

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio mediante elementos finitos del contacto
cruzado entre hilos de acero

Autor: Ander Tena Sánchez

Tutor: Jesús Vázquez Valeo

Dep. Ingeniería Mecánica y de Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio mediante elementos finitos del contacto cruzado entre hilos de acero

Autor:

Ander Tena Sánchez

Tutor:

Jesús Vázquez Valeo

Profesor contratado doctor

Dep. de Ingeniería Mecánica y de Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Estudio mediante elementos finitos del contacto cruzado entre hilos de acero

Autor: Ander Tena Sánchez

Tutor: Jesús Vázquez Valeo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, le doy las gracias al profesorado de la escuela y en especial a Jesús Vázquez Valeo, mi tutor, por su tiempo y dedicación.

Agradecer a mi familia por todo el apoyo y ánimo que me han dado, sin los cuáles no habría llegado al punto de mi carrera en el que me encuentro ahora.

Ander Tena Sánchez

Estudiante de Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Sevilla, 2017

Resumen

El objetivo del presente trabajo, es el desarrollo de un modelo 3D en ANSYS, creando un código en lenguaje APDL (ANSYS Parametric Design Language) parametrizable, para simular el contacto producido entre dos hilos metálicos cruzados en un cierto ángulo, y observar el impacto que tienen sobre las tensiones generadas las diferentes configuraciones de cargas externas como dimensiones de los cables.

Índice general

Agradecimientos	IX
Resumen	XI
1. Introducción, motivación y objetivos	5
1.1. Objetivos del trabajo	7
1.2. Estructura del trabajo	7
1.2.1. Capítulo 2: Conceptos teóricos básicos	7
1.2.2. Capítulo 3: Desarrollo de un modelo 3D para simular el contacto entre dos hilos cruzados	7
1.2.3. Capítulo 4: Simulaciones	7
1.2.4. Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras	8
2. Conceptos teóricos básicos de los contactos entre sólidos elásticos	9
2.1. Conceptos básicos	9
2.2. Mecánica del contacto	9
2.3. Contacto entre dos sólidos elásticos cualesquiera	11
2.4. Contacto entre dos cilindros cruzados a 90°	12
2.5. Método de los elementos finitos	14
3. Desarrollo del modelo	17
3.1. Metodología	17
3.2. Parámetros iniciales	19
3.3. Creación de los cables	20
3.4. Aplicación de las restricciones de movimiento y fuerzas	26
3.5. Creación del contacto	32
4. Simulaciones y resultados	33
4.1. Obtención de las soluciones teóricas	34
4.2. Diferentes simulaciones realizadas	37
4.2.1. Modelo con fuerza normal a 90° sin fricción	37
4.2.2. Modelo con fuerza normal a 60° sin fricción	41
4.2.3. Modelo con fuerza normal a 90° con fricción	45
4.2.4. Modelo con fuerza normal a 60° con fricción	50
4.2.5. Modelo con cables de diferentes diámetros a 90° sometidos a fuerza normal	55

4.2.6.	Modelo con cables de diferentes diámetros a 60° sometidos a fuerza normal	59
4.2.7.	Modelo con fuerza normal y tensión axial en uno de los cables a 90°	63
4.2.8.	Modelo con fuerza normal y tensión axial en uno de los cables a 60°	67
4.2.9.	Modelo a 90° con una fuerza normal inferior	70
5.	Conclusiones y líneas futuras	73
5.1.	Conclusiones generales	73
5.1.1.	Efecto del ángulo de cruce	73
5.1.2.	Efecto de la presencia de fricción	74
5.1.3.	Efecto de la diferencia de diámetros entre los 2 sólidos	74
5.1.4.	Efecto de la tracción en uno de los cables	75
5.1.5.	Efecto de la fuerza normal aplicada	75
5.2.	Líneas futuras	76
A.	Anexo A: Código APDL	77
	Bibliografía	85

Índice de figuras

1.1. Cable de acero trefilado	5
1.2. Modelo del cable	6
2.1. Contacto conforme	10
2.2. Contacto no conforme	10
2.3. Método cilindros cruzados a 90°	13
3.1. Diagrama de flujo	18
3.2. Cable inicial	21
3.3. Cable modificado	22
3.4. Líneas cable	23
3.5. Líneas zona de contacto	23
3.6. Cable mallado	24
3.7. Malla de las cercanías a la zona de contacto	25
3.8. Malla de la zona de contacto	25
3.9. Malla en el punto de contacto	26
3.10. Fuerzas y restricciones de desplazamiento del modelo inicial	27
3.11. Líneas sobre la que se ha añadido restricción de desplazamiento	28
3.12. Disposición de fuerzas final	28
3.13. Áreas en las que se ha aplicado restricciones de desplazamiento horizontales	29
3.14. Puntos en los que se aplica la restricción de movimiento en dirección vertical	29
3.15. Líneas en las que se aplican las restricciones de desplazamiento horizontales	30
3.16. Fuerzas y restricciones de desplazamiento	31
4.1. Fuerzas externas en el modelo	38
4.2. Tensión normal obtenida en la simulación	39
4.3. Tensiones normales	40
4.4. Tensiones tangenciales	41
4.5. Modelo utilizado para la simulación	42
4.6. Tensión normal obtenida en la simulación	43
4.7. Tensiones normales	44
4.8. Tensiones tangenciales	45
4.9. Modelo utilizado para la simulación	46
4.10. Tensión normal obtenida en la simulación	47

4.11. Tensiones normales	48
4.12. Tensiones tangenciales	49
4.13. Tensiones debidas a la fricción	49
4.14. Estado del contacto	50
4.15. Modelo utilizado para la simulación	51
4.16. Tensión normal obtenida en la simulación	52
4.17. Tensiones normales	53
4.18. Tensiones tangenciales	54
4.19. Tensiones debidas a la fricción	54
4.20. Estado del contacto	55
4.21. Modelo con cables de diferentes diámetros a 90°	56
4.22. Tensión normal obtenida en la simulación	57
4.23. Tensiones normales	58
4.24. Tensiones tangenciales	59
4.25. Modelo con cables de diferentes diámetros a 60°	60
4.26. Tensión normal obtenida en la simulación	61
4.27. Tensiones normales	62
4.28. Tensiones tangenciales	63
4.29. Modelo simulado	64
4.30. Tensión normal obtenida en la simulación	65
4.31. Tensiones normales	66
4.32. Tensiones tangenciales	67
4.33. Modelo simulado	67
4.34. Tensión normal obtenida en la simulación	69
4.35. Tensiones normales	70
4.36. Tensiones tangenciales	70
4.37. Tensión normal obtenida en la simulación	71

Índice de tablas

2.1. Tabla para el cálculo de α y β	12
2.2. Tabla para obtener α y β	14
4.1. Tabla para el cálculo de α y β	36
4.2. Dimensiones de los cables	38
4.3. Parámetros de la simulación	38
4.4. Comparación de los resultados de la simulación con los teóricos . . .	39
4.5. Dimensiones de los cables	42
4.6. Parámetros de la simulación	42
4.7. Comparación de resultados	43
4.8. Dimensiones de los cables	46
4.9. Parámetros de la simulación	46
4.10. Comparación de resultados	48
4.11. Dimensiones de los cables	51
4.12. Parámetros de la simulación	51
4.13. Comparación de resultados	53
4.14. Dimensiones de los cables	56
4.15. Parámetros de la simulación	57
4.16. Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos . .	58
4.17. Dimensiones de los cables	60
4.18. Parámetros de la simulación	60
4.19. Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos . .	62
4.20. Dimensiones de los cables	64
4.21. Parámetros de la simulación	64
4.22. Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos . .	66
4.23. Dimensiones de los cables	68
4.24. Parámetros de la simulación	68
4.25. Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos . .	69

1. Introducción, motivación y objetivos

Actualmente es bastante frecuente encontrar cables metálicos en equipos mecánicos o construcciones civiles tales como grúas, ascensores, puentes plataformas petrolíferas, etc. Por esta razón resulta interesante realizar un análisis de las interacciones que sufren dichos cables en su interior.

Los cables de acero trefilado, están formados por diferentes cordones que a su vez están formados por hilos o alambres, como se puede observar en la figura 1.1. El cable está formado por un cordón central, llamado alma, y por una serie de cordones exteriores que rodean al alma. Con esta configuración de los cables, es inevitable que se produzca el contacto entre los diferentes hilos que lo forman.

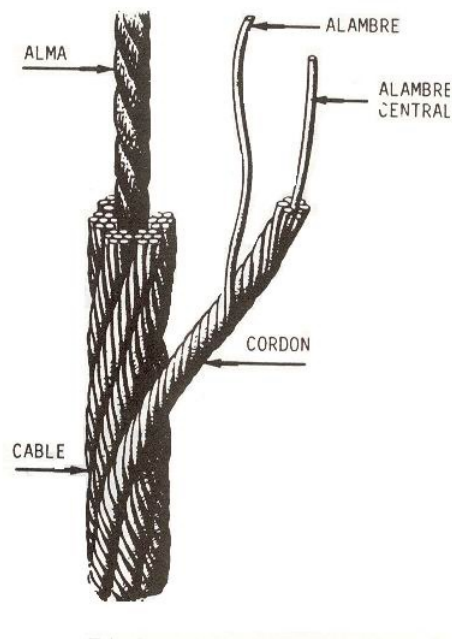


Figura 1.1.: Cable de acero trefilado

Como se puede intuir, se producen diferentes contactos entre los hilos, siendo el objeto de estudio de este trabajo el contacto entre dos hilos con cierto ángulo de cruce, como se muestra en la figura 1.2. Se analizarán las tensiones generadas en el contacto entre los hilos, para diferentes configuraciones, variando el ángulo de cruce, las cargas a las que están sometidos y las dimensiones de los hilos.

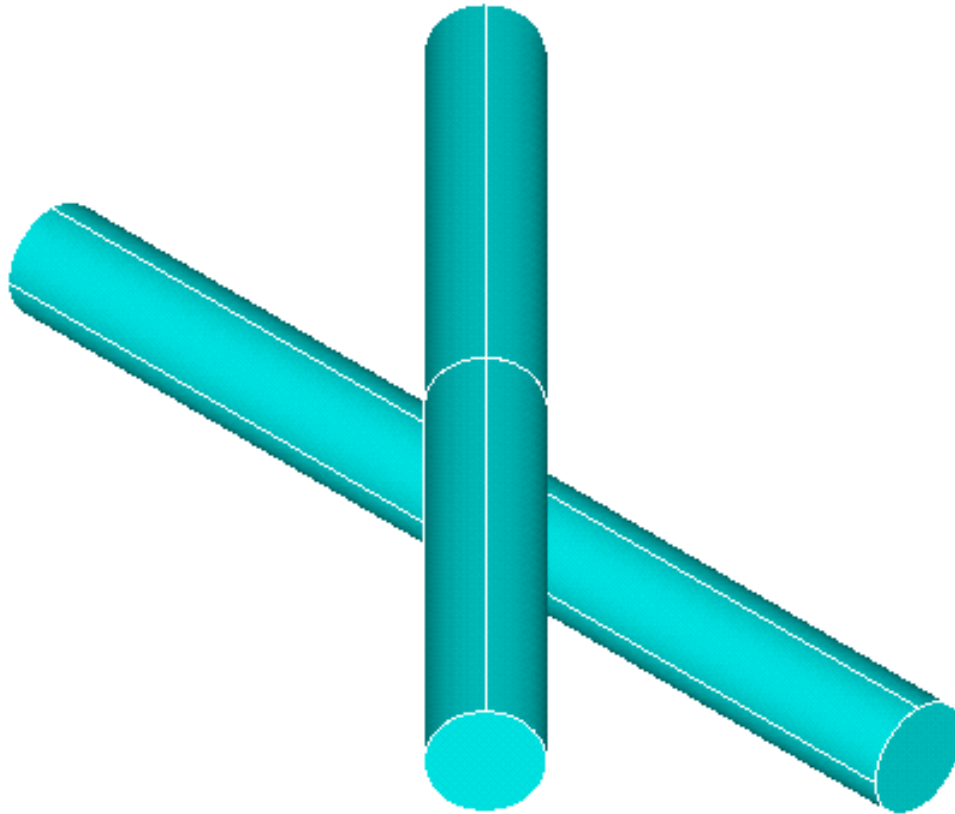


Figura 1.2.: Modelo del cable

Para ello, se ha desarrollado un modelo 3D para realizar las diferentes simulaciones. El modelo se ha desarrollado en el software ANSYS mechanical APDL 15.0, para su posterior simulación en el mismo programa.

1.1. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo, es el análisis de las tensiones generadas en el contacto entre dos hilos de acero, a los que se aplican diferentes cargas exteriores. Para lograr este objetivo, se han definido los siguientes objetivos:

- **Objetivo 1:** Desarrollo de un modelo 3D, parametrizado, que permita la variación de las dimensiones de los cables, así como las cargas exteriores que actúan sobre ellos.
- **Objetivo 2:** Realización de diferentes simulaciones, con condiciones diferentes para poder obtener resultados para los diferentes casos para su posterior análisis.
- **Objetivo 3:** Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones.

1.2. Estructura del trabajo

El documento se ha dividido en los siguientes capítulos.

1.2.1. Capítulo 2: Conceptos teóricos básicos

Este capítulo presenta la teoría utilizada para el desarrollo del trabajo, que será necesaria para la correcta comprensión de éste. Se presentarán métodos concretos utilizados en el trabajo para la obtención de resultados teóricos, necesarios para la comparación con los resultados obtenidos en las simulaciones.

1.2.2. Capítulo 3: Desarrollo de un modelo 3D para simular el contacto entre dos hilos cruzados

En este capítulo se explicará el proceso seguido para el desarrollo del modelo utilizado en las simulaciones, presentando la metodología seguida para la obtención de un modelo aceptable, cuyos resultados tras la simulación permitan realizar un correcto análisis de los resultados.

1.2.3. Capítulo 4: Simulaciones

En este capítulo se presentan las diferentes simulaciones realizadas, con sus correspondientes resultados. Se explicarán los resultados obtenidos para cada uno de los casos realizando comparativas entre los diferentes casos, además de con los resultados teóricos obtenidos a partir de la teoría explicada en el capítulo 2.

1.2.4. Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

Una vez realizadas las diferentes simulaciones con su correspondiente análisis de los resultados obtenidos, se resumirán las conclusiones generales a las que se ha llegado. Además, se describen las recomendaciones para las líneas futuras de la investigación.

2. Conceptos teóricos básicos de los contactos entre sólidos elásticos

En este capítulo, se va a explicar resumidamente la teoría necesaria para la correcta comprensión de este trabajo.

2.1. Conceptos básicos

A continuación se definirán algunos términos que serán necesarios para comprender el trabajo.

- **Tension:** Fuerzas internas que se producen en un sólido deformable, debido a las fuerzas externas que actúan sobre el sólido Ref. [4].
- **Tensiones normales:** Las tensiones normales son aquellas tensiones que se producen en la dirección perpendicular al plano de referencia Ref [4].
- **Tensiones tangenciales:** Son aquellas tensiones cuya dirección es tangente al plano de referencia ref [4].
- **Malla:** En cuanto a los programas de elementos finitos se refiere, el mallado será la discretización realizada del volumen real a simular, es decir, la división en elementos de el sólido que se va a simular.

2.2. Mecánica del contacto

La mecánica del contacto estudia la deformación que se produce en el contacto de dos sólidos elásticos en contacto [3]. Dependiendo de la geometría de las superficies de los sólidos en contacto, se clasifican en dos tipos de contactos:

- **Contacto conforme:** El tamaño de la superficie de contacto no depende de las cargas aplicadas, como por ejemplo el caso en el que 2 superficies planas están en contacto, independientemente de las cargas que se apliquen la superficie de contacto será la misma. En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de un contacto conforme.
- **Contacto no conforme:** En este caso ocurre al contrario que en el caso de contacto conforme, la superficie de contacto obtenida dependerá de las cargas

aplicadas. Un ejemplo de este caso es en el que dos cilindros están en contacto, que es el caso que se estudiará en este trabajo. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de contacto no conforme.

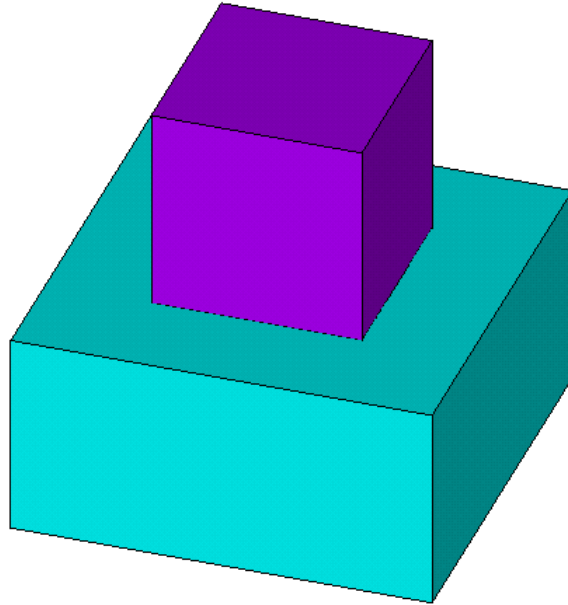


Figura 2.1.: Contacto conforme

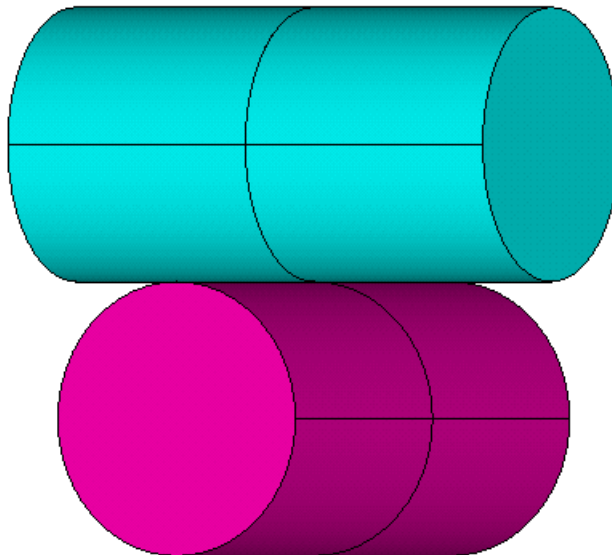


Figura 2.2.: Contacto no conforme

2.3. Contacto entre dos sólidos elásticos cualesquiera

Las ecuaciones para obtener la tensión máxima y la forma de la superficie de contacto entre dos sólidos, está basada en la teoría de Hertz [2].

En este capítulo se mostrará el caso del contacto de dos sólidos elásticos [5]. Estas ecuaciones sirven para cualquier contacto entre sólidos geoméricamente regulares, exceptuando cilindros en paralelo. En este tipo de contacto, la superficie de contacto obtenida será circular o elíptica, por lo tanto estará definida mediante las longitudes de los semiejes de la elipse, que cuando sean del mismo valor se tratará de un círculo.

En primer lugar, se debe calcular el coeficiente C_E (ec. 4.1), donde E_1 y E_2 son los módulos de Young y ν_1 y ν_2 son los coeficientes de Poisson de los materiales del sólido 1 y sólido 2 respectivamente.

$$C_E = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.1)$$

El siguiente paso es el cálculo de K_D (ec. 4.2), siendo R_1, R'_1, R_2 y R'_2 los radios de curvatura que definen la superficie de los sólidos alrededor del punto de contacto.

$$K_D = \frac{1,5}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2}} \quad (2.2)$$

A continuación se debe calcular $\cos(\theta)$ (ec. 4.3), donde ϕ es el ángulo formado entre los planos que contienen la curvatura que definen R_1 y R_2 , para luego obtener los valores de α y β mediante interpolación a partir de la tabla 4.1.

$$\cos(\theta) = \frac{K_D}{1,5} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1}\right)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2}\right)\cos(2\phi)} \quad (2.3)$$

$\cos \theta$	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.75
α	1.000	1.070	1.150	1.242	1.351	1.486	1.661	1.905	2.072
β	1.000	0.936	0.878	0.822	0.769	0.717	0.664	0.608	0.578
$\cos \theta$	0.80	0.85	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	
α	2.292	2.600	3.093	3.396	3.824	4.508	5.937	7.774	
β	0.544	0.507	0.461	0.438	0.412	0.378	0.328	0.287	

Tabla 2.1.: Tabla para el cálculo de α y β

Una vez obtenidos α y β , ya se pueden calcular los valores de el semieje mayor (ec. 2.4), semieje menor (ec. 4.6) y tensión máxima (ec. 2.6), siendo P la fuerza normal aplicada.

$$c = \alpha \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (2.4)$$

$$d = \beta \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1,5P}{\pi cd} \quad (2.6)$$

La descripción detallada de este, el del siguiente apartado y otros tipos de contacto se pueden encontrar en el libro de Young y Budynas [5].

2.4. Contacto entre dos cilindros cruzados a 90°

Estas ecuaciones son válidas para el contacto entre dos cilindros, de diámetros cualesquiera, cruzados en un ángulo de 90° y siendo aplicada una fuerza normal P , como se muestra en la figura 2.3.

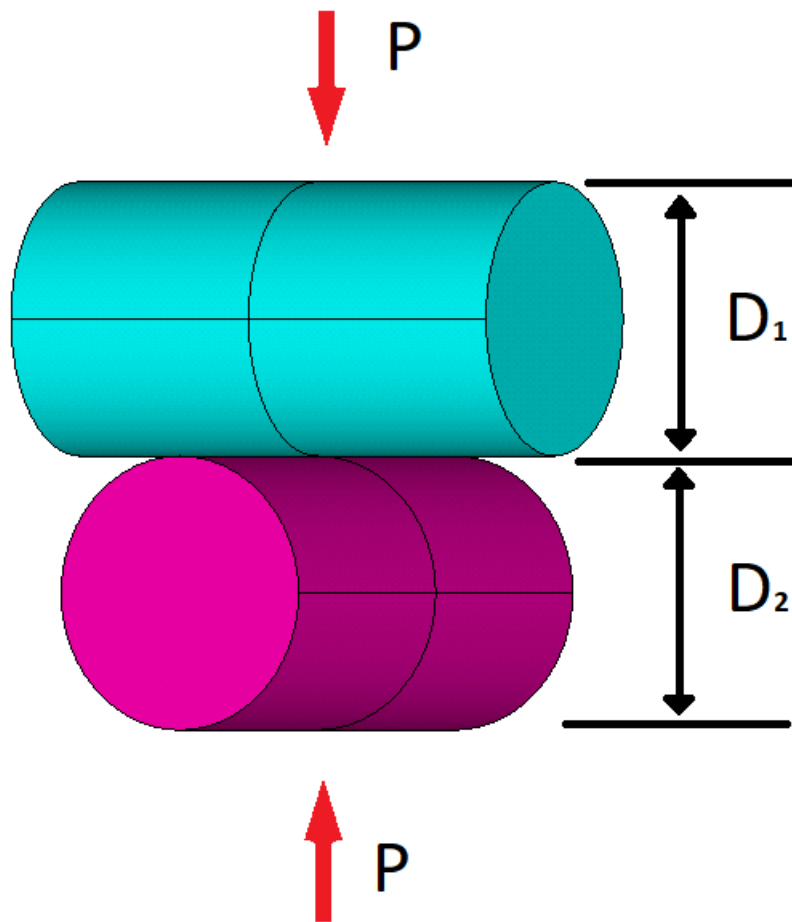


Figura 2.3.: Método cilindros cruzados a 90°

El método es similar al del apartado anterior, con ligeras diferencias. En primer lugar se obtiene el valor de C_E (ec. 4.1) del mismo modo que en el caso anterior. A continuación, al igual que ocurría en el apartado anterior se calcula K_D (ec. 4.8), siendo D_1 y D_2 los diámetros de los cilindros.

$$K_D = \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2} \quad (2.7)$$

En este caso, el ángulo de cruce no es variable y por lo tanto no es necesario calcular $\cos \theta$, por lo que para obtener los valores de α y β se deberá interpolar a partir de la tabla 2.2, en función de la relación entre los diámetros de los cables.

D_1/D_2	1	1.5	2	3	4	6	10
α	0.908	1.045	1.158	1.350	1.505	1.767	2.175
β	0.908	0.799	0.732	0.651	0.602	0.544	0.481

Tabla 2.2.: Tabla para obtener α y β

A partir de aquí, el método es análogo al anterior para obtener los valores de los semiejes (ecs. 2.8 y 2.9), y a partir de éstos el valor de la tensión máxima (ec. 2.10).

$$c = \alpha \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (2.8)$$

$$d = \beta \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (2.9)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1,5P}{\pi cd} \quad (2.10)$$

2.5. Método de los elementos finitos

Para la resolución de problemas de sólidos deformables, cuya formulación y geometría no permiten una solución analítica, se recurre a los métodos numéricos. Los métodos numéricos permiten obtener una solución aproximada a problemas cuya solución analítica o no existe o es excesivamente compleja. Uno de los más utilizados es el método de los elementos finitos (MEF), detallado en [4].

En el MEF, se realiza una discretización del problema a estudiar, pudiendo obtener de este modo una solución discreta aproximada. De este modo se obtienen diferentes elementos, sobre el que se realiza un cálculo para obtener una solución global al unificar los cálculos sobre cada elemento.

