

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Análisis del comportamiento de un puente de fretting

Autor: Jose Manuel Lagares Solís

Tutor: Jesús Vázquez Valeo

**Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

# **Análisis del comportamiento de un puente de fretting**

Autor:

Jose Manuel Lagares Solís

Tutor:

Jesús Vázquez Valeo

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster: Análisis del comportamiento de un puente de fretting

Autor: Jose Manuel Lagares Solís

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, 2021

El Secretario del Tribunal



*A mi familia y Alejandra*

*A mis amigos*



# Agradecimientos

---

Empezaré esta sección de agradecimientos tal y como lo hice hace cinco años, cuando presenté mi TFG para la obtención de mi título de ingeniero aeroespacial.

Esta es la única oportunidad que disponemos a la hora de hacer públicos nuestros agradecimientos, ya que no tenemos esas graduaciones con birretes, palabras en público y grandes fiestas de las universidades americanas que tan idílicas se ven en las películas. Por ello, me gustaría mostrar mi más profundo y sincero agradecimiento a quienes me han ayudado, apoyado y levantado cuando yo no podía, no solo durante la realización de este proyecto, sino también durante estos años de máster que han sido bastante duros en todos los aspectos, incluyendo algo tan remoto en la vida de un ser humano como una pandemia.

Antes me gustaría comenzar por un reconocimiento. Reconocimiento a todas aquellas personas que se han cruzado en mi vida y que consiguieron sus estudios porque trabajaron para pagárselos. Este máster se ha dilatado mucho en el tiempo debido a, afortunadamente, estar trabajando. Pero a todas esas personas para las que trabajar no era una opción, sino una obligación, les quiero mostrar mi mayor admiración, porque ahora puedo empezar a entender lo duro y complicado que había sido para ellos alcanzar los estudios que siempre quisieron tener.

En primer lugar, me gustaría agradecer a Jesús la oportunidad de realizar un proyecto que me ha resultado tremendamente atractivo e ilusionante, pues me ha permitido conocer un pequeño porcentaje de una herramienta que tenía muchas ganas de aprender. Me gustaría agradecerle también que tuviera lo que para mí es fundamental en un docente: saber explicar muy bien lo que está enseñando y tener la paciencia suficiente para ello.

Agradecer, como no, a todos mis amigos. A mis amigos de siempre, los de un pequeño pueblo llamado Bollullos Par del Condado, por todo su apoyo en la distancia. A mis no tan nuevos amigos de Sevilla, a mi Conoarbeloa, por todo el apoyo, risas, fiestas y llantos que hemos vivido, y que están por llegar. Y a mis nuevos amigos, los YB, a los que conocí en mi primera experiencia laboral y que supieron aportarme tanto, por estar todos en la misma situación que yo.

Mención especial merecen Samuel, Dani y Juan Carlos, que empezaron siendo compañeros de carrera y se convirtieron en familia, años después tras una larga convivencia. La vida ya nos ha puesto a cada uno en lugar diferente, pero a la familia nunca se le olvida, y ellos, GM, lo son.

Gracias a cada miembro de mi familia, a todos aquellos que me apoyaron y a los que cualquier palabra o frase dirigida se queda corta.

A ti, Alejandra, te lo debo todo. Gracias por todo tu apoyo y comprensión, por todos tus consejos, por tirar de mí, por ayudarme y por un sinfín de cosas que me dejo atrás. Mi suerte es que sigues conmigo para seguir aportándome todo el bien que haces en este mundo en los nuevos retos que están por llegar.

Y para finalizar, por encima de todo gracias, papá, mamá, Cristina. Vosotros sois los verdaderos artífices de esto, y aquí tenéis, muchos años después, vuestra cosecha.

Gracias a todos.

*Jose Manuel Lagares Solís*

*Sevilla, 2021*



# Resumen

---

En diversas aplicaciones de ingeniería existen daños superficiales provocados por el fretting. Uno de los ensayos llevados a cabo para estudiar este fenómeno es el denominado puente de fretting.

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio mediante el método de los elementos finitos (MEF) del comportamiento de un puente de fretting en un ensayo. Para ello, se ha llevado a cabo un modelado en ANSYS, permitiendo la familiarización con una herramienta tremendamente potente pero que no ha sido usada a lo largo de los años de estudio.

