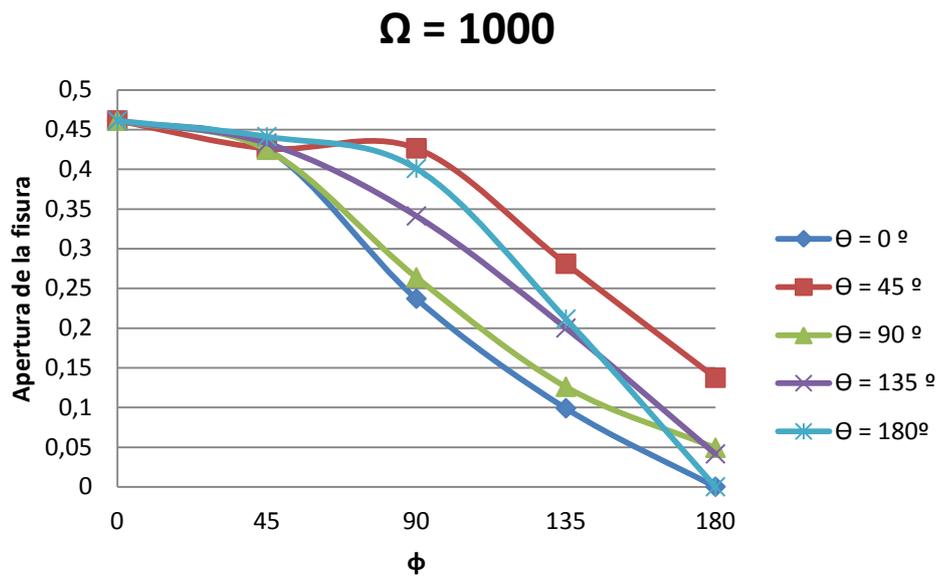


Figura 5.91: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.5$ y $\Omega=1000$ rpm

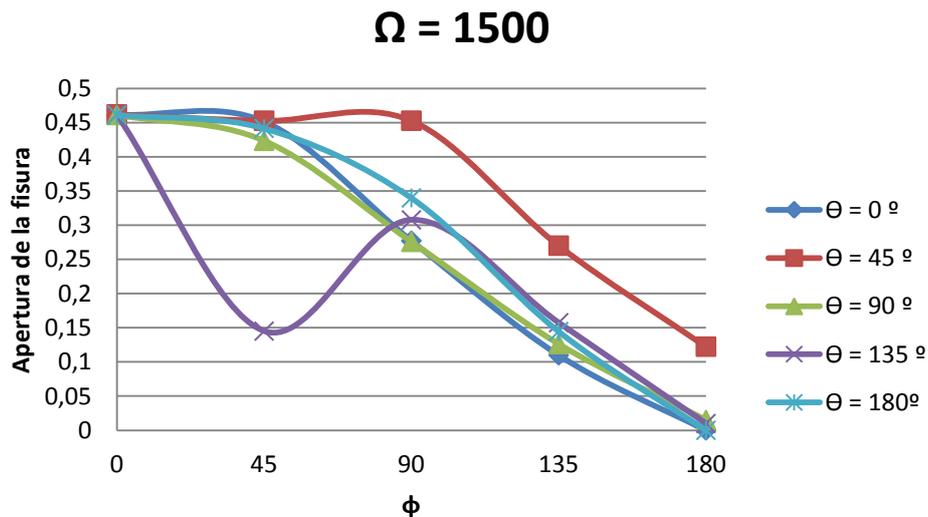


Figura 5.92: Área Fisurada abierta para $\alpha=0.5$ y $\Omega=1500$ rpm

A la vista de las gráficas del área fisurada abierta quedan demostrado que para un tamaño de fisura pequeño, como lo es $\alpha=0.1$, ángulo de excentricidad es el que determina apertura de la fisura. Se puede ver, cómo para valores de ϕ menores de 90° la fisura está abierta y poco a poco se va cerrando.

Para valores de tamaño de fisura de $\alpha=0.25$ se puede apreciar claramente cómo es la velocidad angular Ω el factor determinante en la apertura y cierre de la fisura.

También se comprueba que, a mayor ángulo de giro del eje θ , mayor es la apertura de la fisura, tal y como se había señalado antes.