Utilizando este método se pueden introducir dos tipos de errores, unos debidos a la discretización del problema y el otro debido a la resolución de las ecuaciones. Para evitar en la medida de lo posible errores de discretización, lo ideal sería crear la mayor cantidad de elementos posible, pero esto entra en conflicto con el coste computacional que requeriría el problema a resolver. Por lo tanto, habrá que crear el modelo mediante con el mayor número de elementos posible en las zonas a estudiar, para introducir los menores errores de discretización posibles.

Los pasos que se siguen para la resolución de problemas por elementos finitos es el siguiente:

1. Realizar la discretización, es decir, obtener los elementos que sustituirán el medio continuo.
2. Introducción de un número finito de grados de libertad al dominio.
3. Cálculo de las matrices elementales, que dependerán de las propiedades del material y de las coordenadas de los elementos.
4. Se ensambla la matriz global a partir de las matrices elementales.
5. Se calculan las cargas, que dependen de las cargas externas, y se realizan por elementos.
6. Aplicación de las condiciones de contorno.
7. Obtención de los desplazamientos y reacciones.
8. Una vez conocidos los desplazamientos se calculan las deformaciones y las tensiones.

Para la realización de estos pasos existen los softwares de elementos finitos, que permiten obtener una solución numérica del problema.

3. Desarrollo del modelo

En este capítulo del TFG, se explica el desarrollo del modelo en 3D para la simulación del contacto entre cables.

Como bien se ha explicado anteriormente, el objetivo de este proyecto es el desarrollo de un modelo para simular el contacto entre hilos de acero, que se ha realizado utilizando el programa ANSYS mechanical APDL 15.0. El modelo será parametrizable, por lo que será posible variar las dimensiones del modelo, así como las cargas aplicadas, para poder simular bajo las condiciones deseadas. El modelo parametrizable se realizará ejecutando un archivo .Mac desarrollado, en el que se varían las variables de entrada al inicio del código para obtener el modelo deseado, pudiendo variar dimensiones de los cables, el ángulo de cruce entre estos y las fuerzas que actúan sobre ellos. Además se introducirán las propiedades del material del que deben ser los cables, en nuestro caso de acero aleado.

En primer lugar, se se va a explicar la metodología llevada a cabo para lograr este primer objetivo. A continuación, se explicarán en detalle los pasos seguidos para la creación de los cables, aplicación de las fuerzas y restricciones de movimiento y finalmente la creación del contacto.

3.1. Metodología

Lo primero que se ha planteado para la realización del modelo, es la metodología a seguir para el diseño del modelo, que se muestra en la figura 3.1. El modelo se ha desarrollado mediante comandos en ANSYS, por lo que no se ha utilizado la interfaz de ANSYS, excepto para la creación del contacto, ya que debido a la complejidad de la creación resulta más cómodo hacerlo utilizando la interfaz. Éste diagrama muestra a grandes rasgos el método seguido, si bien algunos pasos son de mayor complejidad y podrían requerir de pasos adicionales.

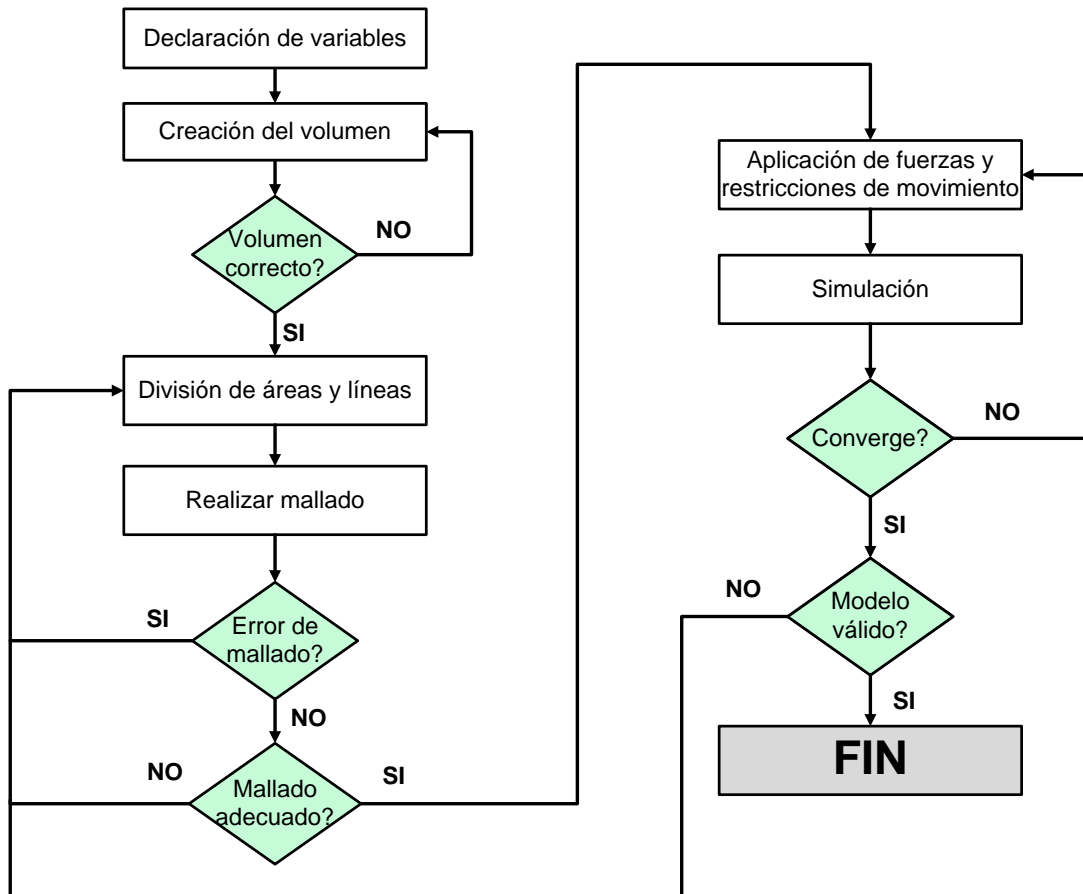


Figura 3.1.: Diagrama de flujo

En primer lugar, se deben introducir las variables que determinarán los parámetros del modelo, que serán utilizadas para la creación de los volúmenes con las dimensiones correctas y en las orientaciones especificadas. Una vez creado el volumen, se comprueba que es correcto, para proceder a desarrollar la siguiente parte del código. En caso de que el volumen creado no fuera el correcto se volvería a la creación del volumen para subsanar el error, y poder continuar.

El siguiente paso, será dividir las áreas y líneas que forman el volumen para proceder a realizar el mallado de los cables. En este paso, hay dos posibilidades que provocarían volver a modificar el código para dividir áreas y líneas. El primero, es que se produzca un error de mallado y con las divisiones realizadas no sea posible realizar el mallado y por lo tanto habría que modificar el código. El segundo, es que el mallado obtenido no sea el deseado, bien porque las dimensiones de los elementos no sea el deseado, pudiendo ocasionar un mal resultado o tener un coste computacional excesivo, o que las zonas con malla mas fina estén ubicadas en zonas no deseadas. Una vez obtenido el mallado deseado, pasamos al siguiente paso.

A continuación, se deben aplicar las fuerzas externas y restricciones de movimiento necesarias para la simulación del problema. En este caso, una vez definidas se procede a la creación del contacto para finalmente simular el modelo. Una vez realizada la simulación, pueden ocurrir diferentes cosas, una de ellas es que se produzca un error porque el solver seleccionado no pueda resolver el modelo y por lo tanto aborta la simulación, debiendo cambiar el solver seleccionado. Durante la simulación, al tratarse de un contacto, aparece una solución no lineal, de modo que se deberá realizar un proceso iterativo hasta que la solución converja, siendo la convergencia otro posible error. Si la solución no converge, habrá que aumentar el número máximo de iteraciones para la solución de un problema, o bien disminuir la precisión del modelo, mediante el mallado. El último caso es que el programa sí de una solución, pero esta no es la adecuada, por lo tanto se habrá cometido un error en la aplicación de las fuerzas o restricciones. Para saber si la solución es correcta, se comparará con los resultados obtenidos de forma teórica explicada anteriormente en el capítulo anterior. Si la solución es aceptable, entonces el modelo es aceptable y los resultados obtenidos son válidos para el análisis.

3.2. Parámetros iniciales

El primer paso, es introducir los valores deseados para definir las dimensiones de los cables, propiedades del material del que están formados y las fuerzas que deberán ser aplicadas. A partir de éstos parámetros iniciales se creará el modelo en función de éstos, obteniendo el modelo deseado.

El código utilizado para la definición de los parámetros es el siguiente:

```
E=210e3 (Módulo de Young)
POISSON=0.3 (Coeficiente de Poisson)
DENSIDAD=0.00785 (Densidad del material)
L=10 (Longitud de los cables)
DIAM1=1 (Diametro del cable de abajo)
DIAM2=1 (Diametro del cable de arriba)
PI=acos(-1) (Obtención del valor del número PI)
ANGULO_CRUCE=PI/2 (Ángulo con el que se cruzan los cables)
FUERZA=1 (Fuerza aplicada en N)
AXIL_CABLE_ABAJO=0 (Tensión axil cable de abajo)
AXIL_CABLE_ARRIBA=10 (Tensión axil cable de arriba)
NIVEL_REFINADO_PUNTO=5 (Nivel de refinado en el punto de contacto 1-5)
```

Además, se realizarán los cálculos teóricos para conocer el tamaño que tendrá el contacto, para poder realizar una zona de contacto en el modelo ligeramente mayor, de este modo se minimiza el coste computacional además de tener un mayor control sobre el mallado en esta zona, que será la más importante del modelo.

Las operaciones para calcular el contacto son las siguientes:

```

CE=(2*(1-POISSON**2))/E
KD=1.5/(1/(DIAM1/2)+1/(DIAM2/2))
COSTETA=(KD/1.5)*(((1/(DIAM1/2))**2)+((1/(DIAM2/2))**2)+2*(1/(DIAM1/2))...
...*(1/(DIAM2/2))*cos(2*ANGULO_CRUCE))**(1/2)) *DIM,ALF, TABLE,17
*DIM,BET, TABLE,17
ALF(1)=1,1.070,1.150,1.242,1.351,1.486,1.661,1.905,2.072,2.292,2.600,3.093,...
...3.396,3.824,4.508,5.937,7.774
ALF(1,0)=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.92,...
...0.94,0.96,0.98,0.99
BET(1)=1,0.936,0.878,0.822,0.769,0.717,0.664,0.608,0.578,0.544,0.507,0.461,...
...0.438,0.412,0.378,0.328,0.287
BET(1,0)=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.92,...
...0.94,0.96,0.98,0.99
ALFA=ALF(COSTETA)
BETA=BET(COSTETA)
SEMIEJE_MAYOR=ALFA*((FUERZA*KD*CE)**(1/3)) (Longitud del semieje mayor en mm)
SEMIEJE_MENOR=BETA*((FUERZA*KD*CE)**(1/3)) (Longitud del semieje menor en mm)
TENSION_MAX=(1.5*FUERZA)/(PI*SEMIEJE_MAYOR*SEMIEJE_MENOR) (Tensión máxima)
AREA=1.5 (Coeficiente utilizado para mayorar la zona de contacto)

```

Cabe destacar que se ha utilizado una matriz de interpolación para obtener los valores de α y β , que son necesarios para calcular las longitudes del semieje mayor y menor, así como la tensión máxima del contacto, siguiendo el procedimiento explicado en el capítulo anterior.

3.3. Creación de los cables

En primer lugar, se ha creado el volúmen de cada cable. Para cada cable se debe crear un área circular, que representa la sección del cable, con la orientación adecuada dependiendo del ángulo de cruce especificado, para posteriormente extruir dicha área para obtener el volúmen. Al crear de esta forma el volúmen, su superficie está formada por 10 áreas, como se muestra en la figura 3.2. De este modo, se podría mallar el volúmen, pero el mallado obtenido no estaría controlado, por lo tanto se procede a dividir las áreas y las líneas que forman el volúmen, utilizando las dimensiones de la superficie de contacto previamente calculada, para obtener las áreas deseadas y poder mallar la zona de contacto con mayor precisión. Una vez realizadas las divisiones, la superficie del cable estará formada por 18 áreas, como se puede observar en la figura 3.3.

Se han utilizado los siguientes comandos [1] para realizar las operaciones para crear el volúmen:

```

!Extrusión
VDRAG

!Unificar volúmenes

```

VADD

```
!Corte de áreas mediante líneas  
ASBL
```

```
!Corte de áreas mediante áreas  
ASBA
```

```
!Corte de líneas mediante áreas  
LSBA
```

Los comandos anteriores se han utilizado de forma repetitiva hasta llegar a conseguir una división de las áreas y líneas que permita controlar el mallado de la zona de contacto. Para ello, se han creado áreas y líneas utilizadas para realizar las operaciones sobre el volumen original. Los comando para la creación de áreas y líneas no se han especificado.

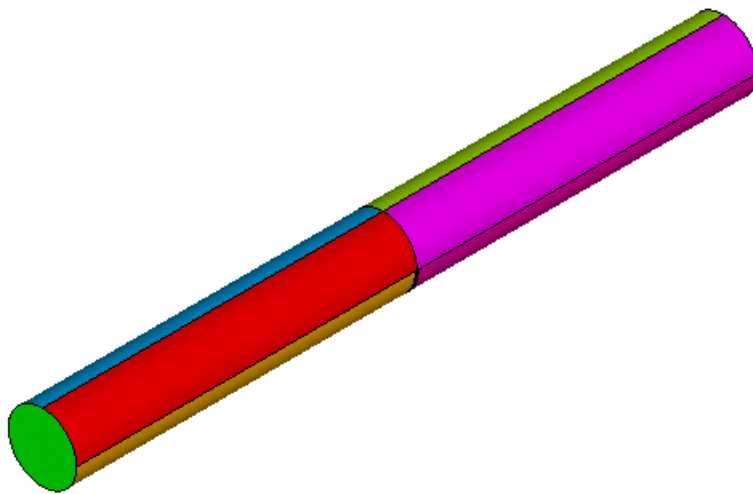


Figura 3.2.: Cable inicial

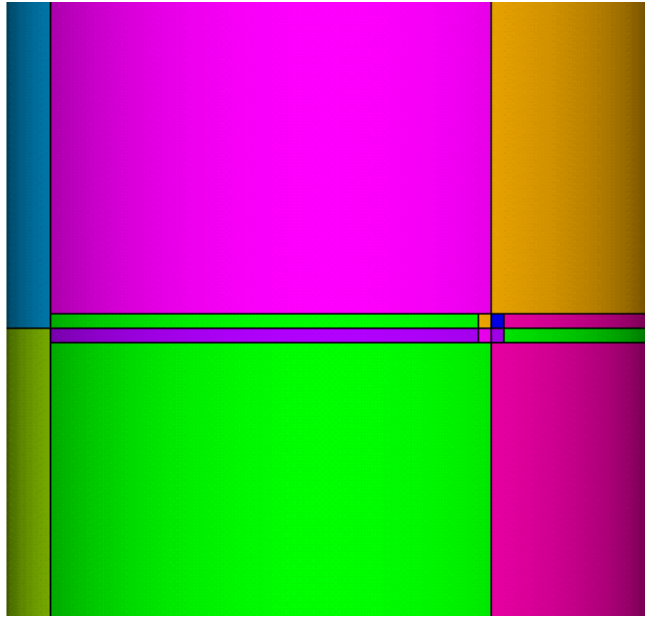


Figura 3.3.: Cable modificado

Una vez creados los volúmenes de los cables, con las divisiones de áreas y líneas deseadas, se procede a mallar el volumen. Para ello se dimensionan las líneas para obtener el tamaño de elementos adecuado para obtener un buen resultado con un coste computacional razonable. Por lo tanto, se dividirá en tamaños muy pequeños en la zona de contacto, mientras que según nos alejamos de ésta, las divisiones son mayores. Para la partición de las líneas se ha utilizado el comando LESIZE, con el que controlamos el tamaño de los elementos que se forman, pudiendo especificar que el tamaño de los elementos vaya aumentando o disminuyendo de forma gradual a lo largo de una línea, lo cual es muy útil para conseguir un mallado adecuado en las zonas deseadas aumentando lo mínimo posible el coste computacional.

En la figura 3.4, se muestra el dimensionado de las líneas después de realizar la división de éstas, mientras que en la figura 3.5, se muestra la división de las líneas en la zona de contacto, que es muchísimo menor que los tamaños de el resto de las líneas.

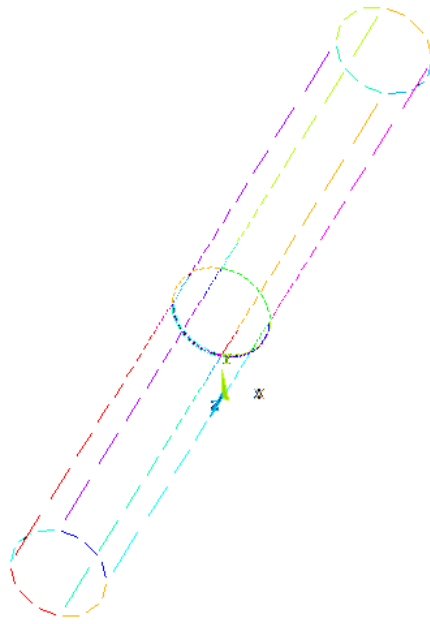


Figura 3.4.: Líneas cable

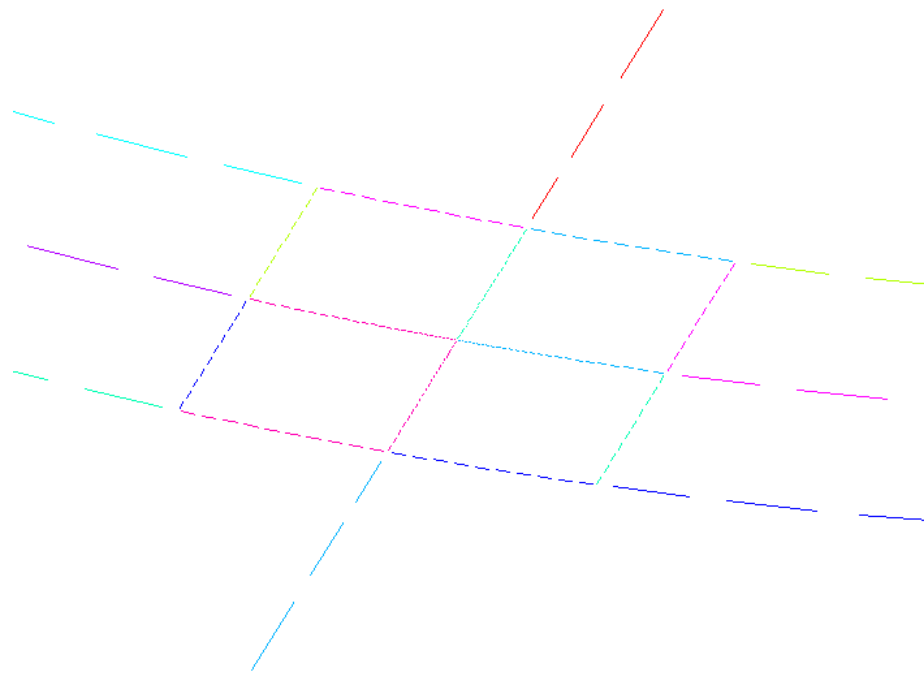


Figura 3.5.: Líneas zona de contacto

Además, se realizará un refinamiento de la malla alrededor del punto en el que se produce el contacto, para obtener una mayor precisión en los resultados. Finalmente el mallado de los cables queda como se muestra en las figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9.

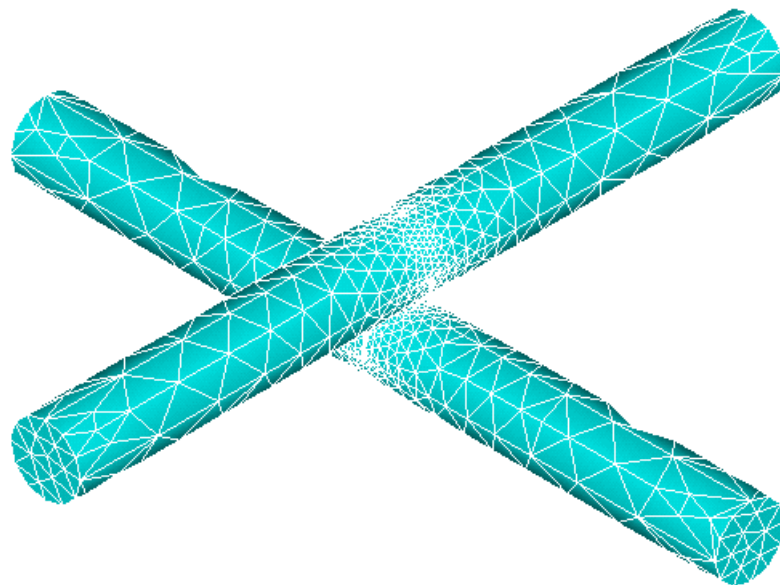


Figura 3.6.: Cable mallado

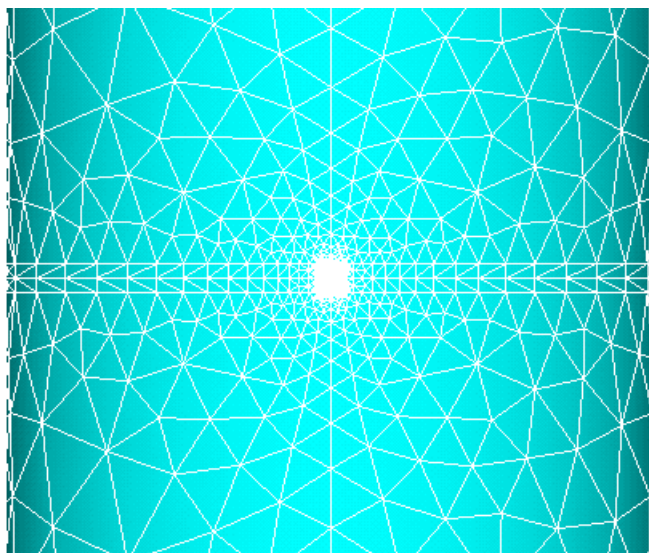


Figura 3.7.: Malla de las cercanías a la zona de contacto

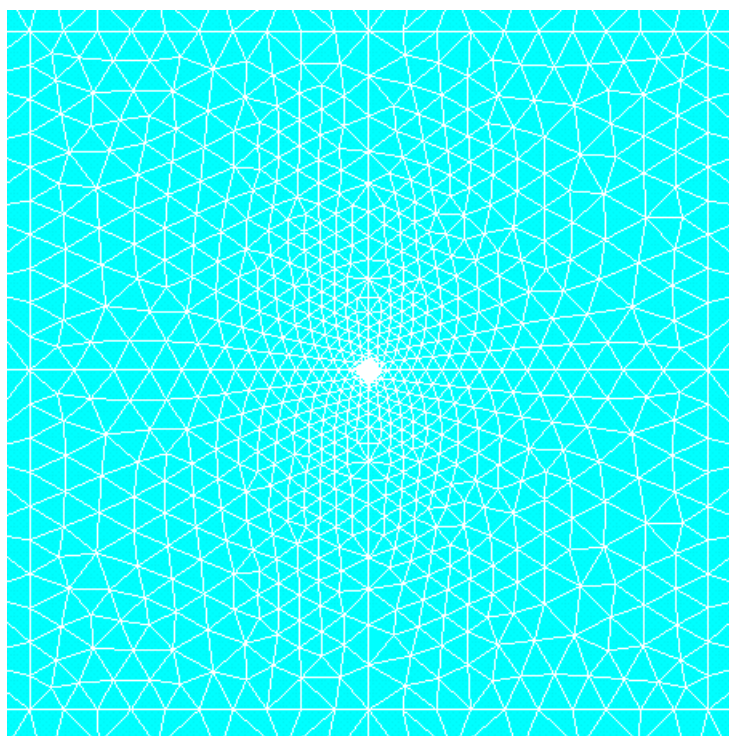


Figura 3.8.: Malla de la zona de contacto

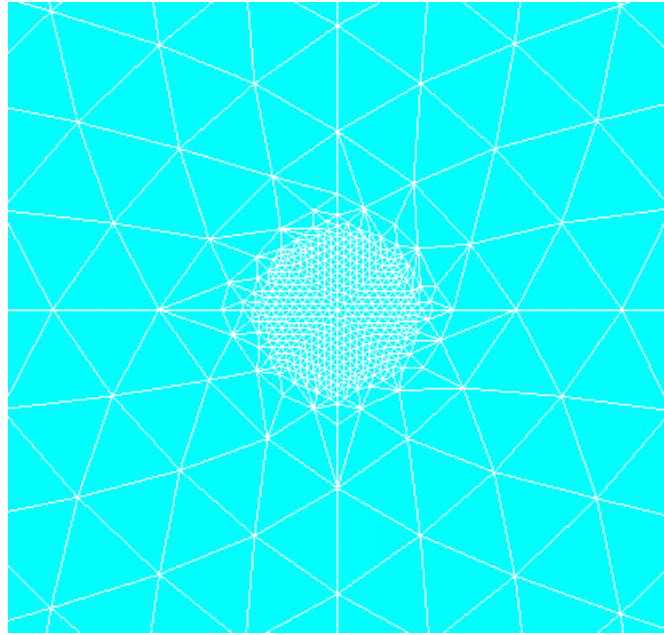


Figura 3.9.: Malla en el punto de contacto

El borde de la zona de contacto estará dividido en 20 elementos, cuyo tamaño es aproximadamente el 15% de la longitud del semieje mayor. En función que nos acercamos al punto central del contacto, el tamaño de los elementos decrece, como se puede observar en la figura 3.8. Además, como se puede ver en la figura 3.9, el tamaño de los elementos en el punto de contacto es muy pequeño comparandolo con el tamaño del semieje mayor calculado de forma teórica.