En el primer capítulo se describirá brevemente en qué consiste el fretting y fatiga por fretting, dos tipos de daño que, si bien comparten el término “fretting”, tienen una sutil diferencia. También se hablará brevemente del ensayo a través del anillo de fretting.

En el segundo capítulo se hablará de forma resumida del objetivo que ha llevado a la realización de este proyecto, así como las variables estudiadas para analizar el comportamiento del puente de fretting.

El tercer capítulo está destinado a explicar, de una forma didáctica, cómo se ha llevado a cabo todo el grueso del proyecto, pues es en el modelado donde más tiempo se ha invertido. Se hablará desde la geometría y su mallado hasta la obtención de las variables objetivo.

Será en el capítulo cuatro donde se analicen los resultados obtenidos. Es necesario destacar que no existe posibilidad de contrastar empíricamente los resultados, por lo que al inicio de este proyecto se iba un poco “a ciegas”, esperando ver qué salía y si tenía sentido desde el punto de vista de la lógica, puesto que era con lo único contra lo que se podía contrastar.

Finalmente, en el último capítulo se han incluido algunas conclusiones, así como posibles áreas de mejora y vías de trabajo futuro.

El objetivo principal de este proyecto ha sido conseguido, que era el aprendizaje de una herramienta y un fenómeno completamente nuevo para el alumno de ingeniería aeronáutica.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Justificación del proyecto</b>	<b>5</b>
<b>3 Modelo numérico</b>	<b>7</b>
3.1 <i>Geometría</i>	7
3.2 <i>Mallado</i>	10
3.3 <i>Condiciones de contorno y aplicación de cargas</i>	14
3.4 <i>Obtención de variables objetivo</i>	17
3.4.1 Esfuerzos en el puente de fretting	17
3.4.2 Rotación de la pata del puente de fretting	17
3.4.3 Rodadura del puente de fretting	19
<b>4 Análisis de los resultados obtenidos</b>	<b>21</b>
4.1 <i>Variación con <math>\sigma</math></i>	24
4.1.1 Esfuerzos	24
4.1.2 Rotación	26
4.1.3 Rodadura	26
4.2 <i>Variación con <math>N</math></i>	29
4.2.1 Esfuerzos	29
4.2.2 Rotación	30
4.2.3 Rodadura	30
4.3 <i>Variación con la temperatura</i>	32
4.3.1 Esfuerzos	33
4.3.2 Rotación	37
4.3.3 Rodadura	39
<b>5 Conclusiones y vías de trabajo futuro</b>	<b>45</b>
<b>Anexo A: Código de ANSYS</b>	<b>49</b>
<b>Anexo B: Código de MATLAB</b>	<b>59</b>
<b>Referencias</b>	<b>71</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1 Valor del multiplicador $\gamma$ en función de la tensión aplicada	13
Tabla 3-2 Valores mínimos de N que garantizan la convergencia	16