Por último, debido a la influencia del tamaño de la fisura α , ésta permanece abierta en la mayoría de los casos cuando α supera el tamaño de 0.25.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Como conclusión de este estudio, se puede resumir de la simulación de los 225 posibles casos estudiados, para unos valores de masa y excentricidad fijos las siguientes conclusiones:

- Para un tamaño de fisura pequeño, si el ángulo de excentricidad ϕ es menor de 90° , la fisura se abre, para ángulos de excentricidad de 90° o mayores, la fisura permanecerá cerrada.
 - Dicho de otra forma, si el tamaño de la fisura es pequeño, y la excentricidad está opuesta a la fisura, ésta tiende a permanecer cerrada. Por el contrario, si la fisura estuviese enfrente de la fisura, ésta se abrirá de manera que la fisura se propagará.
- El efecto del aumento de la velocidad angular Ω tras la visualización de todas las gráficas, es un aumento del valor del FIT a igualdad de ángulo de rotación del eje Θ , ángulo de la excentricidad ϕ y tamaño de fisura α . Es decir, que a mayor velocidad angular de giro Ω , la fisura tiende a abrirse más.
 - A medida que se aumenta la velocidad angular en el eje, para tamaños de fisura de $\alpha=0.5$ la fisura se abre aunque para tamaños de fisura de $\alpha=0.25$ ésta permanece cerrada a velocidades angulares $\Omega=500$ y 1000 rpm.

- En cuanto al efecto del tamaño de la fisura α , un aumento de éste hace que los valores del FIT sean mayores por lo que habrá una mayor probabilidad de que la fisura se abra para los casos en los que el tamaño de ésta más grande.
- Del estudio del efecto del ángulo de rotación del eje se extrae la conclusión de que con un aumento de éste, los valores del FIT van siendo mayores y entonces la probabilidad de que la fisura se abra será mayor.
- El factor que mayor importancia tiene a la hora de que una fisura se abra o se cierre es el tamaño de ésta α , seguido del ángulo de rotación del eje Θ , el ángulo de excentricidad ϕ y la velocidad angular Ω .
 - Para los casos en los que el tamaño de la fisura es $\alpha=0.1$, la influencia del ángulo de la excentricidad ϕ es mayor que la del ángulo de rotación del eje Θ y velocidad angular Ω , ya que para valores de ϕ igual o mayores a 90° la fisura permanecía cerrada (FIT = 0)

Del análisis del Área Fisurada abierta se han extraído las siguientes conclusiones:

- El valor del Área Fisurada abierta es mayor cuanto mayor es el tamaño de la fisura α .
- A medida que van aumentando el ángulo de excentricidad ϕ , el Área Fisurada abierta es menor.
- Un aumento del ángulo de rotación del eje Θ hace que el Área Fisurada abierta sea mayor.
- El valor del Área Fisurada abierta es mayor a velocidades angulares Ω mayores.

Como se puede ver, el efecto del tamaño de la fisura α , ángulo de rotación del eje Θ , ángulo de excentricidad ϕ y velocidad angular Ω , es el mismo para los valores del FIT que para el Área Fisurada abierta, por lo que se puede concluir que cuanto mayor es el Área Fisurada abierta, mayores son los valores del FIT para esa fisura, y por tanto, mayor es la probabilidad de que esa fisura se propague abriéndose más.

CAPÍTULO 7

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

A la hora de realizar el presupuesto del presente Proyecto se ha tenido en cuenta tanto el coste personal como el de equipos y aplicaciones informáticas.

A continuación, se detalla el tiempo dedicado en su realización en cada una de las tareas que se han efectuado de forma cronológica con el número de horas dedicado a cada una.

| Nombre de la tarea | Fecha de inicio | Fecha de finalización | Horas/día | Días |
|--|-----------------|-----------------------|-----------|------|
| 1. Propuesta | J 19/12/13 | J 19/12/13 | 0,5 | 1 |
| 2. Planificación | V 20/12/13 | V 20/12/13 | 2 | 1 |
| 3. Simulación con ABAQUS | J 26/12/13 | L 07/04/14 | | |
| 3.1 Lectura de Manuales | J 26/12/13 | V 27/12/13 | 4 | 2 |
| 3.2 Simulaciones para $\alpha = 0,1$ | X 15/01/14 | X 05/02/14 | 6 | 18 |
| 3.3 Simulaciones para $\alpha = 0,25$ | J 06/02/14 | J 27/02/14 | 7 | 20 |
| 3.4 Simulaciones para $\alpha = 0,5$ | D /02/03/14 | M 25/03/14 | 5 | 18 |
| 3.5 Obtención de datos de FIT y áreas | J 26/03/14 | L 07/04/14 | 2 | 8 |
| 4. Obtención de resultados con SOLID EDGE | X 09/04/14 | S 12/04/14 | | |
| 4.1 Cálculo de áreas | X 09/04/14 | S 12/04/14 | 3 | 3 |
| 5. Redacción de la memoria | D 13/04/14 | J 19/06/14 | | |
| 5.1 Realización de gráficas | D 13/04/14 | D 20/04/14 | 5 | 6 |
| 5.2 Capítulo 1 | L 21/04/14 | S 26/04/14 | 4 | 4 |
| 5.3 Capítulo 2 | D 27/04/14 | J 08/05/14 | 3 | 5 |

| | | | | |
|---|--------------|--------------|---|---|
| 5.4 Capítulo 3 | S 10/05/14 | V 16/05/14 | 3 | 3 |
| 5.5 Capítulo 4 | J 19/05/14 | S 24/05/14 | 4 | 5 |
| 5.6 Capítulo 5 | L 26/05/14 | J 29/05/14 | 4 | 3 |
| 5.7 Capítulo 6 | V 30/05/14 | D 08/06/14 | 2 | 5 |
| 5.8 Capítulo 7 | L 09/06/14 | X 11/06/14 | 3 | 1 |
| 5.9 Redacción de bibliografía e índices | J 12/06/2014 | S 14/06/2014 | 2 | 2 |
| 5.10 Maquetación final | D 15/06/14 | J 19/06/14 | 3 | 4 |