Para llegar a este modelo final de los cables, se ha pasado por diferentes modelos que se descartaron por la dificultad de conseguir un buen mallado en las zonas necesarias con un coste computacional viable, o que directamente no era posible mallar el volúmen.

3.4. Aplicación de las restricciones de movimiento y fuerzas

En este apartado, se verá como se han aplicado las fuerzas, así como los pasos que se han seguido hasta llegar a la opción seleccionada, habiendo desechado diferentes opciones hasta llegar a la solución final.

En primer lugar, se optó por restringir los desplazamientos en todas las direcciones en las áreas transversales en los extremos de los cables y aplicar la fuerza externa en el punto opuesto al punto de contacto del cable en uno de los cables. Esta

primera opción fue descartada, ya que la solución obtenida en las simulaciones no concordaba con la solución teórica, ya que las restricciones de desplazamiento aportaban rigidez al cable obteniendo resultados erróneos. En la figura 3.10, se muestra la fuerza aplicada mediante un vector de color rojo, mientras que las restricciones de desplazamiento se aplican en las áreas de color morado.

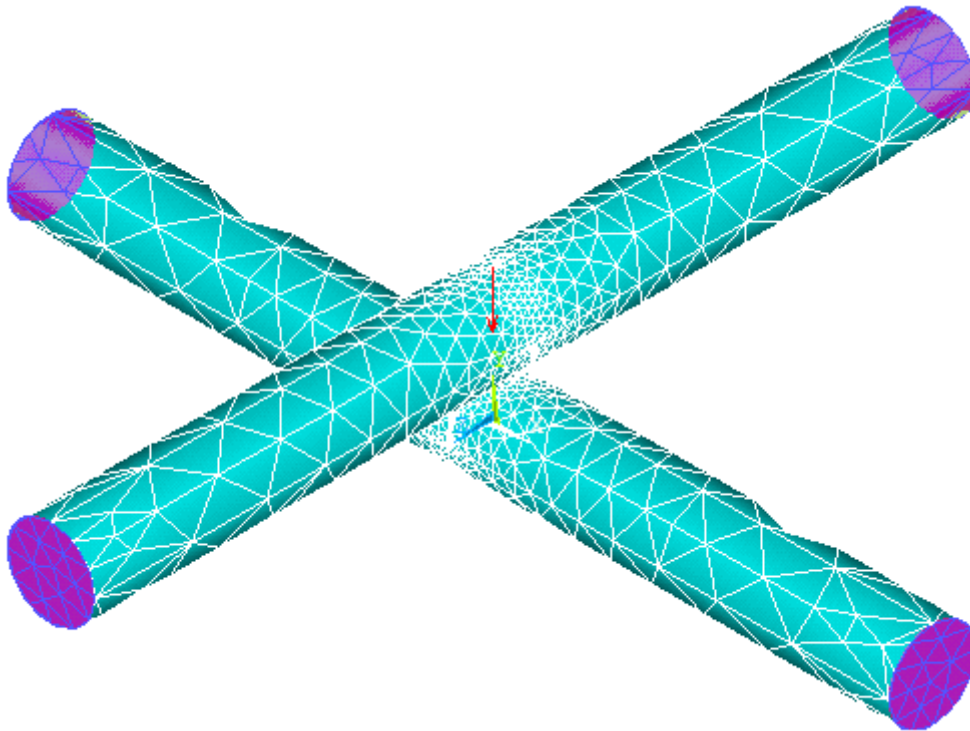


Figura 3.10.: Fuerzas y restricciones de desplazamiento del modelo inicial

Para intentar acercarnos a la solución obtenida del modelo teórico, se añadieron restricciones en todas las direcciones en la línea inferior del cable de abajo, intentando evitar el desplazamiento en dirección vertical del cable y que la rigidez aportada por las restricciones en los extremos de los cables no tuviera efecto. Nuevamente, los resultados obtenidos tras la simulación no fueron buenos y se desechó esta nueva opción. En la figura 3.11, se puede observar la restricción añadida a las ya mostradas en la figura 3.10.

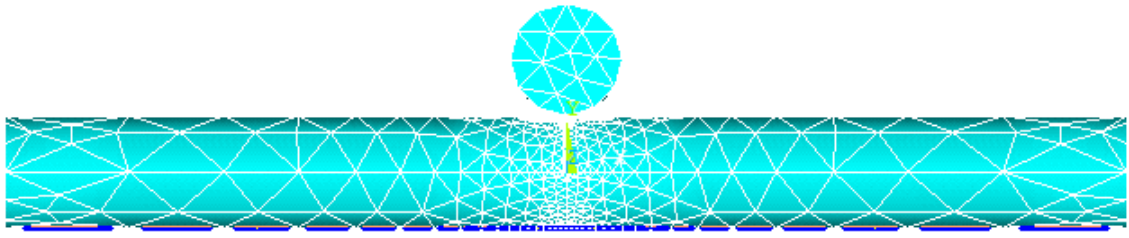


Figura 3.11.: Líneas sobre la que se ha añadido restricción de desplazamiento

El siguiente paso que se tomó, fue aplicar la fuerza externa a ambos cables siendo estas en la misma dirección pero en sentido contrario, manteniendo las restricciones en los extremos de los cables. Si bien los resultados tras la simulación no eran buenos, se observó una mejora con respecto a los casos anteriores, lo que indicaba que la elección que se había tomado era buena. Llegando a la conclusión de que había que modificar las restricciones de desplazamiento. A partir de este momento, se mantuvo la forma de aplicar las fuerzas externas sobre los cables. La nueva disposición de las fuerzas se puede observar en la figura 3.12, manteniendo las restricciones de desplazamiento de la figura 3.10.

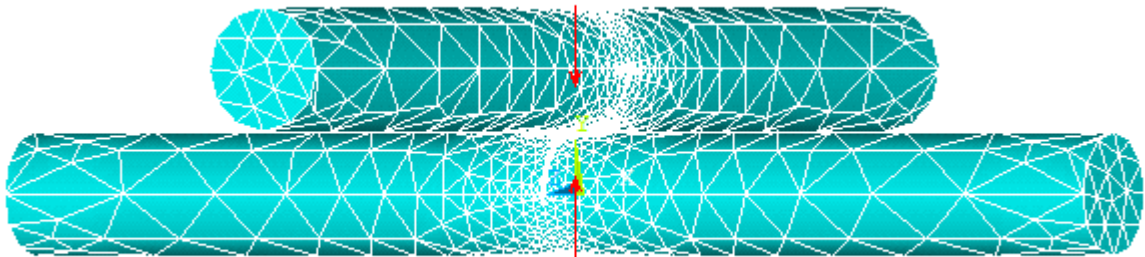


Figura 3.12.: Disposición de fuerzas final

A continuación, se procedió a aplicar las restricciones de una forma que no afectaran a la rigidez del cable, por lo que se ha optado por no aplicarlas en el área de los

extremos de los cables. En este caso se aplicaron restricciones en las áreas más alejadas del contacto y en las direcciones perpendiculares a las fuerzas normales aplicadas. No se aplican restricciones en la dirección de las fuerzas, ya que las fuerzas son contrarias y por lo tanto el modelo está en equilibrio. En este caso, se encontraron problemas de convergencia en la solución no lineal, además de que en algunos casos los cables se movían como sólido rígido en el espacio. Por lo tanto se llegó a la conclusión de que era necesaria una restricción de desplazamiento en la dirección de las fuerzas. Estas restricciones se aplicaron en los dos puntos más alejados de la zona de contacto en uno de los cables. En este caso, se observó una gran mejora en los resultados obtenidos, siendo válidos para los casos en los que los cables no tenían tensión axial. En la figura 3.13, se muestran las áreas en las que se han aplicado las restricciones de desplazamiento en dirección horizontal, también se aplican en el cable de arriba de forma análoga, mientras que en la figura 3.14, se ve en los puntos en los que se ha aplicado la restricción de desplazamiento vertical, representada mediante un triángulo, en este caso únicamente en el cable de abajo.

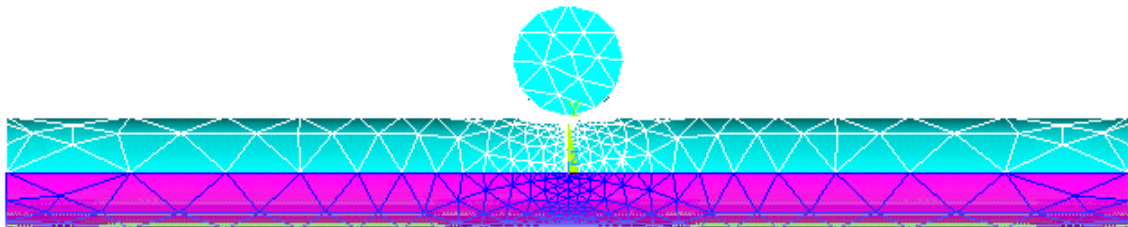


Figura 3.13.: Áreas en las que se ha aplicado restricciones de desplazamiento horizontales

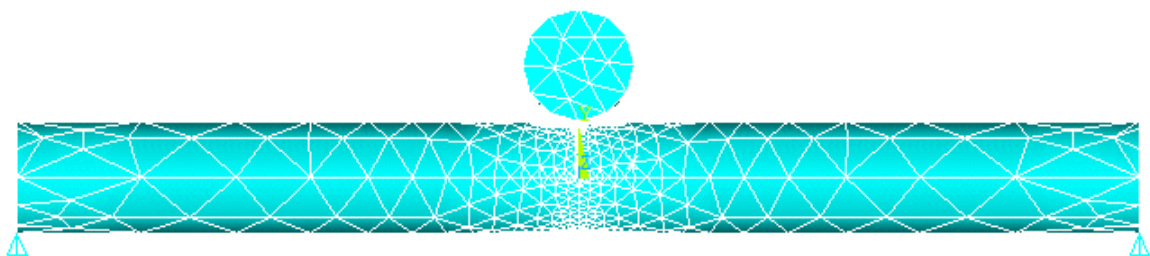


Figura 3.14.: Puntos en los que se aplica la restricción de movimiento en dirección vertical

Para solucionar el problema para el modelo con tensión axial, se optó por aplicar las restricciones en direcciones perpendiculares a las fuerzas en una única línea del cable. La línea debía estar en la mitad del cable y en la superficie contraria a la zona de contacto, dichas líneas se muestran en la figura 3.15. Se volvió a simular para el caso sin tensiones axiales para comprobar que el resultado seguía siendo bueno, siendo los resultados buenos. Por lo tanto, esta será la forma final para aplicar las fuerzas y las restricciones para todos los casos, como se muestra en la figura 3.16.

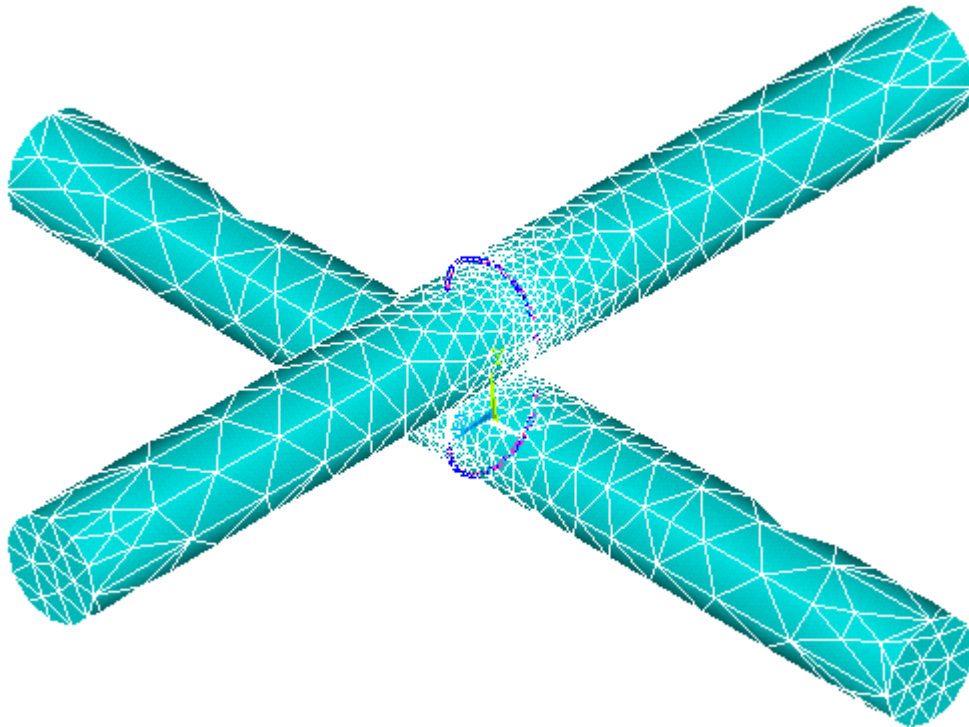


Figura 3.15.: Líneas en las que se aplican las restricciones de desplazamiento horizontales

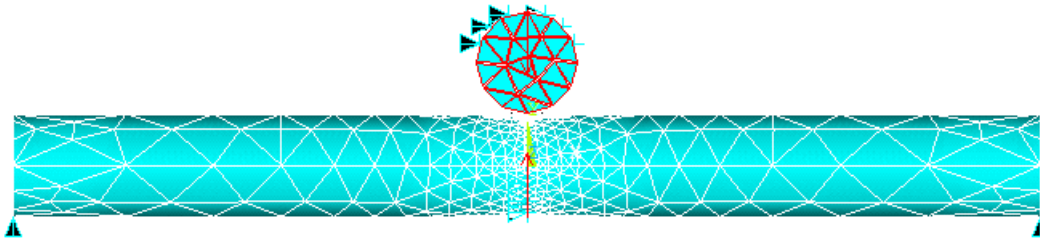


Figura 3.16.: Fuerzas y restricciones de desplazamiento

Para la aplicación de las fuerzas se han utilizado los siguientes comandos:

```
!Aplicación fuerza normal
FK,15,FY,-FUERZA
FK,11,FY,FUERZA
!Aplicación tensión axil
ASEL,S,,17
NSLA,,1
SF,ALL,PRES,AXIL_CABLE_ARRIBA
ASEL,S,,22
NSLA,,1
SF,ALL,PRES,AXIL_CABLE_ARRIBA
!Restricción de desplazamiento verticales
KSEL,,23
KSEL,A,,19
DK,ALL,UY
!Restricciones de desplazamiento horizontales
LSEL,,,3
LSEL,A,,2
LSEL,A,,6
LSEL,A,,7
DL,ALL,UX
DL,ALL,UZ
```

3.5. Creación del contacto

El contacto se ha modelado mediante un contacto superficie a superficie con comportamiento standard. Se ha optado por mantener la mayoría de los parámetros con los valores por defecto, ya que si bien era posible mejorar la precisión del modelo, el coste computacional aumentaba significativamente y por lo tanto se han mantenido los parámetros por defecto. También se han realizado simulaciones con contacto con fricción como sin fricción, para observar el efecto de la fricción en los resultados se realizaron 2 modelos: uno con fricción y otro sin ella. El contacto solo se ha aplicado a las superficies de la zona de contacto, con el objetivo de que fuera lo menor posible para que el coste computacional fuera el mínimo posible, con el fin de poder aumentar la precisión de la malla y obtener mejores resultados.

4. Simulaciones y resultados

En este apartado se van a explicar las diferentes simulaciones realizadas en el trabajo. Cabe destacar que al tratarse de una simulación en la que esta presente un contacto, la solución será no lineal y por lo tanto el programa deberá realizar un proceso iterativo para llegar a la convergencia de la solución y obtener la solución correcta. Este hecho, provoca que se ralentice mucho la obtención de la solución y aumenta mucho el coste computacional en nuestro caso, ya que la convergencia se obtiene aproximadamente en la iteración 80 en el mejor de los casos, de modo que se ha tenido que modificar el número de iteraciones para la solución no lineal predeterminado en ANSYS, que es 25, a 200, ya que en uno de los casos la convergencia se obtiene en la iteración 190 aproximadamente.

El método para solucionar las ecuaciones utilizado es el PCG (Preconditioned Conjugate Gradient iterative equation solver, sus siglas en inglés) en la mayoría de los casos, si bien en los casos con tensión axial se ha tenido que realizar mediante SPARSE, ya que no se obtenía la convergencia. Se escogió el PCG, ya que es un solucionador de ecuaciones que puede resolver matrices mal condicionadas como las que se dan en nuestro caso y lo hace en tiempos más rápidos que otros métodos como puede ser SPARSE que también puede resolver matrices mal condicionadas.

El objetivo de las simulaciones es obtener información sobre el comportamiento del contacto, y comparar los resultados obtenidos de los diferentes casos simulados, para poder ver el efecto que producen las fuerzas externas sobre la solución.

Se busca obtener información sobre las tensiones producidas en la zona de contacto, tanto normales como tangenciales. Además, una vez realizada la simulación se puede acceder a diferente información que es útil para el análisis, como por ejemplo ver las zonas en las que las superficies se deslizan entre ellas pese a que existe contacto, provocando unas tensiones de fricción. Únicamente nos interesa obtener los datos en el contacto, por lo que se ha desarrollado un código para la generación de una matriz de datos, para su posterior análisis en MATLAB.

Con la herramienta MATLAB, podemos realizar gráficas en 3D, donde podremos observar los resultados obtenidos y analizarlos con mayor facilidad, para poder llegar a unas conclusiones.

Las simulaciones que se han realizado, nos proporcionan información sobre diferentes casos para comprobar la influencia que tienen las diferentes condiciones de carga, dimensiones de los cables, presencia de fricción, diferentes ángulos y como afectan a la solución obtenida.

Para poder extraer los datos de las simulaciones para analizarlos en MATLAB, se ha desarrollado un archivo .Mac, para extraerlos, ya que es necesario crear un patrón para extraer los datos. El patrón debe definirse entre 2 puntos e indicar el número de puntos que se extraerán, por lo tanto para extraer los datos de una superficie, ha sido necesario crear un código en el que se crean patrones en un bucle, para cubrir la superficie deseada. Como la superficie forma parte del cilindro, ha sido necesario interpolar para obtener los puntos que posteriormente se utilizan para crear el patrón entre 2 puntos. Deberán hacerse tantos patrones como divisiones se definen en cada patrón para obtener una matriz cuadrada, que es necesario para poder representar los datos de forma correcta. En este caso se han obtenido matrices de datos de 100 filas y 100 columnas, obteniendo un total de 10000 puntos.

4.1. Obtención de las soluciones teóricas

En esta sección, se explica el proceso de cálculo de los valores teóricos realizados, para poder validar los modelos. Para ello se ha utilizado la teoría del caso general de dos cuerpos elasticos en contacto, presentado en el capítulo 2.

En primer lugar, debemos conocer las propiedades del material del que están formados los hilos. En este caso se han realizado las simulaciones para un acero aleado con las siguientes propiedades de densidad(ρ), módulo de Young(E) y coeficiente de Poisson(ν):

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3 \quad E = 210 * 10^3 \text{ N/mm}^2 \quad \nu = 0,3$$

Además, estas propiedades se deben introducir como parámetros iniciales en el archivo .Mac que se ejecutará en ANSYS para que realice la simulación correctamente y con las propiedades del material adecuadas, para así obtener la solución correcta.

A continuación, debemos conocer los datos de las dimensiones de los cables, así como el ángulo con el que se cruzan. Si bien el material utilizado para todas las simulaciones ha sido el mismo y por lo tanto los valores de la densidad, Módulo de Young y el coeficiente de Poisson son del mismo valor para todas las simulaciones, no ocurre lo mismo con las dimensiones y ángulos de cruce, por lo tanto habrá que realizar los cálculos teóricos para cada caso. Estos datos de las dimensiones se introducen al inicio del archivo .Mac para poder realizar los cálculos teóricos para cada caso.

En primer lugar, se debe calcular el valor de C_E , como en todos nuestros casos el material de ambos cables es el mismo, ν_1 y ν_2 tendrán el mismo valor, del mismo modo ocurre con E_1 y E_2 . Por lo tanto, la ecuación para calcular C_E se simplifica como se muestra en la ecuación 4.1.

$$C_E = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} = \frac{2(1 - \nu^2)}{E} \quad (4.1)$$

A continuación, se ha particularizado la teoría del contacto para el caso de 2 cilindros. Mientras que en el caso de dos sólidos cualesquiera tenemos dos radios de curvatura para definir la forma del sólido en el punto de contacto, en el caso de dos cilindros uno de los radios de curvatura de cada cable es infinito, ya que una de las curvaturas no existe en el caso del cilindro. Por lo tanto R_1 tendrá el valor del radio de uno de los cables y R'_1 será infinito. De forma análoga ocurre con el segundo cable, por lo que ya son conocidos los valores de los radios. Además, el ángulo de cruce(ϕ) también es conocido, por lo que procedemos a calcular el valor de K_D , a partir de la ecuación particularizada 4.2.

$$K_D = \frac{1,5}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R'_2}} = \frac{1,5}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (4.2)$$

Una vez conocido el valor de K_D , se procede a calcular el valor del $\cos(\theta)$, a partir de la ecuación 4.3 se particulariza para el caso de dos cables, obteniendo la ecuación 4.4:

$$\cos(\theta) = \frac{K_D}{1,5} \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R'_1}\right)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R'_2}\right)\cos(2\phi)} \quad (4.3)$$

$$\cos(\theta) = \frac{K_D}{1,5} \sqrt{\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{2}{R_1 R_2} \cos(2\phi)} \quad (4.4)$$

El siguiente paso, es el cálculo de los valores de α y β , por lo que habrá que observar la tabla 4.1. Para calcular dichos valores, será necesario interpolar, para ello se utiliza la herramienta de tabla de interpolación de ANSYS. Para obtener el valor deseado se accede a la tabla mediante el valor de $\cos(\theta)$, y el software realiza una interpolación lineal para obtener el valor.

$\cos \theta$	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.75
α	1.000	1.070	1.150	1.242	1.351	1.486	1.661	1.905	2.072
β	1.000	0.936	0.878	0.822	0.769	0.717	0.664	0.608	0.578
$\cos \theta$	0.80	0.85	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	
α	2.292	2.600	3.093	3.396	3.824	4.508	5.937	7.774	
β	0.544	0.507	0.461	0.438	0.412	0.378	0.328	0.287	

Tabla 4.1.: Tabla para el cálculo de α y β

Una vez obtenidos los valores de α y β , se procede a calcular los valores de la longitud del semieje mayor (ec. 4.5), semieje menor (ec. 4.6) y tensión máxima (ec. 4.7) producida en el contacto, siendo P la fuerza normal aplicada.

$$c = \alpha \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (4.5)$$

$$d = \beta \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1,5P}{\pi cd} \quad (4.7)$$

Estos cálculos se realizan para cada caso simulado, para poder comprobar que la simulación es correcta.

Además, para comprobar que la solución obtenida mediante el método anterior es correcta, se ha calculado la solución mediante otro método para el caso de cilindros cruzados perpendicularmente. De modo que se han realizado los cálculos anteriores para un ángulo de 90 grados, para tener el mismo caso que el de la teoría particular para dos cilindros cruzados perpendicularmente. Los pasos seguidos para calcular los valores mediante este método son similares a los del método anterior. El valor de C_E es el mismo en ambos casos. Se ha utilizado el mismo diámetro en ambos hilos para facilitar el cálculo.

Por lo tanto, en primer lugar se calcula el valor de K_D utilizando la ecuación 4.8.

$$K_D = \frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2} \quad (4.8)$$

Como ambos diámetros son iguales, tanto α como β tomarán un valor de 0.908. Una vez conocidos estos valores, se procede a calcular los valores de los semiejes y tensión máxima mediante las ecuaciones proporcionadas en la teoría, que son iguales a las del caso anterior (ecs. 4.9, 4.10 y 4.11):

$$c = \alpha \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (4.9)$$

$$d = \beta \sqrt[3]{PK_D C_E} \quad (4.10)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1,5P}{\pi cd} \quad (4.11)$$

Una vez realizados los cálculos, se comprueba que obtenemos los mismos valores con ambos casos, por lo que se llega a la conclusión que la particularización realizada en el primer caso es correcta, y proporciona resultados correctos para poder compararlos con los resultados de la simulación.

4.2. Diferentes simulaciones realizadas

En este apartado, se van a presentar las diferentes simulaciones realizadas con sus resultados, realizando comparaciones entre los diferentes casos. Además, se indicarán los resultados teóricos para poder comprobarlos con los resultados obtenidos a partir de la simulación.

Se realizará la comparación entre la tensión máxima obtenida y la longitud del semieje mayor, entre el resultado de la simulación y el resultado teórico, verificando de este modo que tanto el tamaño de la superficie de contacto como las tensiones obtenidas son aceptables.