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1 Tensiones en el fretting	1
Figura 1-2 Tensiones en la fatiga por fretting	2
Figura 1-3 Esquema de un anillo de fretting	2
Figura 1-4 Puente de fretting	3
Figura 3-1 Dimensiones del puente de fretting (cotas en mm)	7
Figura 3-2 Geometría a resolver tras aplicar simetría	8
Figura 3-3 Geometría modelada en ANSYS	9
Figura 3-4 Zoom del modelado de la geometría en la zona de contacto	9
Figura 3-5 Módulo de Young y coeficiente de Poisson del Inconel 718 a diferentes temperaturas	10
Figura 3-6 Delimitación de las zonas relevantes para el mallado	11
Figura 3-7 Par de contacto cilindro-superficie plana	11
Figura 3-8 Ubicación de los <i>keypoints</i> que definen la zona de contacto	12
Figura 3-9 Mallado del puente de fretting y la probeta	13
Figura 3-10 Zoom del mallado en la zona de contacto	14
Figura 3-11 Aplicación de la fuerza normal a través de un nodo maestro	15
Figura 3-12 Modelo definitivo en ANSYS	16
Figura 3-13 Deformación durante la tracción de la probeta	17
Figura 3-14 Deformación durante la compresión de la probeta	18
Figura 3-15 Cálculo del giro de un elemento a partir de los desplazamientos de sus nodos	18
Figura 3-16 Esquema de un posible estado de los elementos en el contacto y sus proximidades	19
Figura 4-1 Distribución de presiones en el contacto (en tracción)	21
Figura 4-2 Distribución de tensiones de fricción en el contacto (en tracción)	22
Figura 4-3 Distribución de presiones en el contacto (en compresión)	22
Figura 4-4 Distribución de tensiones de fricción en el contacto (en compresión)	23
Figura 4-5 Distribución de tensiones de Von Mises en la tracción	23
Figura 4-6 Distribución de tensiones de Von Mises en la compresión	24
Figura 4-7 $Q-\sigma$ a temperatura ambiente	25
Figura 4-8 $M-\sigma$ a temperatura ambiente	25
Figura 4-9 $\theta-\sigma$ a temperatura ambiente	26
Figura 4-10 $\delta_T-\sigma$ a temperatura ambiente	27
Figura 4-11 $\delta_C-\sigma$ a temperatura ambiente	27
Figura 4-12 $\delta_{izquierda}-\sigma$ a temperatura ambiente	28
Figura 4-13 $\delta_{derecha}-\sigma$ a temperatura ambiente	28
Figura 4-14 $Q-N$ a temperatura ambiente	29

Figura 4-15 M-N a temperatura ambiente	29
Figura 4-16 $\theta$ -N a temperatura ambiente	30
Figura 4-17 $\delta_T$ -N a temperatura ambiente	31
Figura 4-18 $\delta_C$ -N a temperatura ambiente	31
Figura 4-19 $\delta_{izquierda}$ -N a temperatura ambiente	32
Figura 4-20 $\delta_{derecha}$ -N a temperatura ambiente	32
Figura 4-21 $Q_T$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas	33
Figura 4-22 $Q_T$ -N a diferentes temperaturas	34
Figura 4-23 $M_T$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas	34
Figura 4-24 $M_T$ -N a diferentes temperaturas	35
Figura 4-25 $Q_C$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas	35
Figura 4-26 $Q_C$ -N a diferentes temperaturas	36
Figura 4-27 $M_C$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas	36
Figura 4-28 $M_C$ -N a diferentes temperaturas	37
Figura 4-29 $\theta_T$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas	37
Figura 4-30 $\theta_T$ -N a diferentes temperaturas	38
Figura 4-31 $\theta_C$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas	38
Figura 4-32 $\theta_C$ -N a diferentes temperaturas	39
Figura 4-33 $\delta_{izquierda}$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas (en tracción)	39
Figura 4-34 $\delta_{izquierda}$ -N a diferentes temperaturas (en tracción)	40
Figura 4-35 $\delta_{derecha}$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas (en tracción)	40
Figura 4-36 $\delta_{derecha}$ -N a diferentes temperaturas (en tracción)	41
Figura 4-37 $\delta_{izquierda}$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas (en compresión)	41
Figura 4-38 $\delta_{izquierda}$ -N a diferentes temperaturas (en compresión)	42
Figura 4-39 $\delta_{derecha}$ - $\sigma$ a diferentes temperaturas (en compresión)	42
Figura 4-40 $\delta_{derecha}$ -N a diferentes temperaturas (en compresión)	43
Figura 5-1 $\delta_T$ -N para diferentes tamaños del elemento	46
Figura 5-2 Q-N para diferentes tamaños del elemento	46
Figura 5-3 M-N para diferentes tamaños del elemento	47
Figura 5-4 $\theta$ -N para diferentes tamaños del elemento	47





# 1 INTRODUCCIÓN

Aunque el objetivo del proyecto no es estudiar el comportamiento de los materiales frente al fretting o la fatiga por fretting, para lo cual ya se han hecho numerosos estudios en esta misma escuela, a través de tesis doctorales y proyectos finales de carrera, es interesante iniciar esta memoria hablando brevemente sobre ellos, ya que lo que se ha estudiado aquí es el comportamiento de una de las herramientas usadas en los ensayos de fretting.

Como es sabido, la fatiga es un tipo de daño sufrido por un material cuando es sometido a cargas oscilatorias de pequeña amplitud. La distribución de tensiones a lo largo de todo el espesor del material es constante.