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1. - Autor: Guillermo Gómez Rubio

2.- Departamento: Ingeniería Mecánica

3.- Descripción del proyecto:

- Título: Estudio numérico del efecto de la excentricidad en el comportamiento de un eje fisurado
- Duración: 7 meses

Tasa de costes indirectos: 18%

4.- Presupuesto total del Proyecto: 22.646,54 €

5.- Desglose presupuestario:

PERSONAL

| Nombre y apellidos | Categoría | Coste mensual | Dedicación | C. Total |
|--|-------------|---------------|--------------|-------------|
| M ^a Lourdes Rubio Ruiz de Aguirre | Ing. Senior | 4.158,33 € | 0,6 meses | 2.494,99 € |
| Guillermo Gómez Rubio | Ing. Junior | 2.189,27 € | 6,5 meses | 14.230,25 € |
| | | | TOTAL | 16.725,25 € |

EQUIPOS Y APLICACIONES

| Descripción | Coste | Uso dedicado al proyecto | Dedicación | C. Imputable |
|--------------------|----------|--------------------------|------------|-------------------|
| Ordenador personal | 1.250 € | 70% | 7 meses | 102,83 € |
| Programa ABAQUS | 34.125 € | 100% | 4 meses | 2.275 € |
| Programa M. Office | 120 € | 100% | 3 meses | 6 € |
| Programa S.EDGE | 6.500 € | 100% | 1 mes | 108,33 € |
| TOTAL | | | | 2.492,16 € |

$$Amortización = \frac{Meses\ dedicación}{60\ meses\ de\ depreciación} \times Coste \times \% \text{ de dedicación}$$

6.- Resumen de costes

| | |
|-------------------------|--------------------|
| Personal | 16.725,25 € |
| Amortización de equipos | 2.492,16 € |
| Costes indirectos | 3.459,13 € |
| TOTAL | 22.676,54 € |

Se ha estimado que la tutora del Proyecto ha dedicado 0.6 meses para la supervisión del Proyecto realizado por el autor y el cual ha dedicado 6.5 meses para su realización.

Para ello se ha necesitado de un ordenador personal, con un coste estimado de 1.250€ y los programas ABAQUS, SOLID EDGE y MICROSOFT OFFICE, cuyas licencias cuestan las cantidades desglosadas en el presupuesto.

Teniendo en cuenta todos los puntos citados, el presupuesto de este Proyecto es de 22.676,54 euros.

BIBLIOGRAFÍA

- Abaqus/CAE *User's Manual* (version 6.12)
http://www.tu-chemnitz.de/projekt/abq_hilfe/docs/v6.12/books/usb/default.htm
- Abaqus/CAE *Analysis User's Manual* (version 6.12)
http://www.tu-chemnitz.de/projekt/abq_hilfe/docs/v6.12/books/usb/default.htm
- Abaqus/CAE *Scripting User's Manual* (version 6.12)
http://www.tu-chemnitz.de/projekt/abq_hilfe/docs/v6.12/books/cmd/default.htm
- Griffith A. A., *The phenomena of rupture and flow in solids*, Trans. R. Soc. (Lond.), Vol. A 221, pp. 163, 1920.
- Irwin G.R. *Analysis of Stresses and Strains near the end of a crack traversing a plate*, Journal of Appl. Mechanics, 1957
- Irwin G.R. : *Plastic zone near a crack and fracture toughness*, Materials Conference in Syracuse University, 1960
- Paris P. C., *The growth of fatigue cracks due to variations in load*, Ph. D. Tesis, Leigh University, 1962.
- Rubio Herrero Patricia, *Factor de Intensidad de Tensiones en fisuras elípticas con mecanismo de apertura y cierre en ejes giratorios*, Ph. D. Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2014
- Anderson T.L., *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. Texas A&M University: CRC Press, 1994. 688. ISBN: 0-8493-4260-0
- Muñoz-Abella B., Rubio L., Rubio P., *Study of the Stress Intensity Factor of an unbalanced rotating cracked shaft*
- Rubio L., Muñoz-Abella B., Rubio P., Montero L., *Influence of the eccentricity in the crack breathing in a rotating shaft*. Proc. 8th Int. Conf. Eng. Comp. Tech.ECT. Croatia, 2012.