4.2.1. Modelo con fuerza normal a 90° sin fricción

En esta simulación, se ha simulado un modelo de los hilos cruzados perpendicularmente en el que únicamente se aplica una fuerza normal, como se puede ver en la figura 4.1. En este caso el contacto está modelado sin fricción.

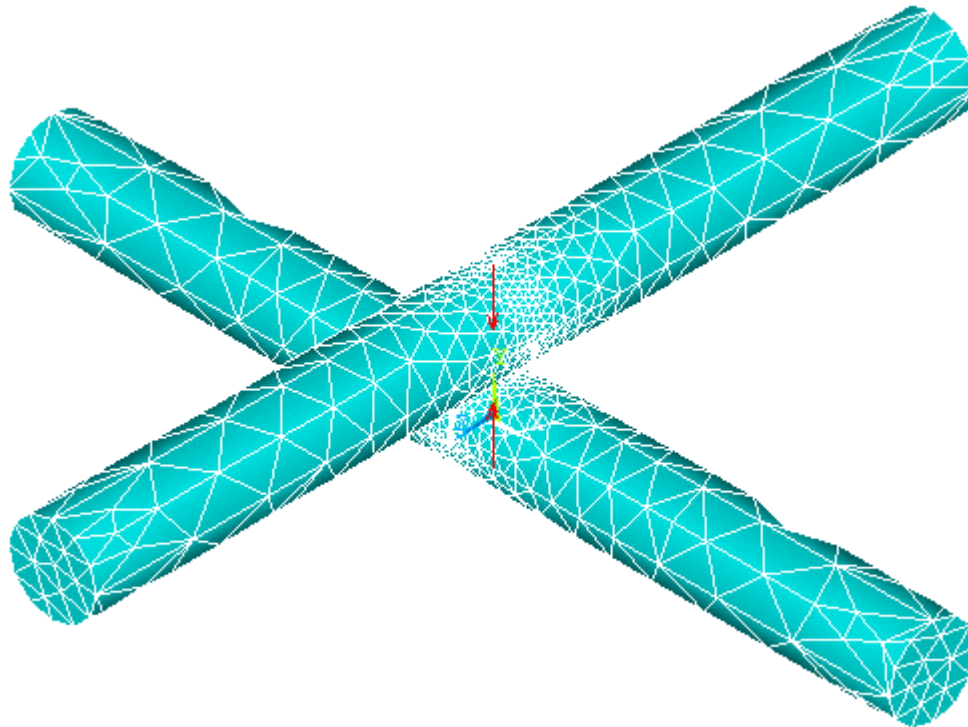


Figura 4.1.: Fuerzas externas en el modelo

En las tablas 4.2 y 4.3 se muestran los parámetros que definen la simulación llevada a cabo.

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	1	1
Longitud (mm)	10	10

Tabla 4.2.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	90
Fuerza normal (N)	1
Tensión axial cable inferior (MPa)	0
Tensión axial cable superior (MPa)	0

Tabla 4.3.: Parámetros de la simulación

El tiempo de simulación en este caso, ha sido de aproximadamente 2 horas, siendo la simulación más rápida que se ha realizado en este trabajo.

En la figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos de tensiones normales, donde se puede observar la tensión máxima obtenida. En este caso como los cables están cruzados perpendicularmente, la superficie de contacto es totalmente circular, siendo su semieje mayor de la misma longitud del semieje menor.

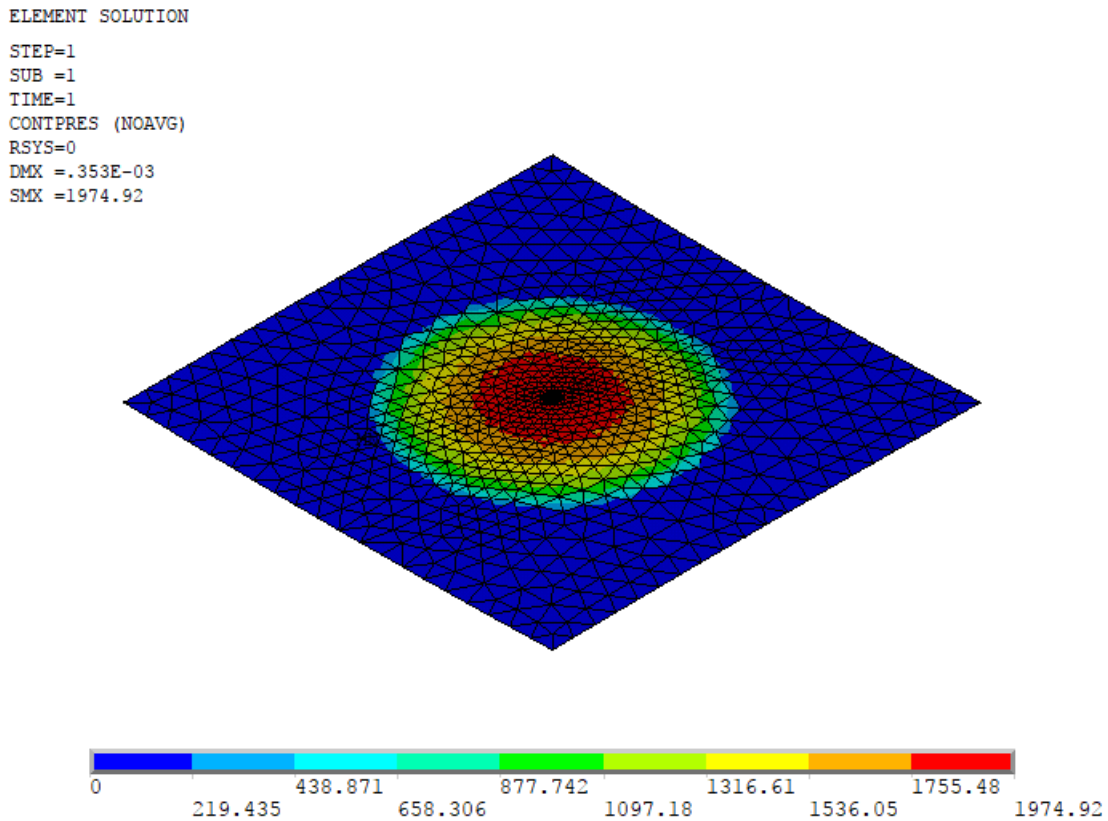


Figura 4.2.: Tensión normal obtenida en la simulación

A continuación, se comparan los resultados obtenidos en la simulación con los datos calculados de forma teórica en la tabla 4.4.

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	1974.92	2176.13
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0161	0.0148

Tabla 4.4.: Comparación de los resultados de la simulación con los teóricos

Se observa una diferencia de entorno al 10% en los resultados obtenidos de la simulación respecto a los cálculos teóricos, y tomamos estos resultados como buenos, ya que para conseguir resultados más precisos sería necesario realizar un mallado más preciso, por lo que el coste computacional sería mayor siendo demasiado grande para este proyecto. Además se puede observar que mientras que la tensión máxima obtenida es menor que la teórica, con el tamaño de la huella ocurre lo contrario.

Los datos de la longitud del semieje mayor, se han obtenido analizando los datos extraídos mediante la herramienta MATLAB, habiendo desarrollado un código para obtener los datos deseados, así como las representaciones 3D deseadas. En las figuras 4.3 y 4.4 se representan las tensiones normales y tangenciales obtenidas de la simulación.

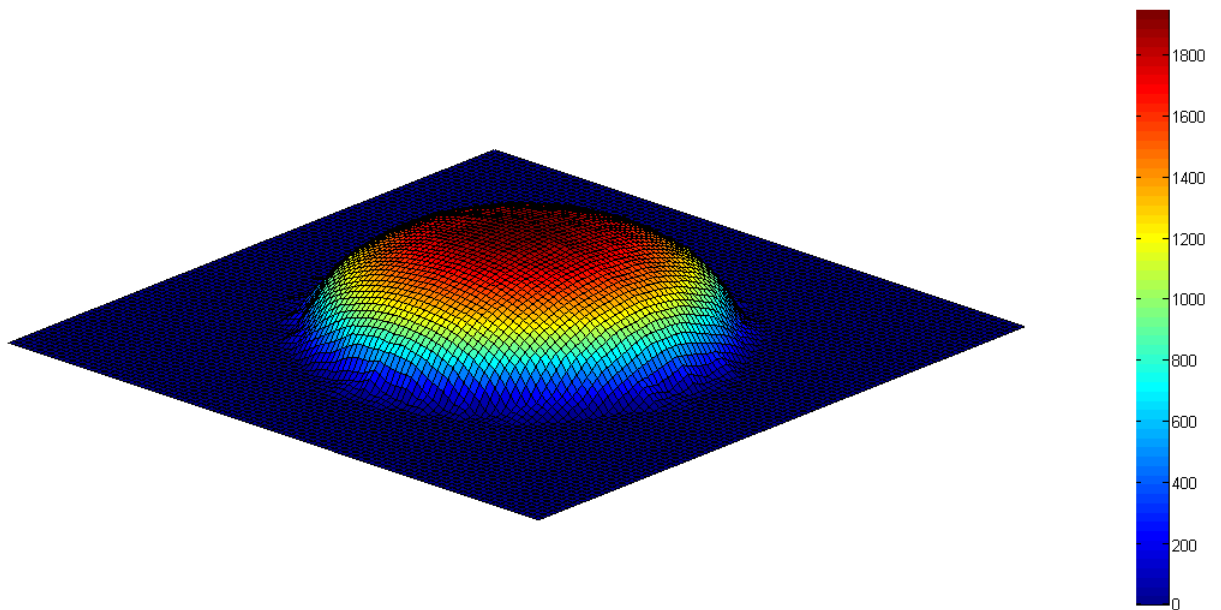


Figura 4.3.: Tensiones normales

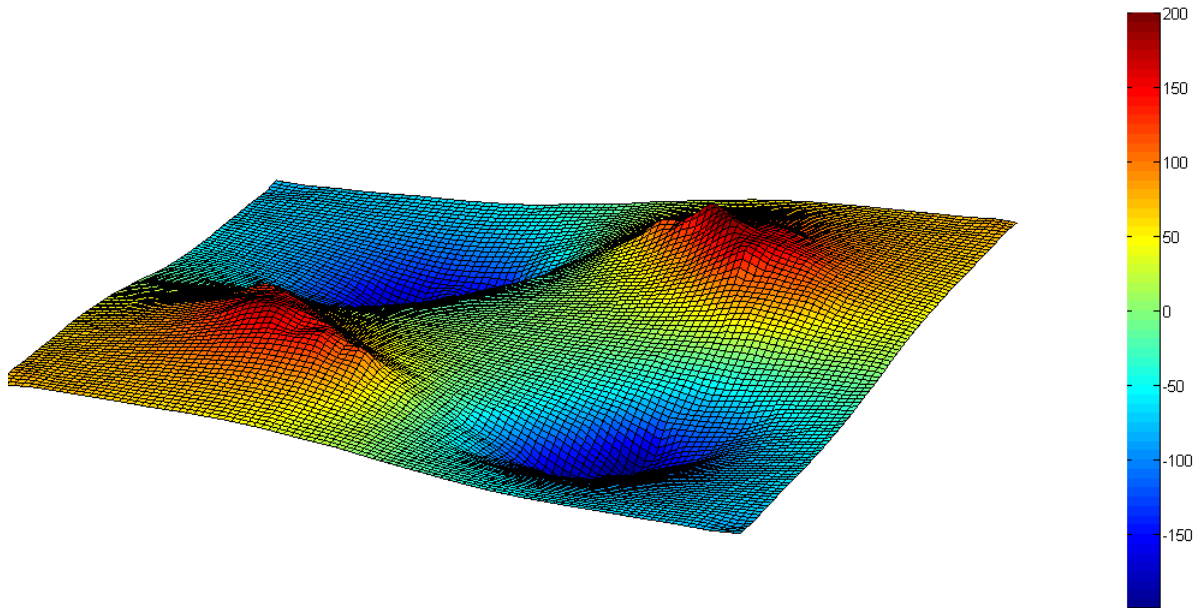


Figura 4.4.: Tensiones tangenciales

Como era de esperar, la tensión normal máxima se encuentra en el centro del contacto, y va decreciendo de forma gradual formando una área circular. En el caso de las tensiones tangenciales, los valores máximos y mínimos son del mismo orden, siendo algo superiores en su valor absoluto los positivos.

4.2.2. Modelo con fuerza normal a 60° sin fricción

Esta simulación es análoga a la anterior, con la única diferencia de que en este caso el ángulo formado por el cruce entre los cables es de 60° en lugar de 90° . En la figura 4.5, se muestra el modelo utilizado para la simulación.

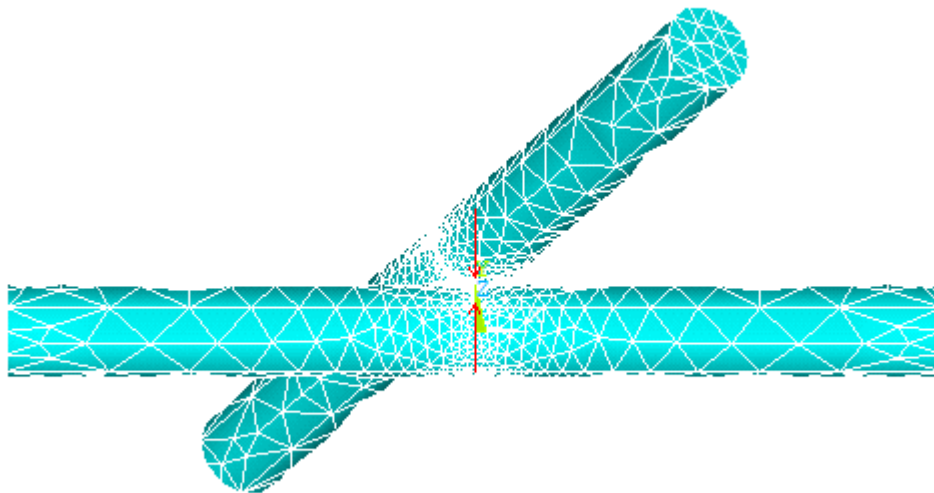


Figura 4.5.: Modelo utilizado para la simulación

Las tablas 4.5 y 4.6 muestran los detalles del modelo que se ha simulado, siendo igual al de la sección anterior con la única diferencia de el ángulo de cruce.

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	1	1
Longitud (mm)	10	10

Tabla 4.5.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	60
Fuerza normal (N)	1
Tensión axil cable inferior (MPa)	0
Tensión axil cable superior (MPa)	0

Tabla 4.6.: Parámetros de la simulación

4.2 Diferentes simulaciones realizadas

En este caso el tiempo de simulación ha aumentado considerablemente, aumentando a aproximadamente 3 horas.

En la figura 4.6, se puede observar que en este caso debido a que el ángulo de cruce no es perpendicular, la superficie de contacto es de forma elíptica, a diferencia de lo que ocurría en el caso anterior, que era circular.

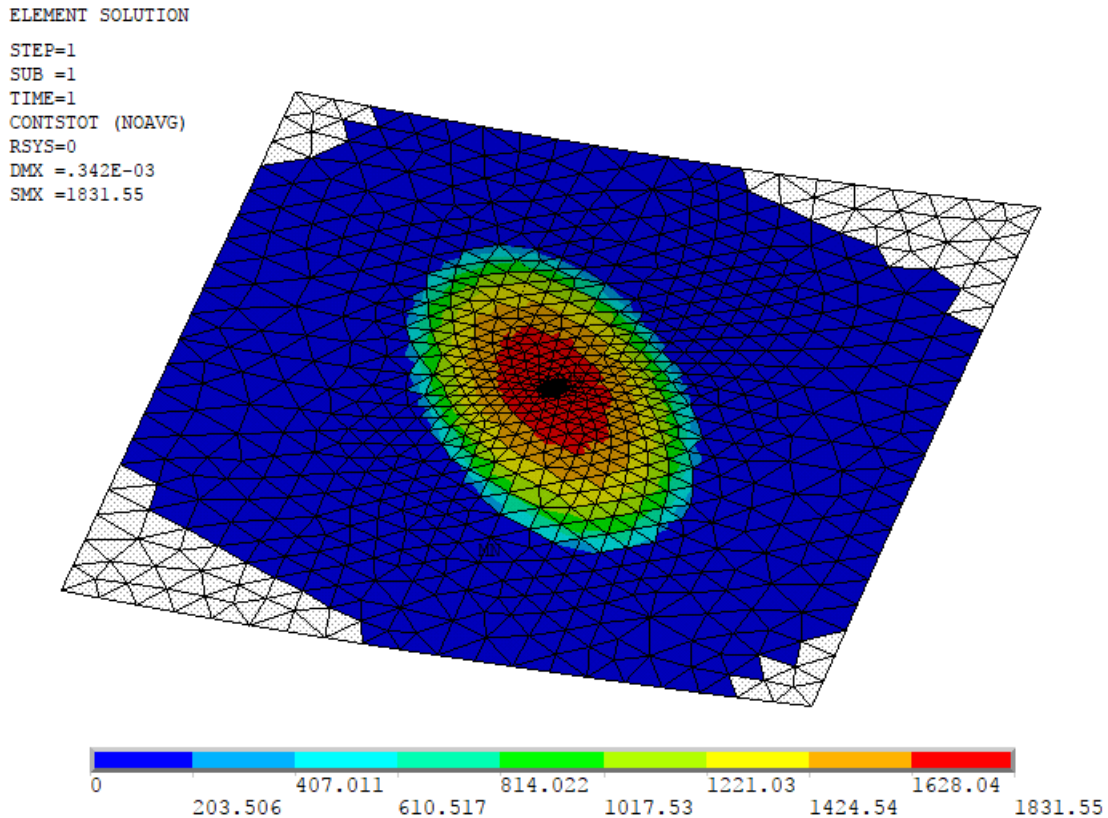


Figura 4.6.: Tensión normal obtenida en la simulación

En la tabla 4.7, se muestra la comparación de resultados. En esta ocasión, se observa un error similar en cuanto a la tensión normal máxima, pero en este caso la diferencia en la longitud del semieje mayor es menor.

	Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos	
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	1831.55	2042.43
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0229	0.0220

Tabla 4.7.: Comparación de resultados

En la figura 4.7, se puede observar la tensión normal presente en la zona de contacto, que en comparación con el caso anterior, la mayor diferencia es la forma elíptica,

además de que se produce una disminución de la tensión normal máxima presente. Este resultado es esperado, ya que en los cálculos teóricos el valor también era menor. La explicación es que al estar con un menor ángulo, el apoyo entre cables es mayor, y por lo tanto la superficie de contacto es mayor. También se observan cambios en las tensiones tangenciales obtenidas, que se muestran en la figura 4.8. En este caso, las tensiones máximas se obtienen en el borde de la huella de contacto, pero en este caso se observa que a lo largo de los semiejes mayores de la superficie de contacto aparece tensión tangencial, cosa que en el caso anterior no ocurría. La tensión tangencial máxima también es ligeramente menor que en el caso anterior.

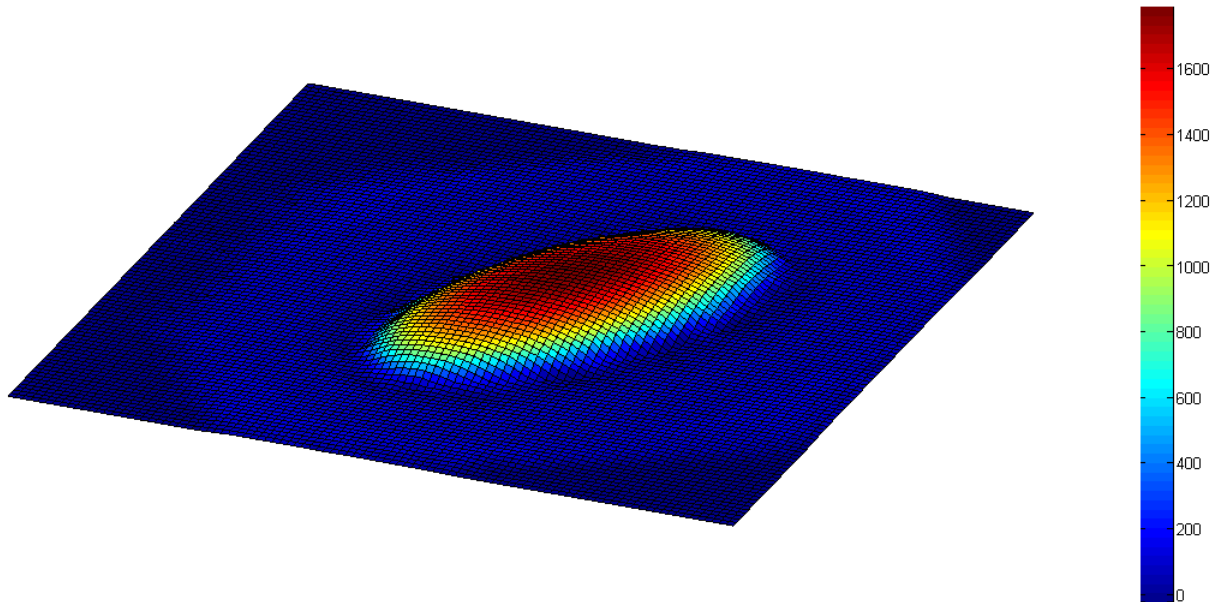


Figura 4.7.: Tensiones normales

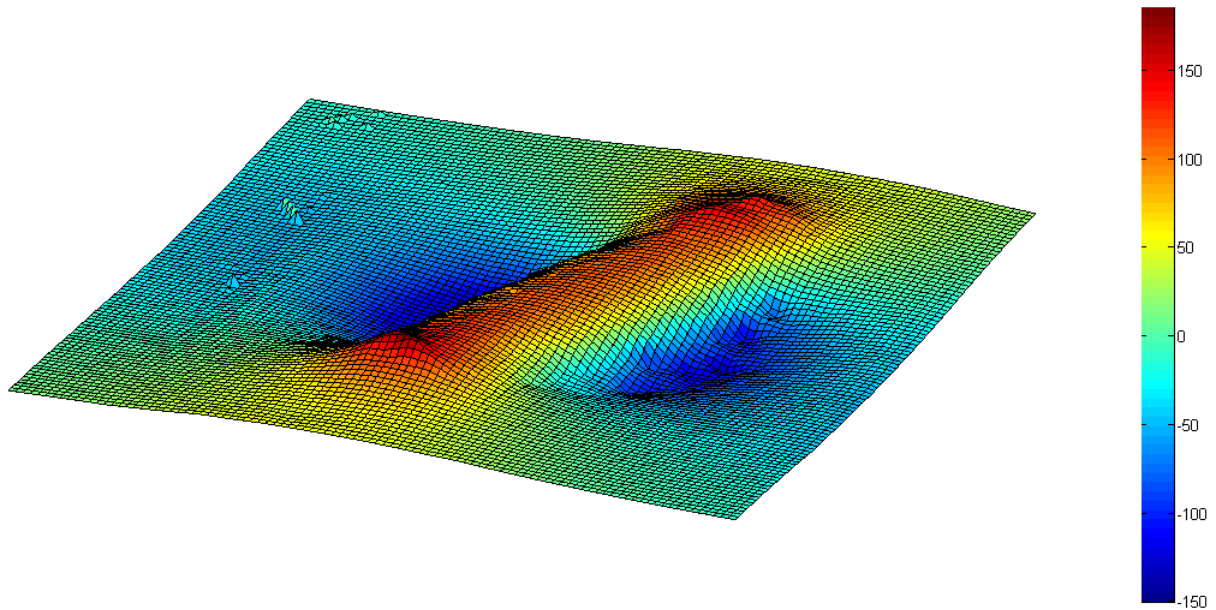


Figura 4.8.: Tensiones tangenciales

En las 2 siguientes secciones se muestran estos mismos casos, con la diferencia de que en esos casos habrá fricción para poder ver el efecto que tiene sobre el contacto.

4.2.3. Modelo con fuerza normal a 90° con fricción

En este caso, la configuración de fuerzas es la mostrada en figura 4.9, que es la misma a la del primer caso presentado. Todos los datos son los mismos y se muestran en las tablas 4.8 y 4.9, excepto que en el modelado del contacto, se ha incluido un coeficiente de fricción de 0.3, cuyos efectos explicaremos en este apartado.

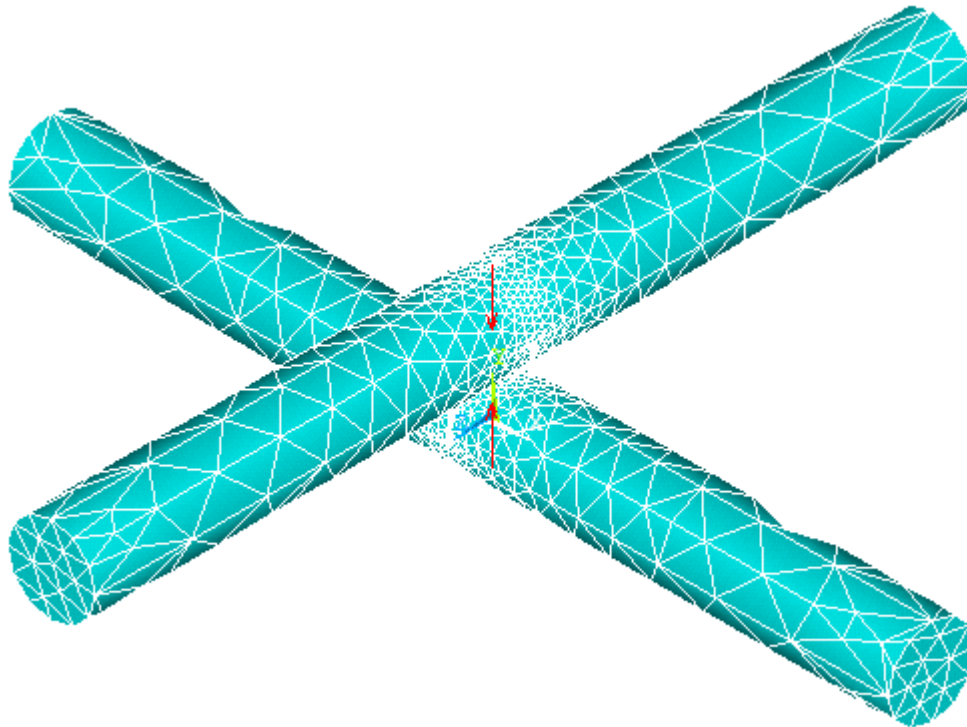


Figura 4.9.: Modelo utilizado para la simulación

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	1	1
Longitud (mm)	10	10

Tabla 4.8.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	90
Fuerza normal (N)	1
Tensión axil cable inferior (MPa)	0
Tensión axil cable superior (MPa)	0

Tabla 4.9.: Parámetros de la simulación

El tiempo de simulación al añadir la fricción en el modelado del contacto, no tiene un gran efecto en el coste computacional. Esta simulación ha tenido una duración ligeramente superior al caso de 90 grados sin fricción. Además, la huella vuelve a ser circular, como era de esperar teniendo en cuenta que los hilos vuelven a cruzarse de forma perpendicular.

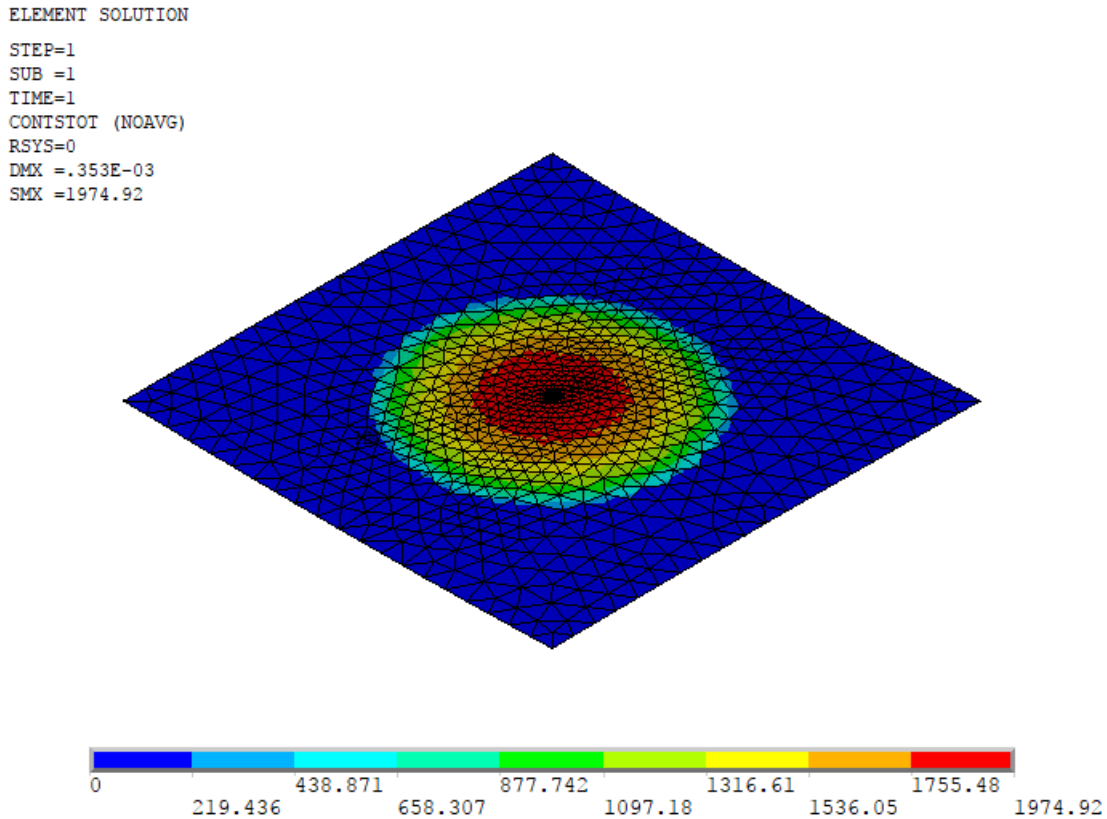


Figura 4.10.: Tensión normal obtenida en la simulación

En la tabla 4.10, se muestra la comparación de resultados. Los resultados son los mismos que en el caso en el que no había fricción, por lo tanto el hecho de que haya fricción no tiene una gran influencia en el tamaño de la superficie de contacto ni en las tensiones máximas generadas. Pero en este caso se generan unas tensiones por fricción que se muestran en la figura 4.13. Estas tensiones aparecen en el borde de la huella de contacto donde se produce el deslizamiento entre los sólidos. Además, se muestra también el estado del contacto, que puede ser en contacto sin deslizamiento, contacto con deslizamiento, sin contacto pero muy cerca de producirse y zonas más alejadas, como se muestra en la figura 4.14. La zona de deslizamiento es muy pequeña y se encuentra en el borde de la huella, mientras que en casi la totalidad del contacto, no se produce deslizamiento. El resto de la zona de contacto predefinida, se encuentra cerca del contacto pero sin llegar a contactar.

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	1974.92	2176.13
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0161	0.0148

Tabla 4.10.: Comparación de resultados

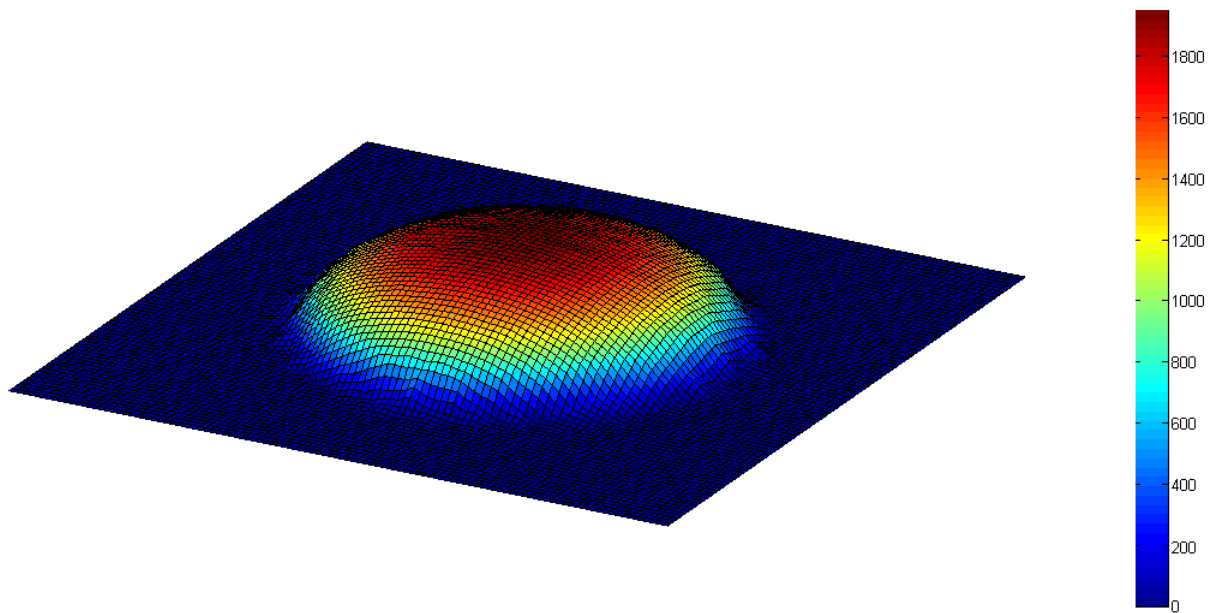


Figura 4.11.: Tensiones normales

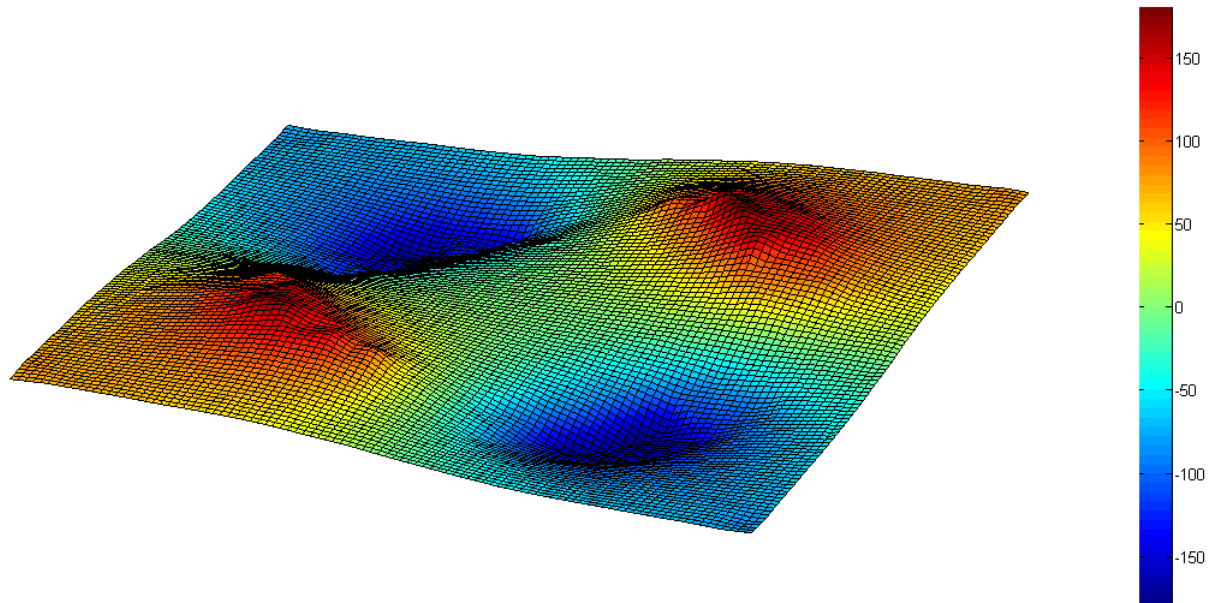


Figura 4.12.: Tensiones tangenciales

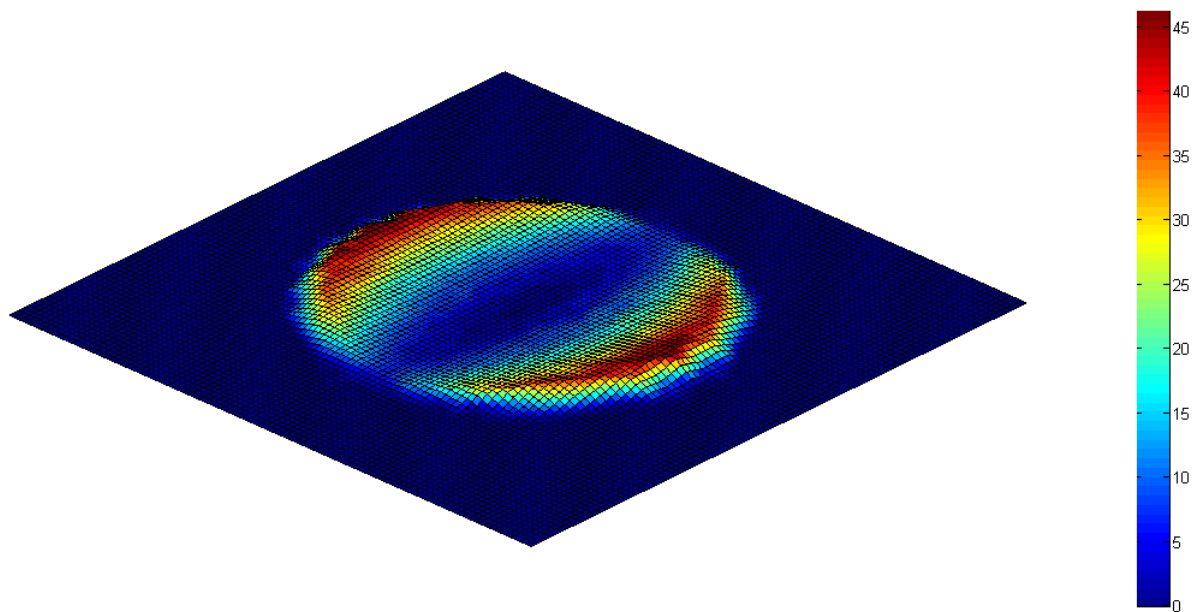


Figura 4.13.: Tensiones debidas a la fricción

```

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
CONSTAT (AVG)
RSYS=0
DMX =.353E-03
SMN =1
SMX =3

```

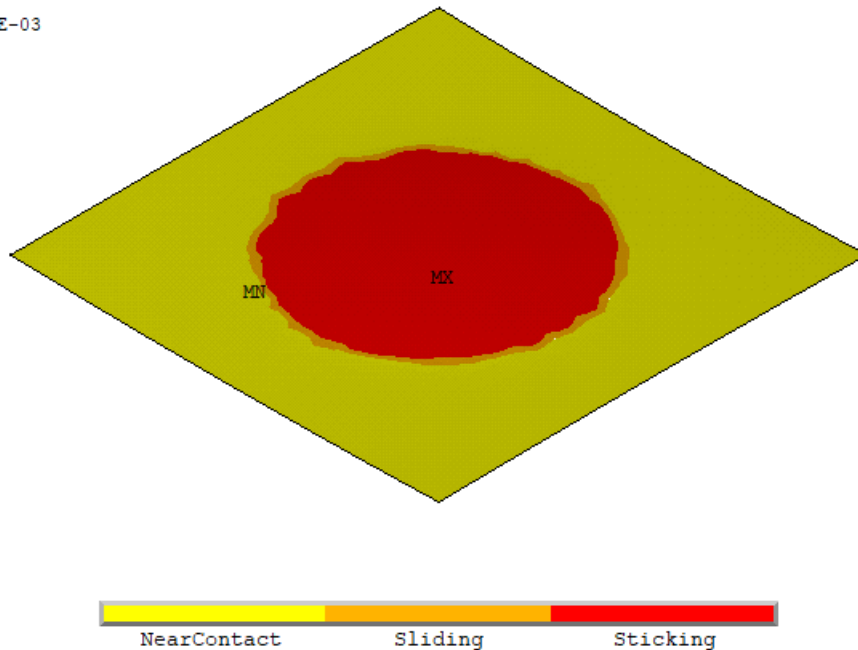


Figura 4.14.: Estado del contacto

Las tensiones normales se representan en la figura 4.11, y no se observan cambios considerables en comparación con el caso sin fricción. No ocurre lo mismo en el caso de las tensiones tangenciales, que se muestran en la figura 4.12, en las que se observa que hay una ligera disminución en los valores máximos obtenidos. Esto es debido a que las tensiones que se generan por la fricción producen esta ligera disminución. Aún así, las tensiones tangenciales generadas son muy similares a las obtenidas sin fricción (figura 4.3).

4.2.4. Modelo con fuerza normal a 60° con fricción

Al igual que ocurría en el caso anterior, en este caso se realiza la simulación un ángulo de 60 grados con la diferencia que se añade un coeficiente de fricción de 0.3. La configuración de fuerzas, y los parámetros de la simulación se muestran en la figura 4.15 y tablas 4.11 y 4.12 respectivamente.

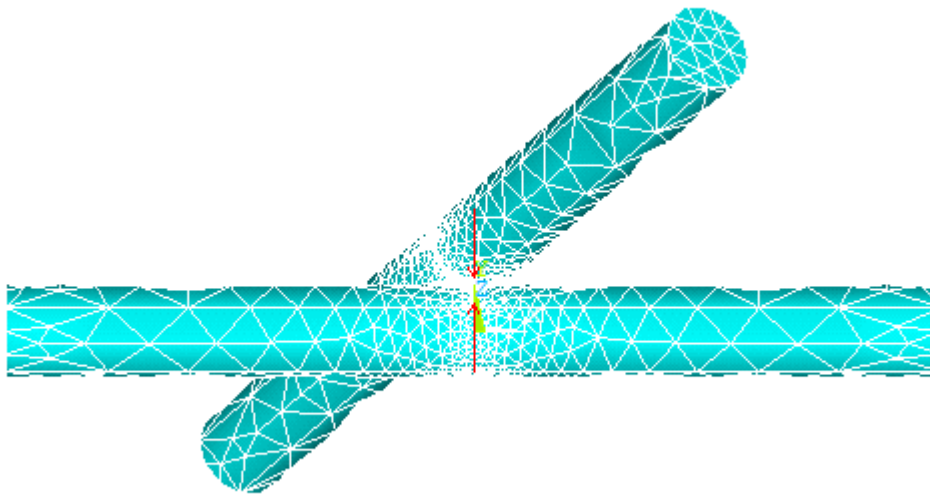


Figura 4.15.: Modelo utilizado para la simulación

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	1	1
Longitud (mm)	10	10

Tabla 4.11.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	60
Fuerza normal (N)	1
Tensión axial cable inferior (MPa)	0
Tensión axial cable superior (MPa)	0

Tabla 4.12.: Parámetros de la simulación

La duración de la simulación, al igual que pasaba con el caso anterior, no varía mucho con respecto al caso análogo sin fricción, obteniendo el resultado de tensiones normales mostrado en la figura 4.16, donde se puede observar el valor máximo alcanzado.

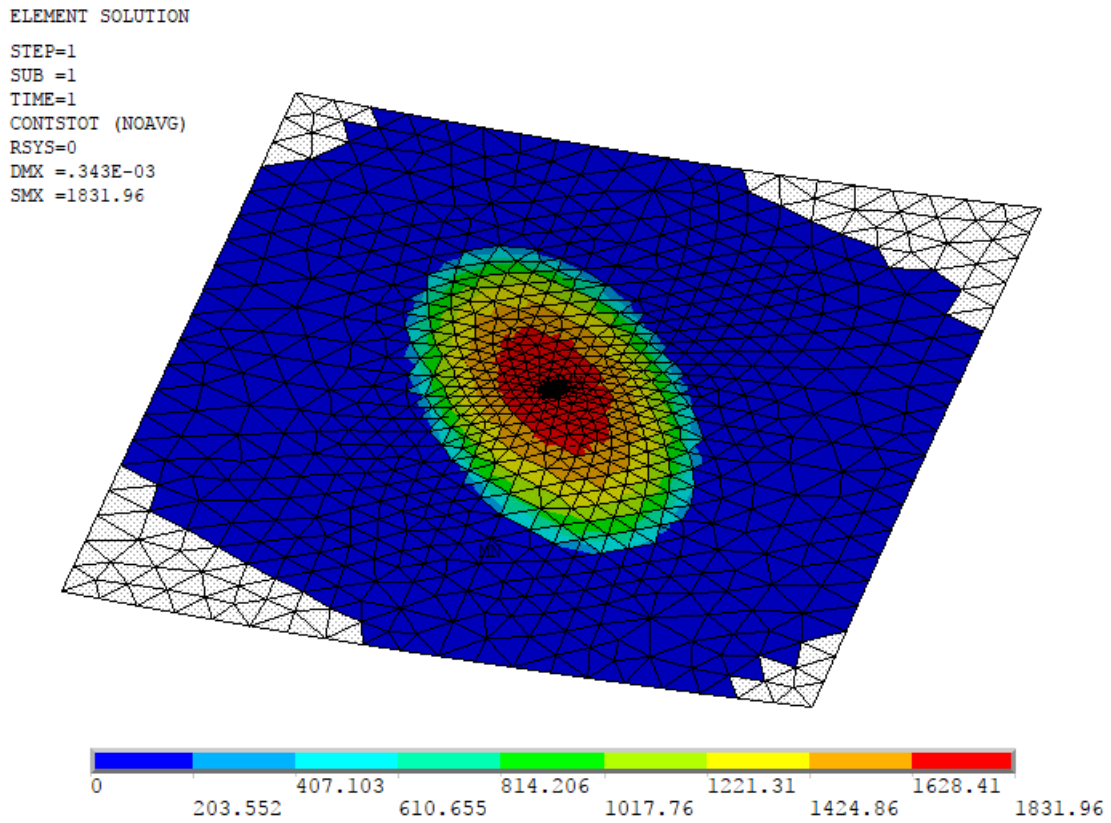


Figura 4.16.: Tensión normal obtenida en la simulación

En la tabla 4.13, se muestra la comparación de resultados. Los resultados en este caso son prácticamente los mismos, pero en este caso la tensión máxima varía muy ligeramente respecto al caso sin fricción. En el caso sin fricción la tensión máxima era de 1831.55, mientras que con fricción es 1831.96, esta diferencia es mínima y por lo tanto no es considerable y la fricción tiene un efecto muy pequeño sobre las tensiones normales y el tamaño de la superficie de contacto. Nuevamente, se obtiene el mismo resultado en cuanto a tensiones tangenciales, mostradas en la figura 4.18. Se obtienen unas tensiones tangenciales similares a cuando no había fricción pero con tensiones ligeramente inferiores. Las tensiones provocadas por la fricción se vuelven a encontrar en el borde de la huella, en los puntos más alejados del cable contrario, como se puede observar en la figura 4.19. En cuanto al estado del contacto, en la gran mayoría de la huella el contacto es sin deslizamiento, y el deslizamiento únicamente aparece en los bordes del contacto tal como se muestra en la figura 4.20.

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	1831.96	2042.43
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0229	0.0220

Tabla 4.13.: Comparación de resultados

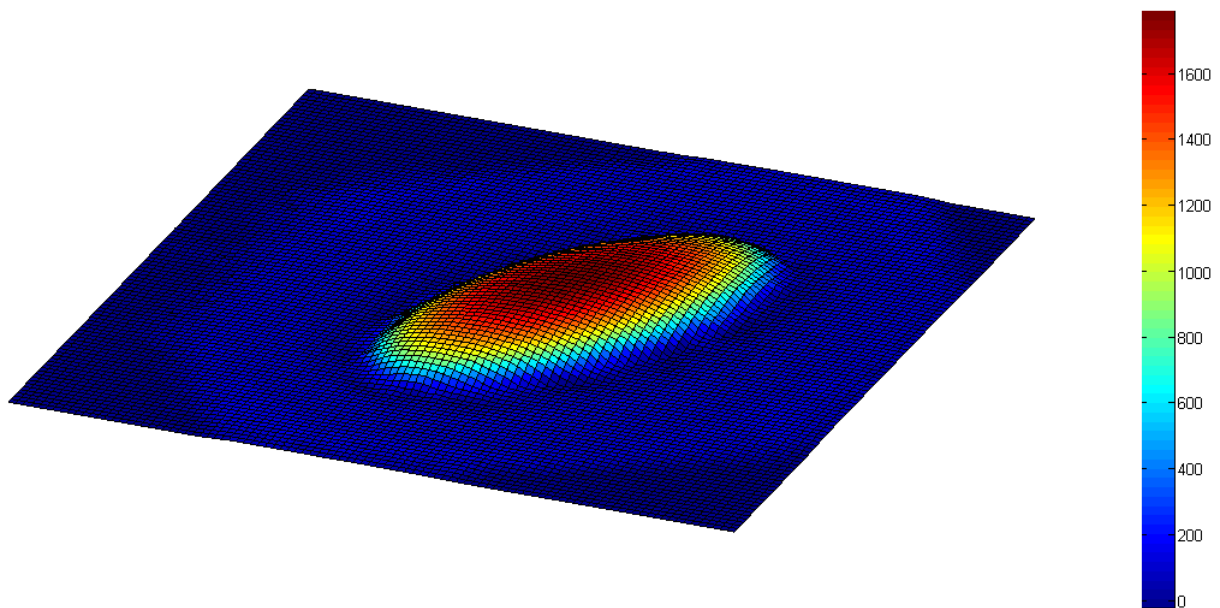


Figura 4.17.: Tensiones normales

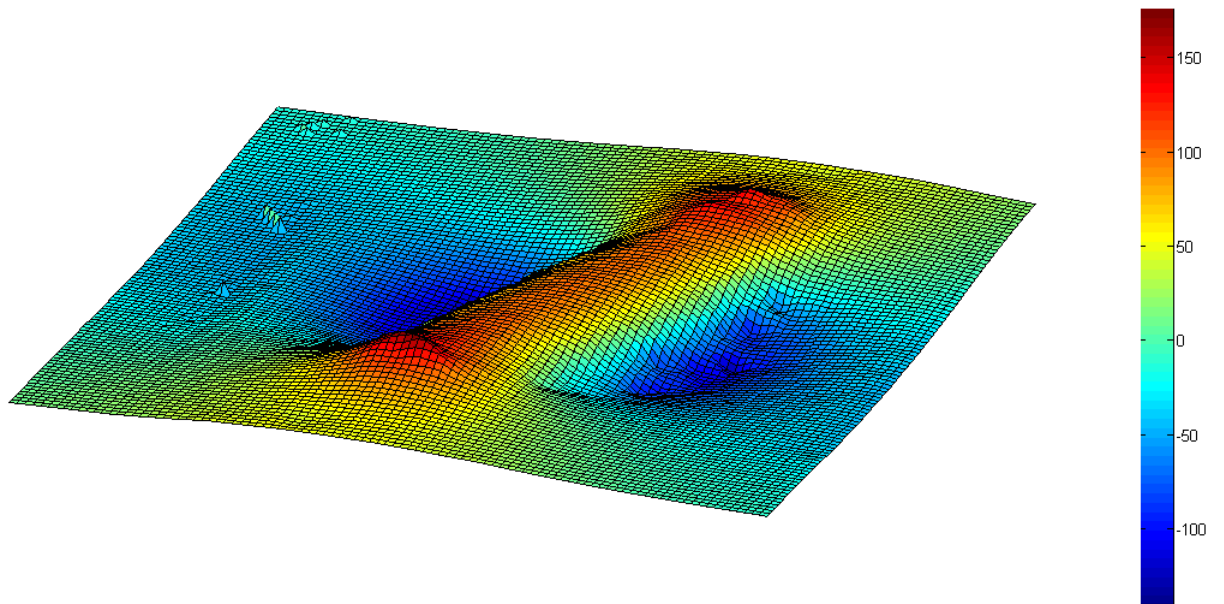


Figura 4.18.: Tensiones tangenciales

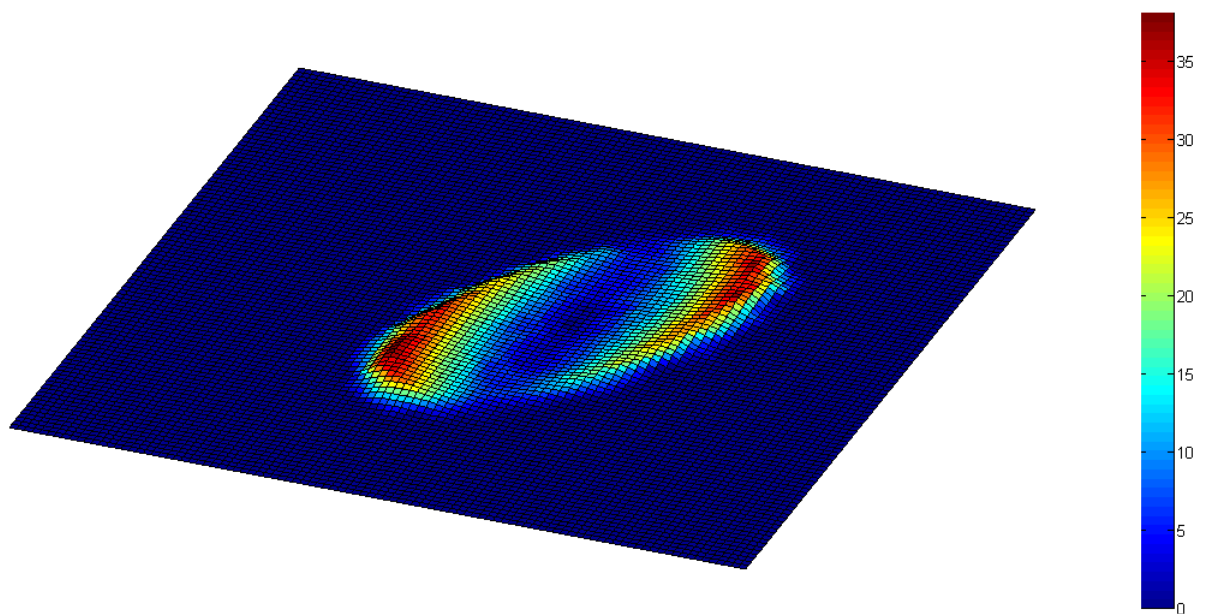


Figura 4.19.: Tensiones debidas a la fricción

```
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
CONSTAT (AVG)  
RSYS=0  
DMX =.343E-03  
SMN =.142857  
SMX =3
```

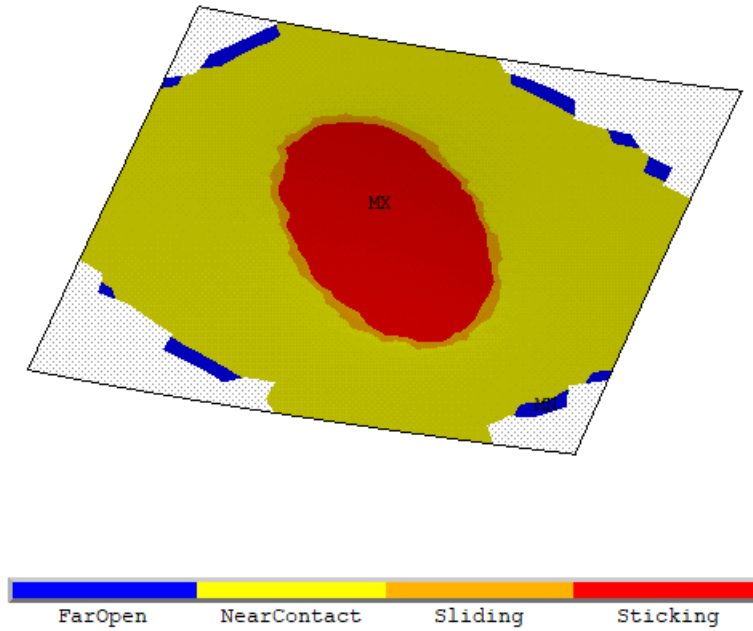


Figura 4.20.: Estado del contacto

4.2.5. Modelo con cables de diferentes diámetros a 90° sometidos a fuerza normal

En este caso, vamos a analizar el contacto entre dos hilos cuyos diámetros son diferentes para observar el efecto que tiene la variación del diámetro de uno de ellos. En la figura 4.21, se muestra el modelo utilizado en este caso.

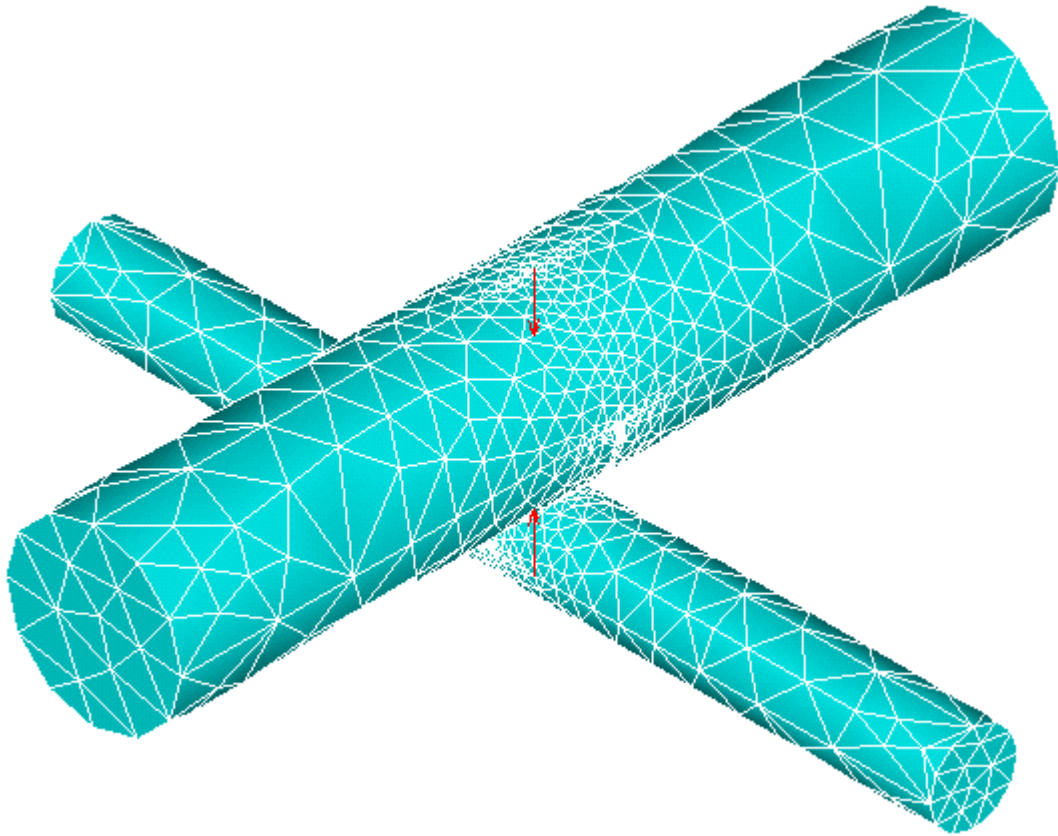


Figura 4.21.: Modelo con cables de diferentes diámetros a 90°

En las tablas 4.14 y 4.15, se pueden observar los parámetros de la simulación. Cabe destacar que se ha escogido reducir el diámetro de uno de los cables a la mitad, para que la diferencia entre los diámetros fuera suficientemente grande para observar con mayor claridad en los resultados las diferencias.

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	0.5	1
Longitud (mm)	5	5

Tabla 4.14.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	90
Fuerza normal (N)	1
Tensión axil cable inferior (MPa)	0
Tensión axil cable superior (MPa)	0

Tabla 4.15.: Parámetros de la simulación

El proceso de simulación ha precisado de un mayor tiempo en este caso en comparación con el caso en el que los diámetros eran los mismos, llegando a durar aproximadamente 5 horas. Este aumento se debe a que al variar las dimensiones de los cables, se generan una mayor cantidad de elementos que los forman, generando un mayor coste computacional. El resultado obtenido en la simulación, se puede observar en la figura 4.22.

```

ELEMENT SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
CONTPRES (NOAVG)
RSYS=0
DMX =.395E-03
SMX =2508.56
    
```

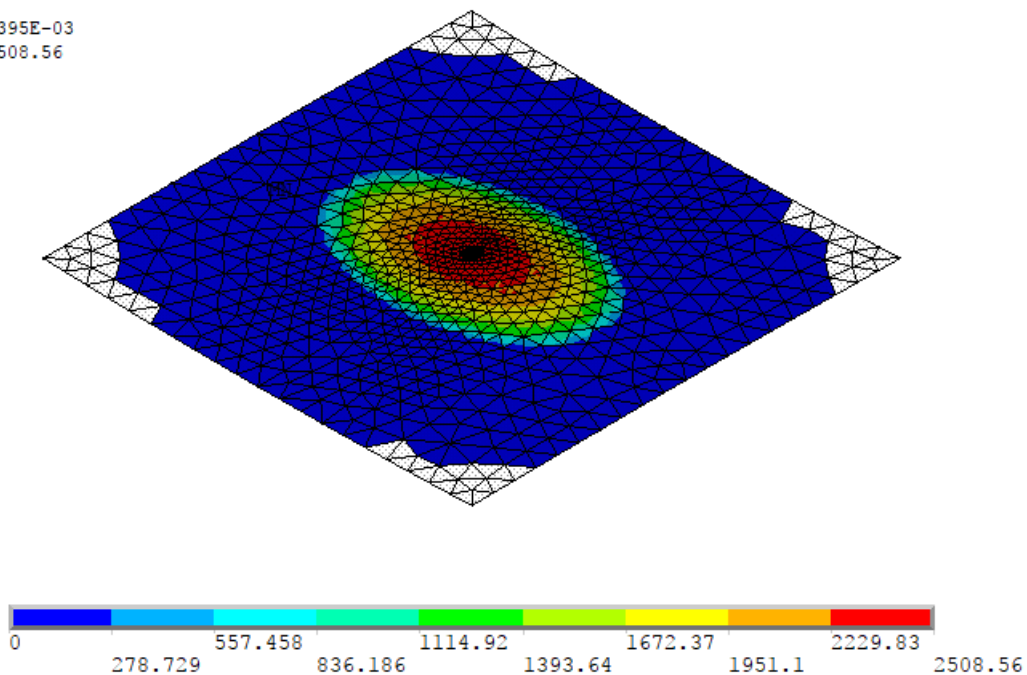


Figura 4.22.: Tensión normal obtenida en la simulación

Como era de esperar, se han obtenido unas tensiones normales mayores que en el resto de casos. Esto es debido que al tener un menor diámetro en uno de los cables, las tensiones que se generan son mayores, ya que la fuerza transmitida entre los cables se realiza en una superficie de menor tamaño. Además, la forma de la superficie de

contacto no es circular como en el resto de los casos, sino que en este caso vuelve a tener forma elíptica, siendo también un resultado esperado, ya que al tener los cables diámetros diferentes uno de ellos posee una mayor superficie de contacto para la penetración que se produce entre los cables en el contacto.

En la tabla 4.16, se muestra la comparación de la solución obtenida mediante la simulación con el resultado obtenido de los cálculos teóricos. En la figura 4.23, se muestran las tensiones normales obtenidas una vez realizada la representación en 3D. La forma de la superficie de contacto obtenida es similar a los casos en los que existe un determinado ángulo de cruce entre los cables diferente a los 90° , sin embargo, en este caso la orientación del semieje mayor es en la dirección del eje del cable de diámetro inferior. En la figura 4.24, se muestran las tensiones tangenciales obtenidas, que son similares a las obtenidas en el primer caso presentado, pero con la diferencia de que las tensiones máximas son mayores, y las mínimas también tienen un valor absoluto mayor. Esto es debido a que al producirse unas mayores tensiones normales, las tensiones tangenciales generadas son mayores también.

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	2508.56	2773.32
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0180	0.0165

Tabla 4.16.: Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos

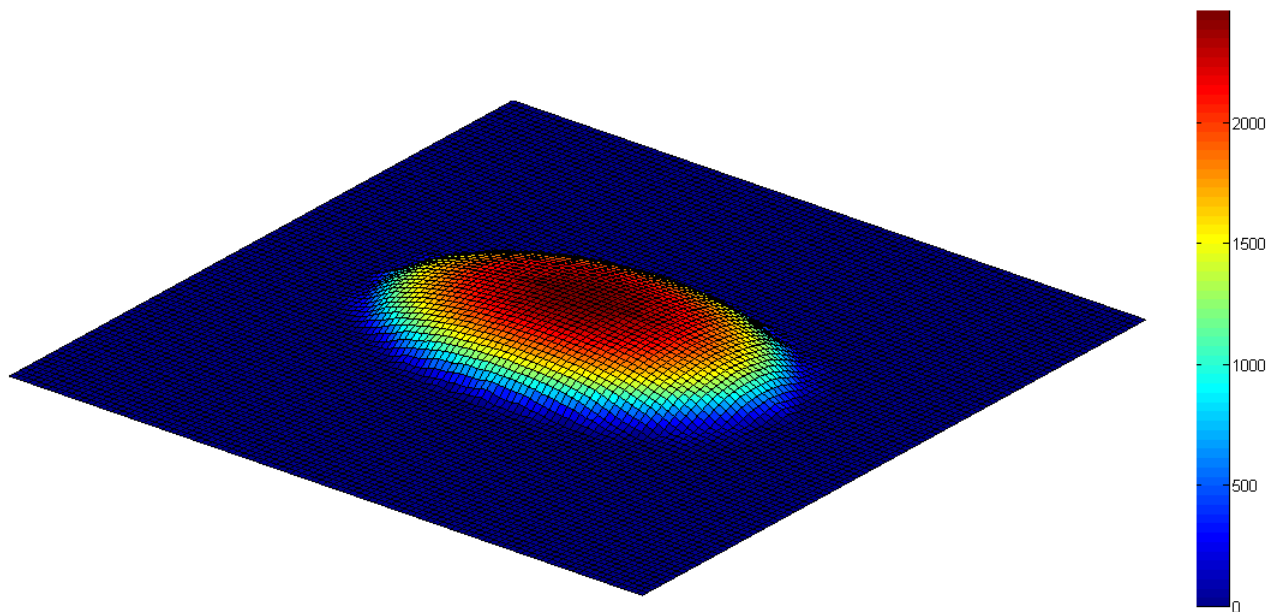


Figura 4.23.: Tensiones normales

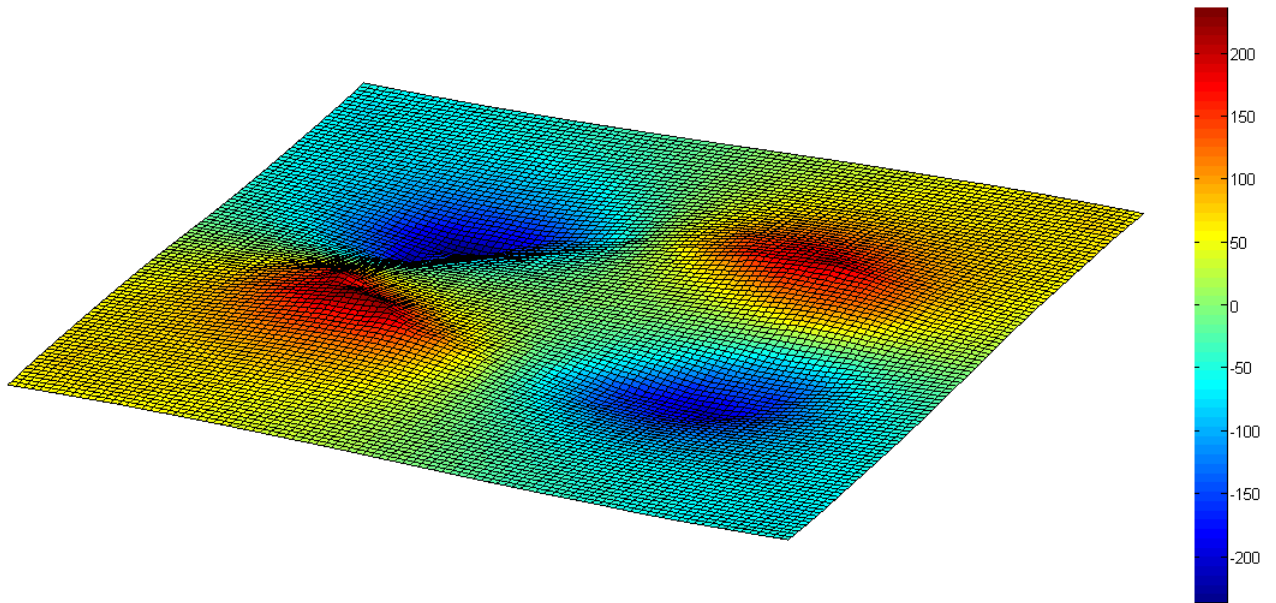


Figura 4.24.: Tensiones tangenciales

4.2.6. Modelo con cables de diferentes diámetros a 60° sometidos a fuerza normal

En este caso vamos a analizar un modelo con cables de diámetros diferentes cruzados en un ángulo de 60° . En la figura 4.25, se muestra el modelo a simular en esta sección, cuya única diferencia respecto al caso anterior es el ángulo de cruce.

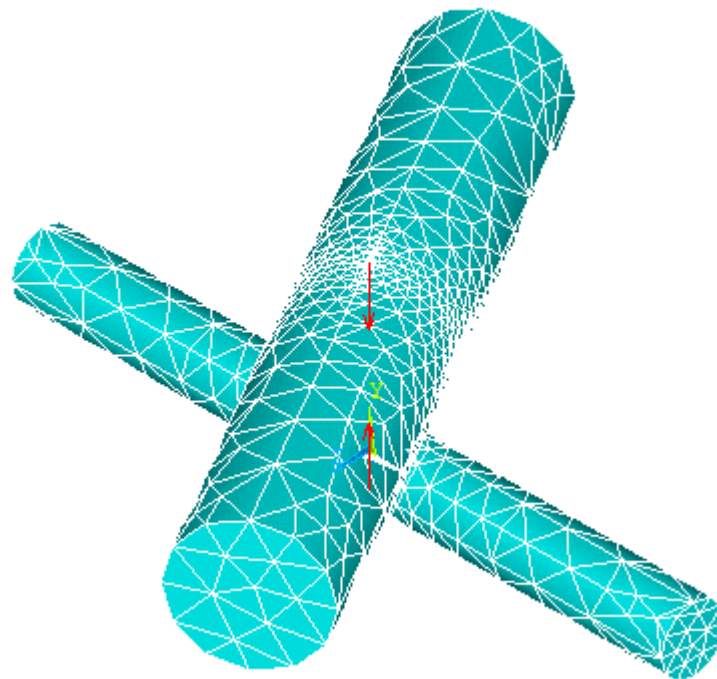


Figura 4.25.: Modelo con cables de diferentes diámetros a 60°

En las tablas 4.17 y 4.18 se muestran los parámetros que definen la simulación. Del mismo modo que en el caso anterior, el diámetro de uno de los cables se ha reducido a la mitad.

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	0.5	1
Longitud (mm)	5	5

Tabla 4.17.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	60
Fuerza normal (N)	1
Tensión axil cable inferior (MPa)	0
Tensión axil cable superior (MPa)	0

Tabla 4.18.: Parámetros de la simulación

En esta simulación, el tiempo empleado para obtener la solución ha sido mayor al del caso en el que los cables se cruzan a 90° , al igual que ocurría en el resto de casos con 60° .

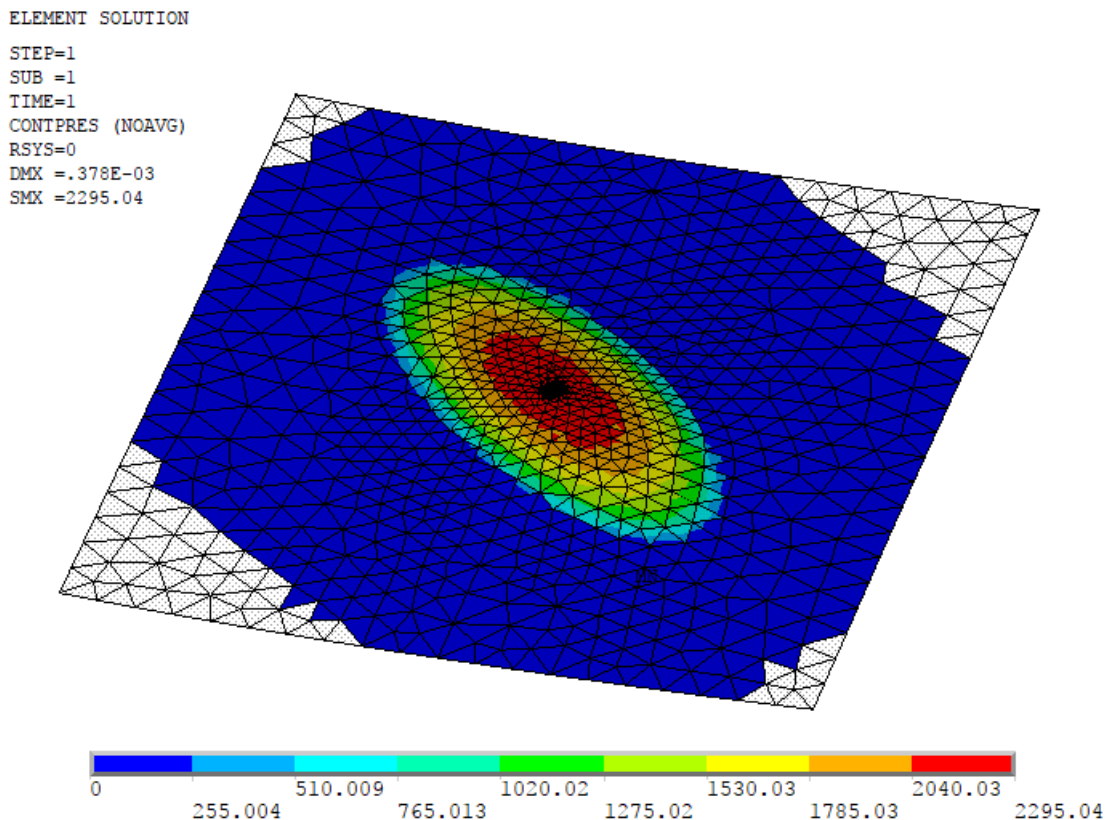


Figura 4.26.: Tensión normal obtenida en la simulación

La tensión normal máxima obtenida, del mismo modo que en el caso anterior, es mayor que en los casos con el mismo diámetro, por la misma razón que en el caso anterior.

En la tabla 4.19, se muestra la comparación del resultado obtenido con el resultado teórico, la diferencia entre ambos se mantiene en el mismo orden que en el resto de casos. En cuanto a las tensiones normales obtenidas, mostradas en la figura 4.27, se puede observar que en este caso la superficie de contacto es de forma elíptica, pero a diferencia de los demás casos con un ángulo de cruce de 60° en este la diferencia entre el semieje mayor y el semieje menor es mayor, por lo que se obtiene una superficie más estrecha y más alargada. Además en este caso el semieje mayor ya no sigue la dirección del eje del cable con menor diámetro, sino que se ha girado cierto ángulo. En las tensiones tangenciales generadas, no se observa una gran diferencia con los casos en los que el ángulo de cruce era de 60° .

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	2295.04	2601.66
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0219	0.0210

Tabla 4.19.: Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos

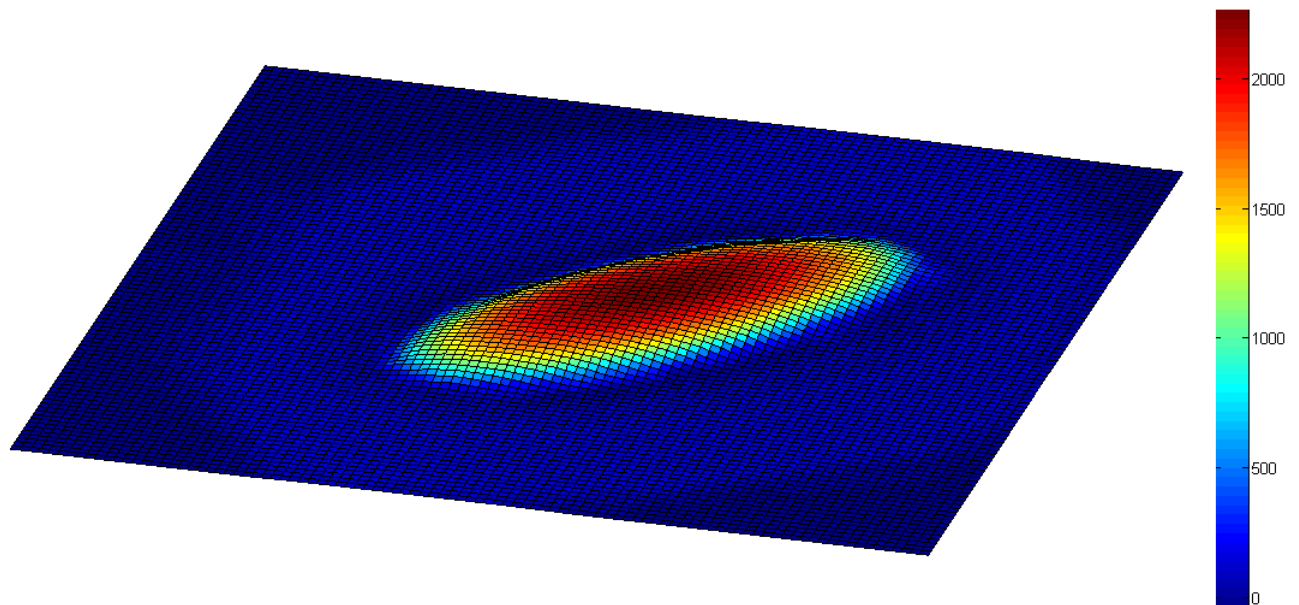


Figura 4.27.: Tensiones normales

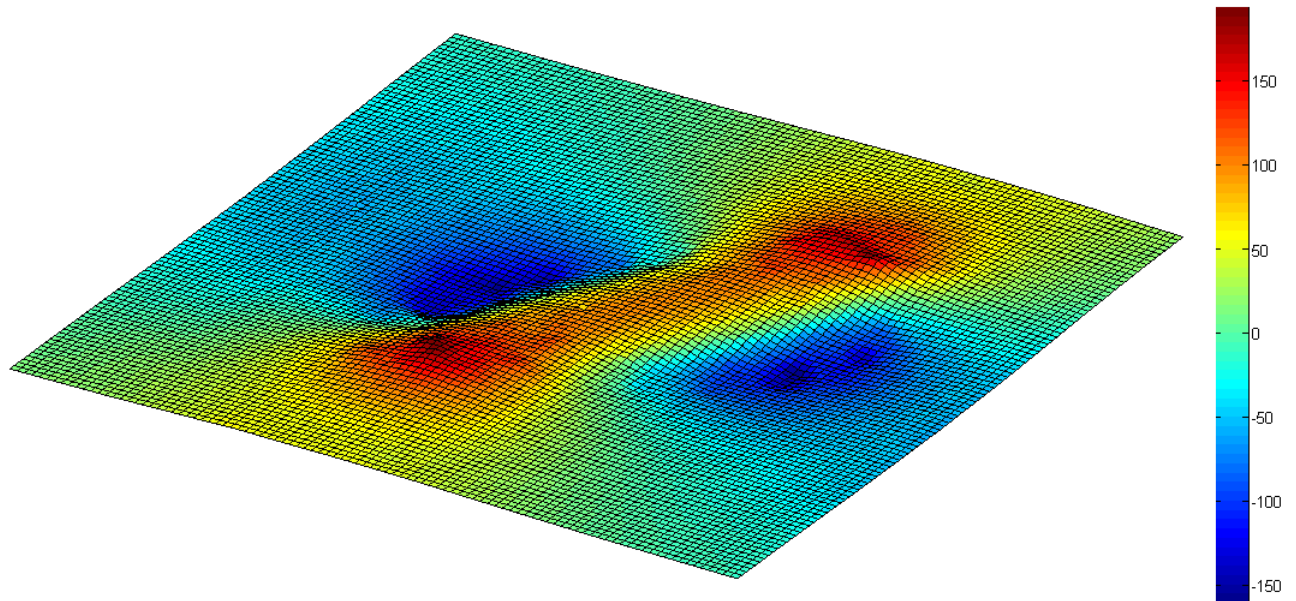


Figura 4.28.: Tensiones tangenciales

Hay que mencionar que en el caso de haber aumentado el diámetro de uno de los cables, los resultados serían similares en cuanto a la forma de la huella del contacto, pero su tamaño será diferente. Además, las tensiones normales generadas serían menores, y por lo tanto también las tensiones tangenciales.

4.2.7. Modelo con fuerza normal y tensión axial en uno de los cables a 90°

En este caso se va a realizar la simulación con uno de los cables con tensión axial, para ver los efectos que tiene sobre el resultado. Además, estará presente la fuerza normal presente en todas las simulaciones. En la figura 4.29, se puede observar el modelo con la fuerza normal y la tensión axial aplicada al cable superior, que es el cable del que se van a extraer los datos de las tensiones para ver el efecto que tiene la tensión axial.

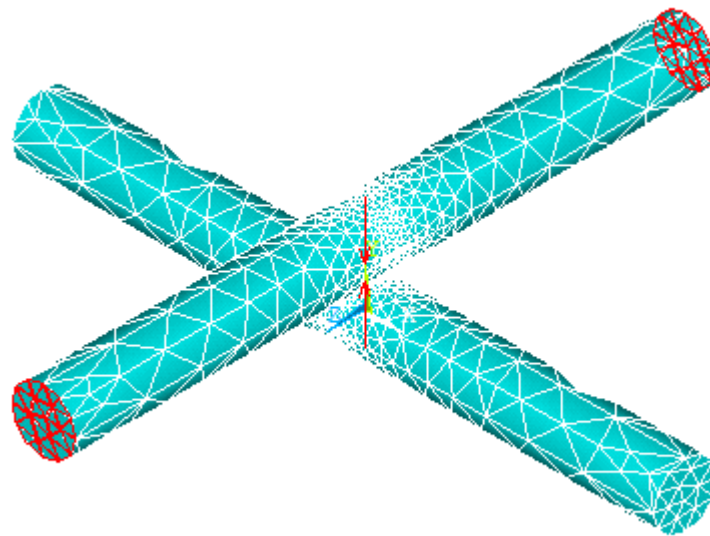


Figura 4.29.: Modelo simulado

Los parámetros de la simulación se muestran en las tablas 4.20 y 4.21.

	Dimensiones de los cables	
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	1	1
Longitud (mm)	10	10

Tabla 4.20.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	90
Fuerza normal (N)	1
Tensión axil cable inferior (MPa)	10
Tensión axil cable superior (MPa)	10

Tabla 4.21.: Parámetros de la simulación

4.2 Diferentes simulaciones realizadas

Para realizar esta simulación, se han tenido que modificar las opciones por defecto del solucionador de ANSYS además de reducir la malla ligeramente, debido a la no convergencia de la solución. Una vez modificado, se procede a realizar la simulación. La duración de ésta es larga, siendo las simulaciones con tensión axial las más duraderas. En la figura 4.30, se muestra el resultado obtenido.

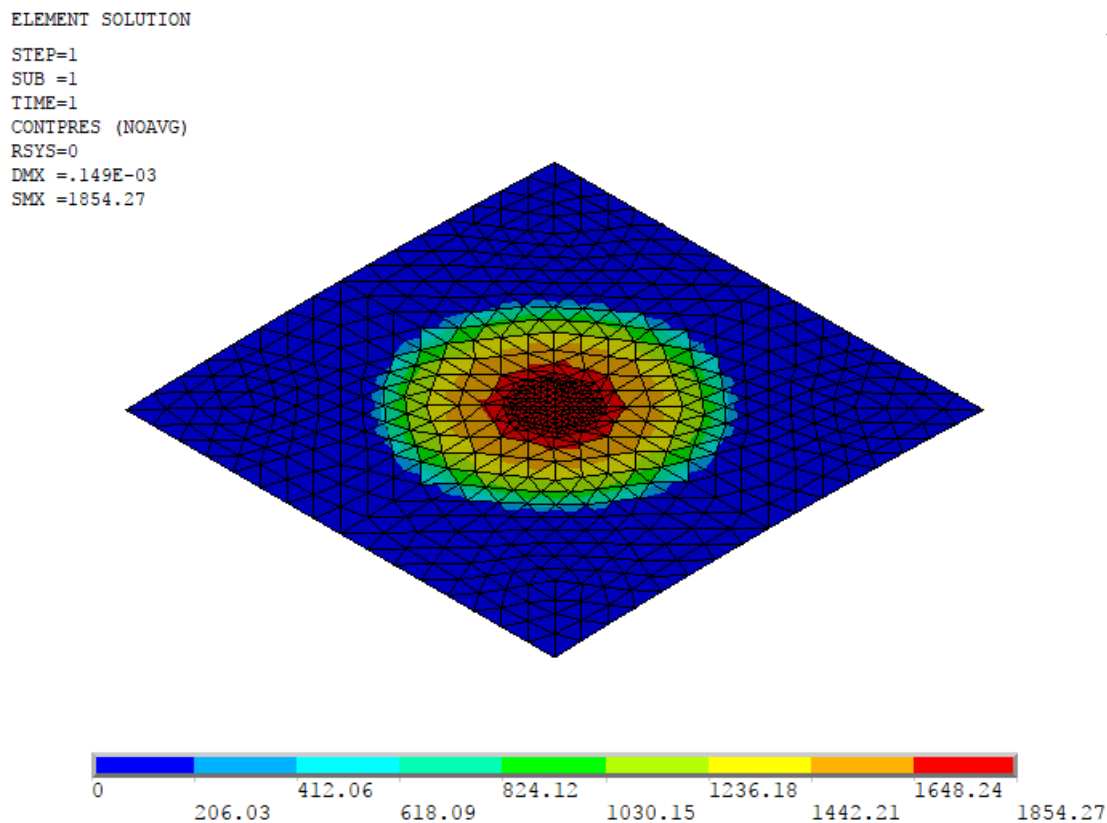


Figura 4.30.: Tensión normal obtenida en la simulación

En este caso, obtenemos una tensión normal ligeramente inferior respecto al caso en el que el hilo no está sometido a tracción. Esta disminución puede ser debida a la reducción de la malla.

La comparación con los resultados teóricos se muestra en la tabla 4.22. En esta ocasión, la diferencia con el resultado teórico es del 15 % aproximadamente. Pero en el caso teórico no se contempla la tracción aplicada al cable, es decir, que sería la solución teórica para el caso en el que no hay aplicada una carga axial.

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	1854.27	2176.13
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0160	0.0148

Tabla 4.22.: Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos

En la figura 4.31, se observa la solución obtenida representada en 3D. Los valores para tensiones normales obtenidos son similares al caso sin tensión axial, pero siendo de valores algo menores. Además se observa una distribución de tensiones más irregular alrededor del punto de contacto. En cuanto a las tensiones tangenciales, que aparecen representadas en la figura 4.32, se observa que los valores obtenidos son menores en comparación con los valores obtenidos en el caso sin tracción. Al igual que ocurría con las tensiones normales, hay una zona ligeramente irregular en la distribución de las tensiones tangenciales.

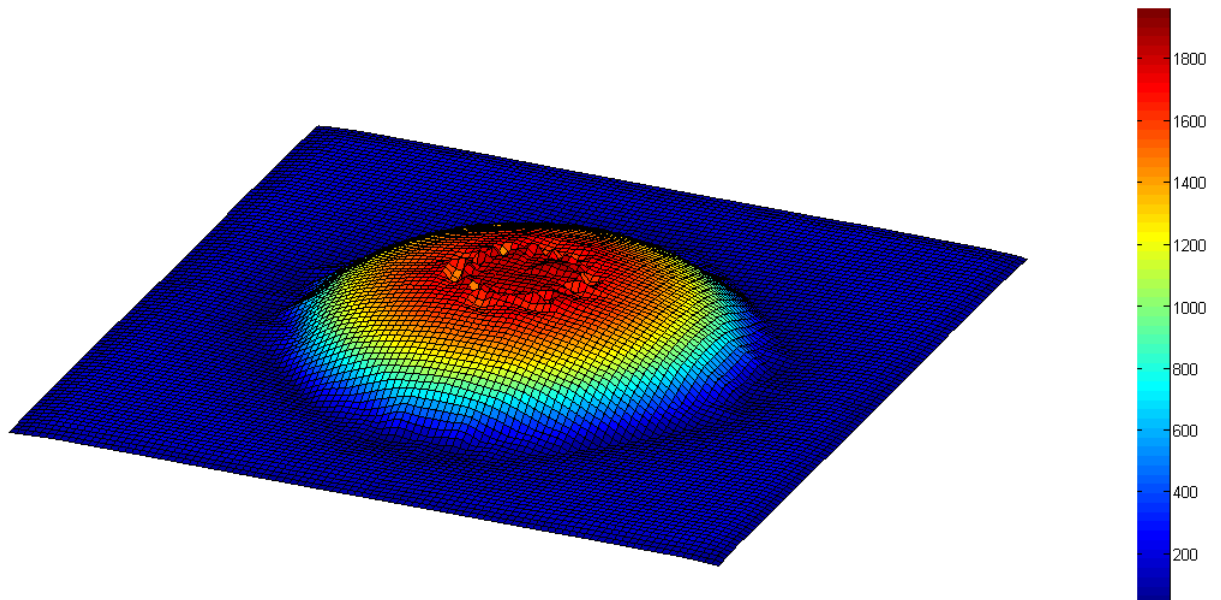


Figura 4.31.: Tensiones normales

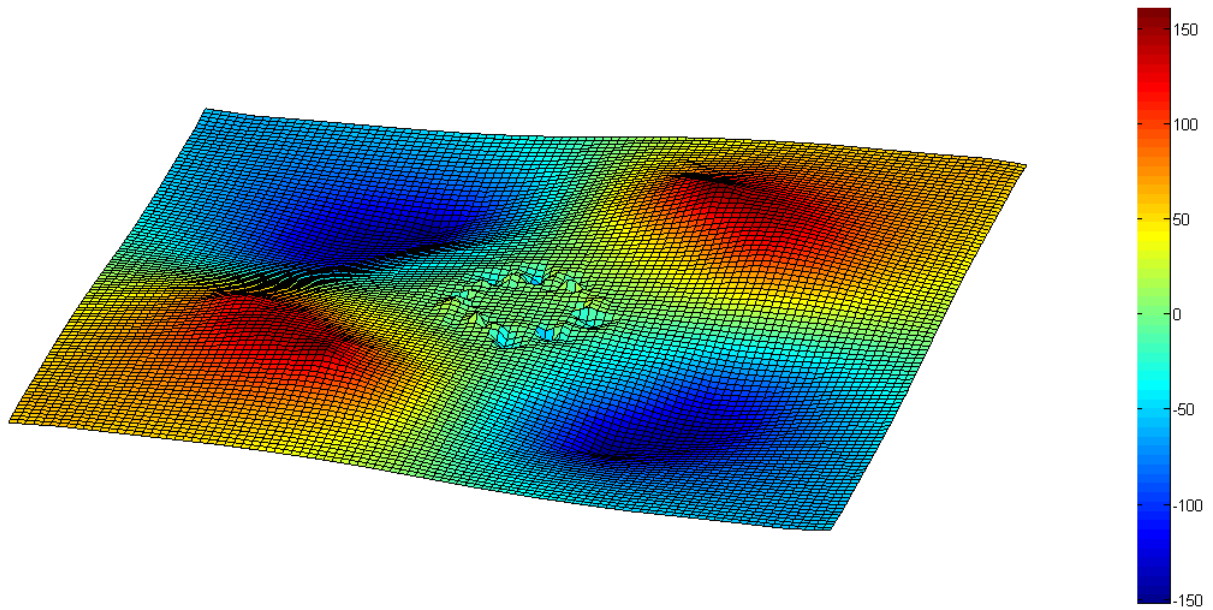


Figura 4.32.: Tensiones tangenciales

4.2.8. Modelo con fuerza normal y tensión axial en uno de los cables a 60°

A continuación se va a realizar una simulación como la del apartado anterior pero con un ángulo de cruce de 60°, siendo el modelo simulado el de la figura 4.33.

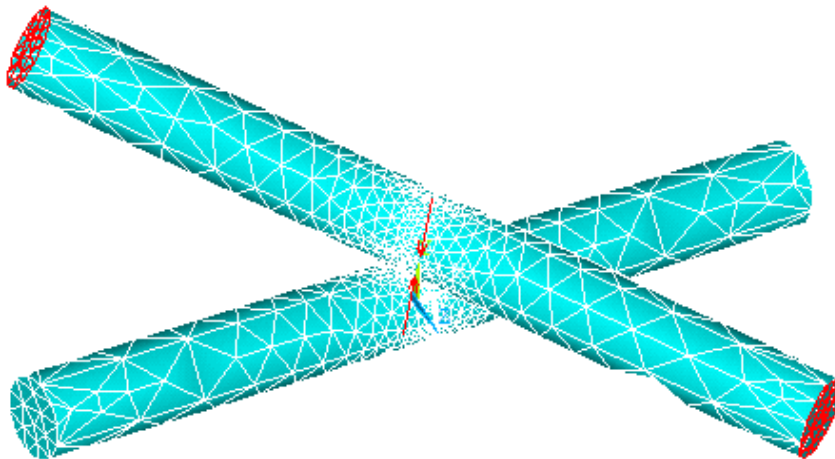


Figura 4.33.: Modelo simulado

Los parámetros de la simulación se muestran en las tablas 4.23 y 4.24.

Dimensiones de los cables		
	Cable inferior	Cable superior
Diámetro (mm)	1	1
Longitud (mm)	10	10

Tabla 4.23.: Dimensiones de los cables

Parámetros de la simulación	
Ángulo de cruce (grados)	90
Fuerza normal (N)	1
Tensión axil cable inferior (MPa)	10
Tensión axil cable superior (MPa)	10

Tabla 4.24.: Parámetros de la simulación

En esta simulación se ha obtenido el siguiente resultado en tensiones normales, que se muestra en la figura 4.34.

```

ELEMENT SOLUTION
STEP=2
SUB =1
TIME=2
CONTPRES (NOAVG)
RSYS=0
DMX =.171E-03
SMX =1846.78
    
```

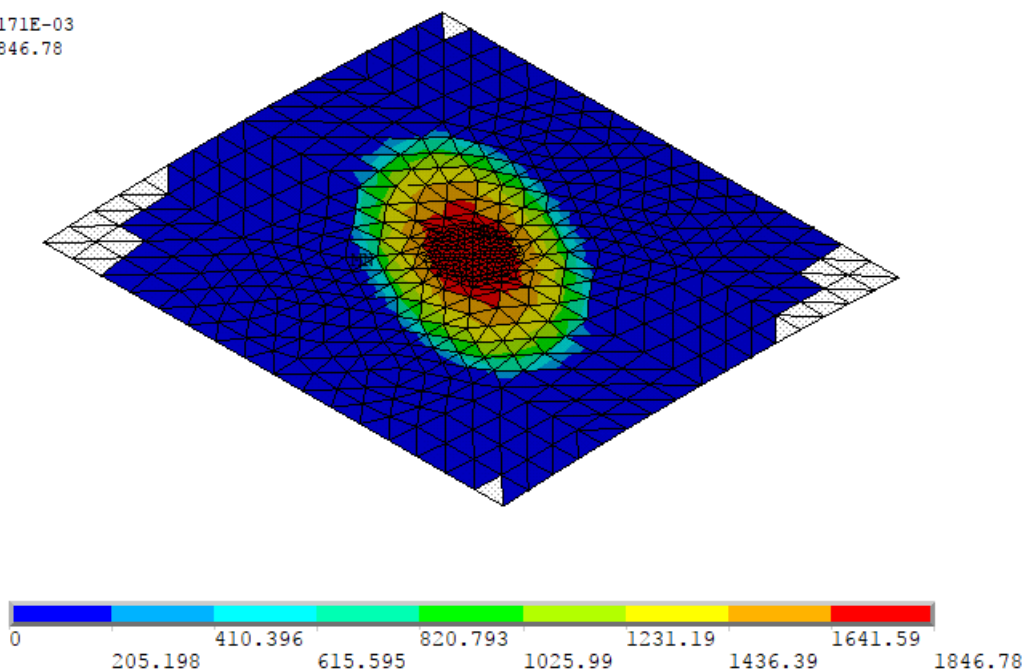


Figura 4.34.: Tensión normal obtenida en la simulación

Observamos una menor reducción de la tensión normal generada respecto a la de 90° , en comparación con el resto de simulaciones.

La comparación con los resultados teóricos, se muestra en la tabla 4.25. En este caso, la diferencia vuelve a ser del 10 % aproximadamente, siendo similar a los casos sin tensión axial. En cuanto a la longitud del semieje mayor, es muy similar también a los demás resultados obtenidos.

Comparación de resultados simulados y cálculos teóricos		
	Resultado de la simulación	Resultado teórico
Tensión máxima (MPa)	1846.78	2042.43
Longitud del semieje mayor (mm)	0.0228	0.0220

Tabla 4.25.: Comparación de resultados de la simulación y los cálculos teóricos

Al igual que ocurría en el caso anterior, se observa una distribución de tensiones algo irregular alrededor del punto de contacto. Como se puede observar en las figuras 4.35 y 4.36. Se aprecia una ligera reducción de los valores de las tensiones tangenciales obtenidas.

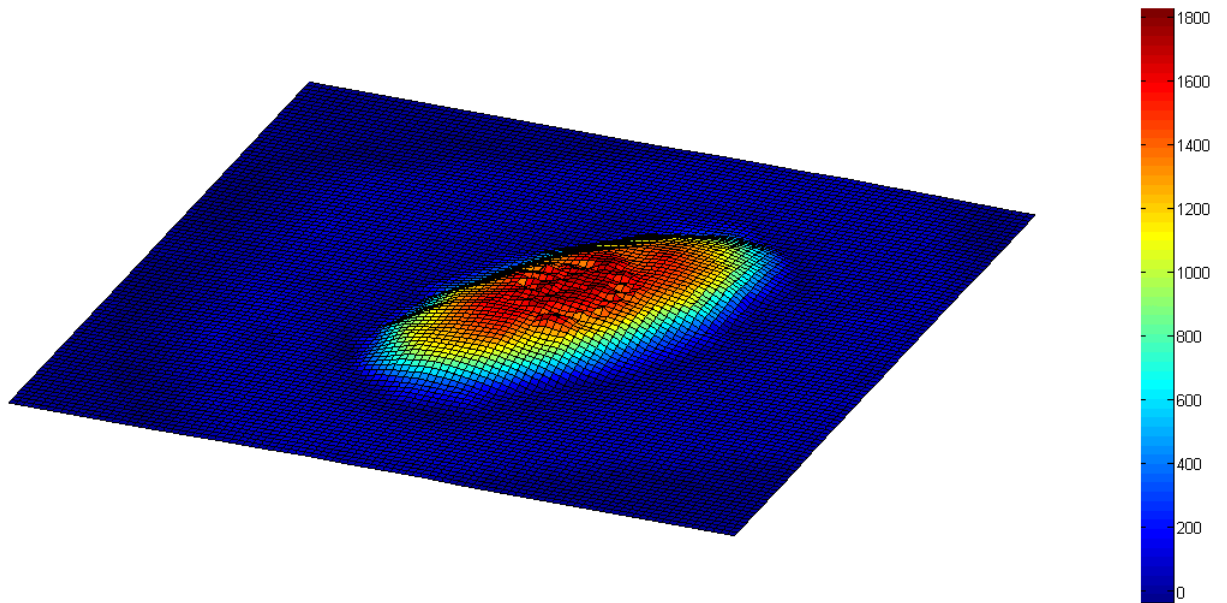


Figura 4.35.: Tensiones normales

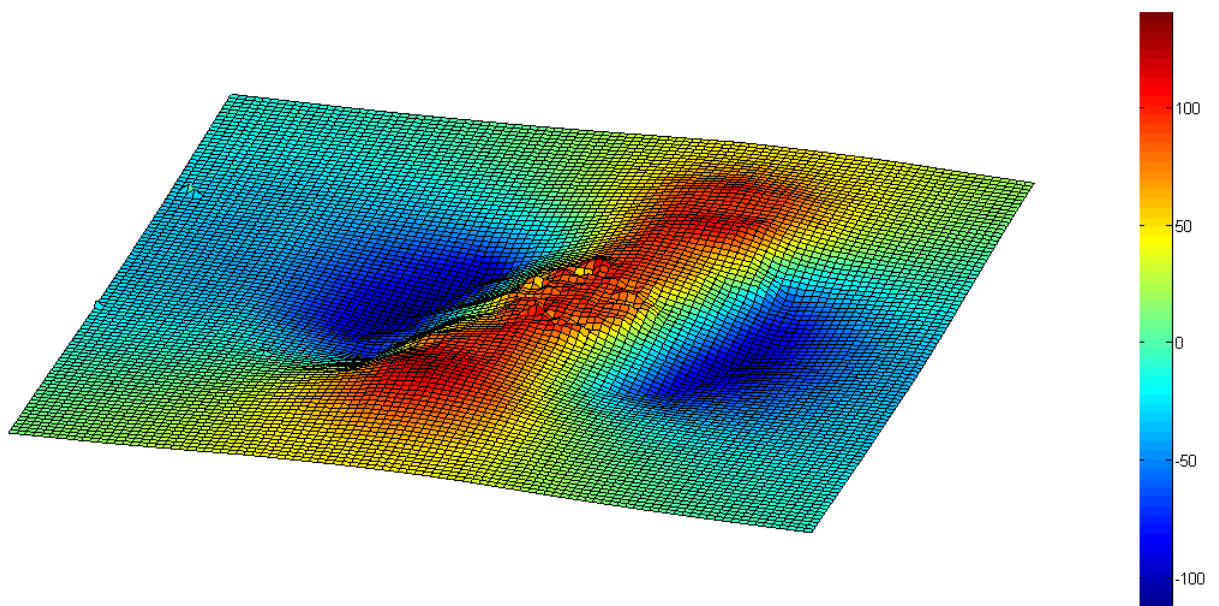


Figura 4.36.: Tensiones tangenciales

4.2.9. Modelo a 90° con una fuerza normal inferior

Se ha realizado este último caso para observar la diferencia de los resultados obtenidos en el caso de que la fuerza normal aplicada sea diferente. En este caso las

dimensiones de los cables y el ángulo es el mismo que en el primer caso analizado en este capítulo. La única diferencia entre ellos es la fuerza normal aplicada que en este caso es la mitad. El objeto de realizar esta simulación es ver el efecto que tiene sobre los resultados la aplicación de diferentes fuerzas.

El resultado obtenido en este caso se muestra en la figura 4.37. La tensión máxima obviamente es menor, sin embargo no es la mitad, como si lo es la fuerza aplicada. Esto es debido a que al disminuir la fuerza, también lo hace la superficie de contacto generada. Además, como el contacto se produce inicialmente en un único punto, las tensiones obtenidas son muy altas, independientemente de la fuerza aplicada.

El resto de resultados se han omitido, ya que los resultados son análogos a los ya vistos en el primer caso analizado.

ELEMENT SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

CONTPRES (NOAVG)

RSYS=0

DMX =.919E-04

SMX =1442.51

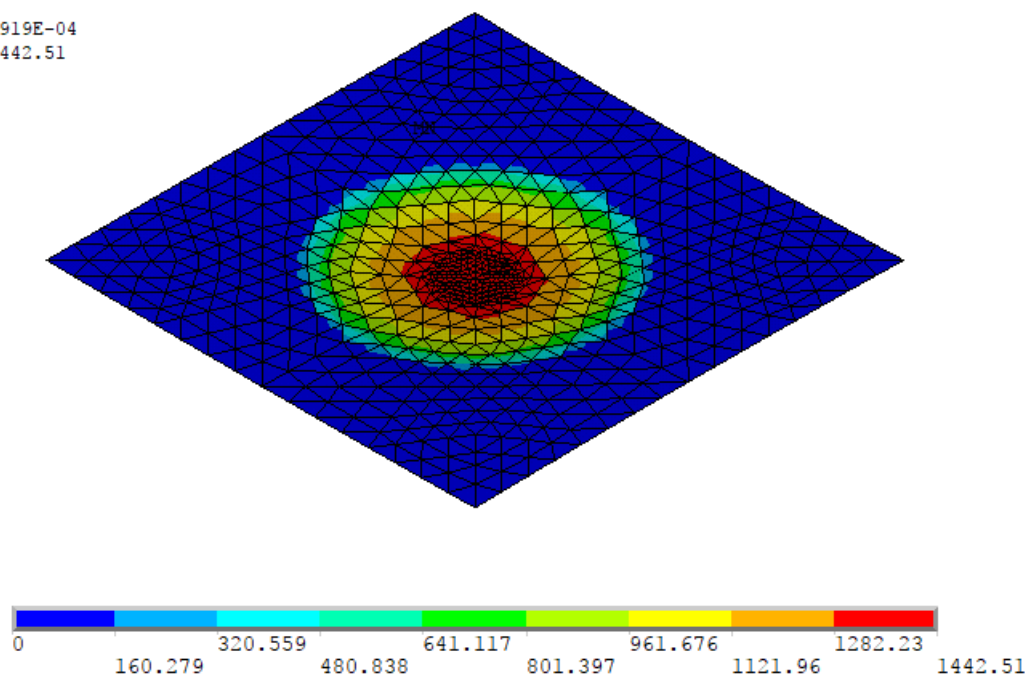


Figura 4.37.: Tensión normal obtenida en la simulación

5. Conclusiones y líneas futuras

En el presente capítulo se recogen las conclusiones generales y líneas futuras del trabajo de fin de grado.

5.1. Conclusiones generales

A partir del modelo desarrollado se han obtenido las tensiones generadas a consecuencia del contacto entre ambos cilindros. Las principales conclusiones generales se resumen a continuación.

5.1.1. Efecto del ángulo de cruce

El ángulo de cruce tiene una gran influencia en el resultado del contacto obtenido, a partir de los resultados obtenidos.

- **Efecto en la forma de la superficie del contacto:** La forma de la superficie de contacto dependerá en gran medida del ángulo de cruce, aumentando el semieje mayor y disminuyendo el semieje menor que define la elipse. En el caso particular en el que el ángulo de cruce es de 90° y los diámetros de ambos cables es el mismo, el semieje mayor y el semieje menor tendrán la misma longitud, obteniendo por lo tanto una superficie de contacto totalmente circular.
- **Efecto en las tensiones normales:** El ángulo de cruce también influye en las tensiones normales que se generan. Cuanto mayor es el ángulo, las tensiones normales máximas se disminuyen. Por lo tanto, las tensiones normales máximas se producen en el caso en el que el ángulo de cruce es de 90° , siendo el caso más desfavorable. En este caso la tensión normal máxima aumenta debido a que la superficie de contacto es la menor en este caso.
- **Efecto en las tensiones tangenciales:** Las tensiones tangenciales generadas dependen en gran parte de las tensiones normales. Por lo tanto los valores más altos aparecen en el caso en el que el ángulo de cruce es de 90° . En cuanto a la distribución de las tensiones en la zona de contacto, si se observan diferencias considerables. En el caso de 90° las tensiones tangenciales únicamente aparecen cerca de los bordes de la superficie del contacto, siendo en el punto en el que contactan ambos cables nula. No ocurre lo mismo cuando el ángulo disminuye,

en este caso, sí hay tensiones tangenciales en el centro de la superficie del contacto, además de que los valores máximos de las tensiones tangenciales en este caso son menores.

Finalmente se llega a la conclusión de que el caso más desfavorable que puede ocurrir en cuanto al ángulo de cruce, es aquel en el que los hilos se cruzan perpendicularmente, obteniendo las mayores tensiones normales como tangenciales.

5.1.2. Efecto de la presencia de fricción

La fricción tiene un efecto pequeño en los resultados obtenidos.

- **Efecto en la forma de la superficie de contacto:** La presencia de un coeficiente de fricción no tiene ningún efecto en la forma y tamaño de la superficie de contacto generada. Lo cual justifica que en las ecuaciones teóricas del contacto normal no se considere.
- **Efecto en las tensiones normales:** Del mismo modo que no tiene efecto en la forma de la huella, tampoco lo tiene en la tensión normal máxima generada.
- **Efecto en las tensiones tangenciales:** En este caso se observa una ligera disminución en los valores de las tensiones tangenciales generadas. En cuanto a la distribución de las tensiones en la superficie de contacto, no tiene un efecto apreciable.

En este caso, la conclusión a la que se llega es que la fricción no implica cambios importantes en el resultado obtenido.

5.1.3. Efecto de la diferencia de diámetros entre los 2 sólidos

Una diferencia entre los diámetros de los hilos, tiene un efecto importante en los resultados.

- **Efecto en la forma de la superficie de contacto:** En este caso, no será posible obtener una forma circular en la superficie de contacto. En el caso de un ángulo de cruce de 90° , la forma de la huella será elíptica. A medida que el ángulo de cruce disminuye, la forma de la superficie de contacto se va estrechando y estirando, es decir, el semieje mayor aumenta de longitud y el semieje menor al contrario.
- **Efecto en las tensiones normales:** Cuando el diámetro de uno de los cables aumenta de tamaño la tensión normal máxima generada será menor respecto al caso en el que ambos diámetros son el mismo. En el caso contrario, la tensión máxima aumentaría.
- **Efecto en las tensiones tangenciales:** Como las tensiones tangenciales dependen en gran medida de las tensiones normales, en este caso los valores

máximos variaran del mismo modo que las tensiones normales. En cuanto a la forma obtenida en la representación en 3D, no se observan cambios destacables respecto al caso en el que los diámetros son iguales.

Los diámetros tienen un gran efecto en la forma de la superficie de contacto, y por lo tanto también tiene efecto en las tensiones normales y tangenciales.

5.1.4. Efecto de la tracción en uno de los cables

La presencia de tensión axial tiene poca influencia en este caso.

- **Efecto en la forma de la superficie de contacto:** No se aprecian diferencias destacables en la superficie de contacto formada en las simulaciones, por lo que se llega a la conclusión de que influye muy poco.
- **Efecto en las tensiones normales:** En la simulación se observa una ligera disminución de la tensión normal máxima obtenida en el caso de 90° , mientras que en el caso de ángulo menor, las tensiones normales máximas son similares a los casos sin tensión axial.
- **Efecto en las tensiones tangenciales:** La diferencia más apreciable que se produce en los casos en los que hay presente tracción en uno de los cables es en las tensiones tangenciales, que sufren una disminución en los valores.

Cabe destacar que las tensiones obtenidas no están distribuidas de forma tan regular como sí ocurría en los casos sin tensión axial.

5.1.5. Efecto de la fuerza normal aplicada

- **Efecto en la forma de la superficie de contacto:** No tiene un efecto en la forma de la superficie de contacto, pero sí en su tamaño. Aumentando o disminuyendo en función de si se aumenta o disminuye la carga. Es destacable que esta disminución o aumento de tamaño no se produce en la misma medida que la fuerza, por ejemplo, comparando 2 casos en los que hay una relación de fuerzas normales del 50 %, obtenemos que la relación entre las longitudes del semieje mayor será de un 80 %.
- **Efecto en las tensiones normales:** En cuanto a las tensiones normales generadas, ocurre lo mismo que con el tamaño de la superficie de contacto, para una relación entre fuerzas normales del 50 %, obtenemos una relación de las tensiones normales del 80 % aproximadamente, por lo que la disminución es del mismo orden que el tamaño de la superficie de contacto.
- **Efecto en las tensiones tangenciales:** Ocurre del mismo modo que en los casos anteriores, ya que las tensiones tangenciales dependen en gran medida de las tensiones normales obtenidas.

La conclusión más destacable es que independientemente de la fuerza aplicada, se producen unas tensiones normales muy altas en el punto de contacto, debido a la pequeña superficie de contacto generada y que depende de la fuerza aplicada al tratarse de un contacto no conforme.

5.2. Líneas futuras

En este trabajo de fin de grado, se ha estudiado mediante elementos finitos el contacto entre dos hilos de acero cruzados con un cierto ángulo y el impacto que tienen sobre el contacto las diferentes cargas externas aplicadas. Se han realizado diferentes simulaciones, cuyos resultados se han comparado para observar las diferencias y analizarlas, para finalmente llegar a una conclusión final.

Se propone como líneas futuras, el estudio de la vida a fatiga de los hilos para las tensiones generadas en los diferentes casos, para poder observar el impacto que tendría en la vida del hilo el tipo de carga a las que esta sometido.

A. Anexo A: Código APDL

```
FINISH
/CLEAR
/input,menust,tmp,"
WPSTYLE,,,,,,,,0

!Parámetros iniciales
E=210e3
POISSON=0.3
DENSIDAD=0.00785
L=10
DIAM1=1
DIAM2=1
PI=acos(-1)
ANGULO_CRUCE=PI/2
FUERZA=1
AXIL_CABLE_ABAJO=0
AXIL_CABLE_ARRIBA=50
FUERZA_AXIL=40
NIVEL_REFINADO_PUNTO=5
NIVEL_REFINADO_LINEAS=0
CE=(2*(1-POISSON**2))/E
KD=1.5/(1/(DIAM1/2)+1/(DIAM2/2))
COSTETA=(KD/1.5)*(((1/(DIAM1/2))**2)+((1/(DIAM2/2))**2)+2*(1/(DIAM1/2))...
...*(1/(DIAM2/2))*cos(2*ANGULO_CRUCE))**(1/2))
*DIM,ALF, TABLE, 17
*DIM,BET, TABLE, 17
ALF(1)=1,1.070,1.150,1.242,1.351,1.486,1.661,1.905,2.072,2.292,2.600,...
...3.093,3.396,3.824,4.508,5.937,7.774
ALF(1,0)=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.92,...
...0.94,0.96,0.98,0.99
BET(1)=1,0.936,0.878,0.822,0.769,0.717,0.664,0.608,0.578,0.544,0.507,...
...0.461,0.438,0.412,0.378,0.328,0.287
BET(1,0)=0,0.10,0.20,0.30,0.40,0.50,0.60,0.70,0.75,0.80,0.85,0.90,0.92,...
...0.94,0.96,0.98,0.99
ALFA=ALF(COSTETA)
BETA=BET(COSTETA)
SEMIEJE_MAYOR=ALFA*((FUERZA*KD*CE)**(1/3))
SEMIEJE_MENOR=BETA*((FUERZA*KD*CE)**(1/3))
TENSION_MAX=(1.5*FUERZA)/(PI*SEMIEJE_MAYOR*SEMIEJE_MENOR)
TENSION_AXIL=FUERZA_AXIL/(PI*(DIAM1**2)/4)
AREA=1.5
/PREP7
ET,1,SOLID187
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
```

```

MPDATA,EX,1,,E
MPDATA,PRXY,1,,poisson
MPTEMP,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,densidad
K,1,0,0,0
K,2,0,DIAM1/2,0
K,3,0,DIAM1/2+DIAM2/2,0
K,4,0,DIAM1/2,0
K,5,L/2,0,0
K,6,-L/2,0,0
K,7,(L/2)*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2+DIAM2/2,(L/2)*sin(ANGULO_CRUCE)
K,8,-(L/2)*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2+DIAM2/2,-(L/2)*sin(ANGULO_CRUCE)
CIRCLE,1,DIAM1/2,5,2 CIRCLE,3,DIAM2/2,7,4
1,1,5
1,1,6
1,3,7
1,3,8

!EXTRUSION
AL,1,2,3,4
AL,5,6,7,8
VDRAG,1,,,,,9
VDRAG,1,,,,,10
VDRAG,2,,,,,11
VDRAG,2,,,,,12

!UNIFICAR VOLUMENES
VADD,1,2
VADD,3,4
K,33,AREA*SEMIEJE_MAYOR,0,0
K,34,AREA*SEMIEJE_MAYOR,DIAM1/2,0
CIRCLE,33,DIAM1/2,5,34
K,39,-AREA*SEMIEJE_MAYOR,0,0
K,40,-AREA*SEMIEJE_MAYOR,DIAM1/2,0
K,41,AREA*SEMIEJE_MAYOR*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2+DIAM2/2,AREA*...
...SEMIEJE_MAYOR*sin(ANGULO_CRUCE)
K,42,AREA*SEMIEJE_MAYOR*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2,AREA*SEMIEJE_MAYOR*...
...sin(ANGULO_CRUCE)
K,43,-AREA*SEMIEJE_MAYOR*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2+DIAM2/2,-AREA*...
...SEMIEJE_MAYOR*sin(ANGULO_CRUCE)
K,44,-AREA*SEMIEJE_MAYOR*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2,-AREA*SEMIEJE_MAYOR*...
...sin(ANGULO_CRUCE)
CIRCLE,39,DIAM1/2,5,40
CIRCLE,41,DIAM2/2,8,42
CIRCLE,43,DIAM2/2,8,44

!División de áreas con líneas
ASEL,,,3
ASEL,A,,6
LSEL,,,45
LSEL,A,,48
ASBL,ALL,ALL
ASEL,,,8

```

```

ASEL,A,,11
LSEL,,49
LSEL,A,,52
ASBL,ALL,ALL
ASEL,,18
ASEL,A,,21
LSEL,,57
LSEL,A,,60
ASBL,ALL,ALL
ASEL,,13
ASEL,A,,16
LSEL,,53
LSEL,A,,56
ASBL,ALL,ALL
K,500,(L/2)*SIN(ANGULO_CRUCE),0,-(L/2)*COS(ANGULO_CRUCE)
K,501,0,DIAM1/2+DIAM2/2,-L/2
CIRCLE,33,DIAM1,500,34
CIRCLE,39,DIAM1,500,40
CIRCLE,41,DIAM2,501,42
CIRCLE,43,DIAM2,501,44
AL,30,31,35,76
AL,77,78,79,80
AL,81,82,83,84
AL,85,86,87,88
ALLSEL

!División de áreas con áreas
ASEL,S,,1
ASEL,A,,3
CM,AREAS_DIVIDIR,AREA
ALLSEL
ASBA,AREAS_DIVIDIR,31,,DELETE
ASEL,S,,2
ASEL,A,,6
CM,AREAS_DIVIDIR,AREA
ALLSEL
ASBA,AREAS_DIVIDIR,32,,DELETE
ASEL,S,,8
ASEL,A,,18
CM,AREAS_DIVIDIR,AREA
ALLSEL
ASBA,AREAS_DIVIDIR,13,,DELETE
ASEL,S,,11
ASEL,A,,21
CM,AREAS_DIVIDIR,AREA
ALLSEL
ASBA,AREAS_DIVIDIR,16,,DELETE
K,76,DIAM1/2,0,0
K,77,DIAM1/2,DIAM1/2,0
K,78,-DIAM1/2,0,0
K,79,-DIAM1/2,DIAM1/2,0
K,80,(DIAM1/2)*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2+DIAM2/2,(DIAM1/2)*sin(ANGULO_CRUCE)
K,81,(DIAM1/2)*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2,(DIAM1/2)*sin(ANGULO_CRUCE)

```

```
K,82,-(DIAM1/2)*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2+DIAM2/2,-(DIAM1/2)*sin(ANGULO_CRUCE)
K,83,-(DIAM1/2)*cos(ANGULO_CRUCE),DIAM1/2,-(DIAM1/2)*sin(ANGULO_CRUCE)
CIRCLE,76,DIAM1,5,77
CIRCLE,78,DIAM1,5,79
CIRCLE,80,DIAM2,8,81
CIRCLE,82,DIAM2,8,83
AL,101,102,103,104
AL,105,106,107,108
AL,8,53,57,77
AL,78,79,80,100

!División de áreas
ALLSEL
LSEL,,33
LSEL,A,,73
LSEL,A,,74
LSEL,A,,75
LSBA,ALL,11,,DELETE
ALLSEL
LSEL,,71
LSEL,A,,70
LSEL,A,,72
LSEL,A,,41
LSBA,ALL,16,,DELETE
ALLSEL
LSEL,,25
LSEL,A,,67
LSEL,A,,68
LSEL,A,,69
LSBA,ALL,40,,DELETE
ALLSEL
LSEL,,17
LSEL,A,,64
LSEL,A,,65
LSEL,A,,66
LSBA,ALL,21,,DELETE
ALLSEL

!División de líneas
LESIZE,1,,15,5
LESIZE,4,,15,5
LESIZE,5,,15,5
LESIZE,14,,15,5
LESIZE,22,,15,5
LESIZE,38,,15,5
LESIZE,61,,15,5
LESIZE,89,,15,5
LESIZE,30,,10
LESIZE,31,,10
LESIZE,45,,10
LESIZE,48,,10
LESIZE,49,,10
LESIZE,52,,10
LESIZE,60,,10
```

```
LESIZE,76,,10
LESIZE,83,,10
LESIZE,84,,10
LESIZE,87,,10
LESIZE,88,,10
LESIZE,90,,10
LESIZE,91,,10
LESIZE,94,,10
LESIZE,95,,10
LESIZE,35,,16,0.1
LESIZE,56,,16,0.1
LESIZE,81,,16,0.1
LESIZE,82,,16,0.1
LESIZE,85,,16,0.1
LESIZE,86,,16,0.1
LESIZE,92,,16,0.1
LESIZE,93,,16,0.1
LESIZE,96,,16,0.1
LESIZE,97,,16,0.1
LESIZE,98,,16,0.1
LESIZE,99,,16,0.1
LESIZE,79,,10,10
LESIZE,106,,10,10
LESIZE,102,,10,10
LESIZE,114,,10,10
LESIZE,41,,8,2
LESIZE,108,,8,2
LESIZE,25,,8,2
LESIZE,100,,8,2
LESIZE,80,,8,2
LESIZE,107,,8,2
LESIZE,109,,8,2
LESIZE,33,,8,2
LESIZE,103,,8,2
LESIZE,104,,8,2
LESIZE,116,,8,2
LESIZE,115,,8,2
LESIZE,70,,10,0.1
LESIZE,72,,10,0.1
LESIZE,105,,10,0.1
LESIZE,67,,10,0.1
LESIZE,69,,10,0.1
LESIZE,78,,10,0.1
LESIZE,71,,10,0.1
LESIZE,68,,10,0.1
LESIZE,110,,10,0.1
LESIZE,111,,10,0.1
LESIZE,112,,10,0.1
LESIZE,113,,10,0.1
LESIZE,73,,10,0.1
LESIZE,74,,10,0.1
LESIZE,75,,10,0.1
```

```

LESIZE,101,,10,0.1
LESIZE,2,,10
LESIZE,3,,10
LESIZE,6,,10
LESIZE,7,,10
LESIZE,15,,1
LESIZE,62,,1
LESIZE,19,,1
LESIZE,63,,1
LESIZE,23,,1
LESIZE,39,,1
LESIZE,43,,1
LESIZE,27,,1

!Mallado
VMESH,ALL
ALLSEL

!Refinado en el punto de contacto
KSEL,,9
KSEL,A,,13
KREFINE,ALL,,NIVEL_REFINADO_PUNTO
ALLSEL

!Creación de conjuntos de nodos para el contacto
ASEL,,1
ASEL,A,,31
ASEL,A,,33
ASEL,A,,35
CM,AREAS_CONTACTO_ABAJO,AREA
NSLA,,1
CM,NODOS_CONTACTO_ABAJO,NODE

ALLSEL
ASEL,,2
ASEL,A,,8
ASEL,A,,18
ASEL,A,,32
CM,AREAS_CONTACTO_ARRIBA,AREA
NSLA,,1
CM,NODOS_CONTACTO_ARRIBA,NODE

!RESTRICCIONES DESPLAZAMIENTO

!Restricciones horizontales
ALLSEL
LSEL,,3
LSEL,A,,2
LSEL,A,,6
LSEL,A,,7
DL,ALL,,UX
DL,ALL,,UZ

!Restricciones verticales
DK,21,UY
DK,17,UY

```



```

DK,25,UY
DK,29,UY

!Creación del contacto
! /COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
! /GSAV,cwz,gsav,temp
MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3 RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
! Generate the target surface
NSEL,S,,NODOS_CONTACTO_ARRIBA
CM,_TARGET,NODE
TYPE,2
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
NSEL,S,,NODOS_CONTACTO_ABAJO
CM,_CONTACT,NODE
TYPE,3
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
! /PSYMB,ESYS,1
! /PNUM,TYPE,1
! /NUM,1
! EPLLOT
ESEL,ALL ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM

```

```
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
! /GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
! /COM, CONTACT PAIR CREATION - END
! /MREP,EPLOTT
FINISH

/PREP7
ALLSEL

!Configuración solver
/SOLU
EQSLV,PCG
NEQIT,200

!APLICACION FUERZA
FK,15,FY,-FUERZA
FK,11,FY,FUERZA

ALLSEL
SOLVE

!APLICACION AXIL
ALLSEL
ASEL,S,,17
NSLA,,1
SF,ALL,PRES,-AXIL_CABLE_ARRIBA

ALLSEL
ASEL,S,,22
NSLA,,1
SF,ALL,PRES,-AXIL_CABLE_ARRIBA
ALLSEL

SOLVE
SAVE
```

Bibliografía

- [1] *ANSYS Mechanical APDL Command Reference*.
- [2] Heinrich Hertz. *Gesammelte werke*, vol. 1. *Johann Ambrosius Barth, Leipzig*, 155, 1895.
- [3] Iñigo LLavori Osa. *Simulación numérica y validación experimental de fenómenos de desgaste y fatiga por fretting en aceros trefilados de reducido diámetro*, 2016.
- [4] Federico París. *Teoría de la Elasticidad*. Universidad de Sevilla, Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales, 1998.
- [5] Warren Clarence Young and Richard Gordon Budynas. *Roark's formulas for stress and strain*, volume 7. McGraw-Hill New York, 2002.