Tanto el fretting como la fatiga por fretting son dos tipos de daños superficiales que tienen lugar cuando dos cuerpos están en contacto bajo presión. En el contexto en el que se va a manejar este proyecto, los cuerpos que estarán en contacto serán el puente (que ejerce la presión), y la probeta (sobre la que se aplica una tensión en ambos extremos).

La diferencia entre ambos radica en la aplicación o no de la tensión en la probeta, y que afectará por supuesto a la distribución de tensiones [1].

En el caso del fretting no se tiene aplicación de tensión en la probeta. Aquí las tensiones totales que se producen son debidas a las tensiones locales producidas por el par de contacto y la aplicación de cargas del puente:

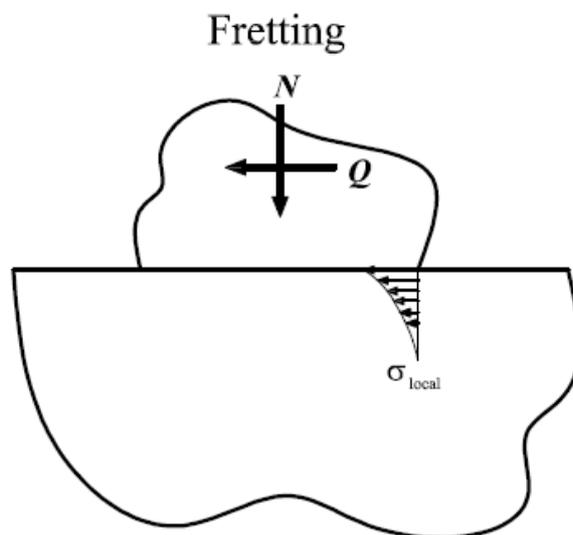


Figura 1-1 Tensiones en el fretting

Cuando además de la presión del puente, se tiene una tensión global aplicada sobre la probeta, se tiene la denominada fatiga por fretting. La distribución de tensiones que aparece es la suma de la tensión global (la aplicada a la probeta) y la tensión local (producida por el contacto con el puente):

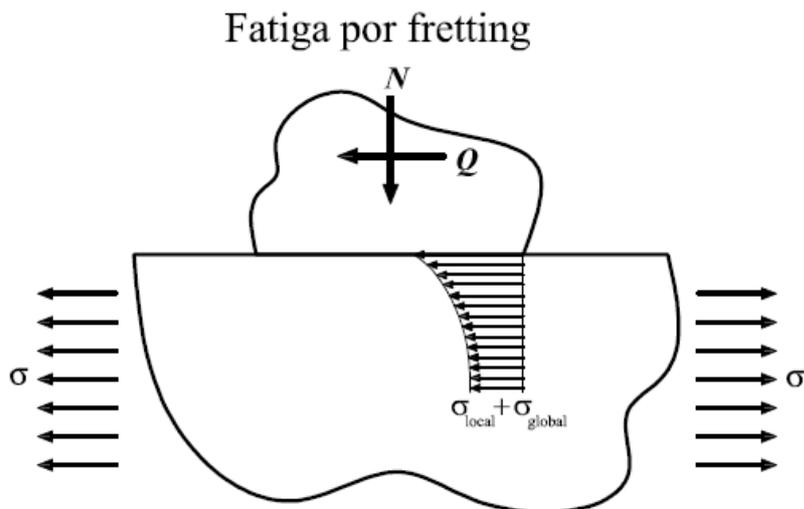


Figura 1-2 Tensiones en la fatiga por fretting

Existen en el ámbito ingenieril numerosos componentes sometidos a fretting o fatiga por fretting, tales como uniones atornilladas, roblonadas y preajustadas, cables metálicos trenzados, rotores de generadores, álabes de turbinas, etc. [1]

El caso de las turbinas, debido a que están sometidas a muy altas temperaturas, hace especialmente interesante que los ensayos de fretting o fatiga por fretting se realicen no solo a temperatura ambiente, sino a temperaturas superiores a las cuales van a operar.

Existen algunos ensayos para estudiar el comportamiento de un material a fatiga por fretting. Uno de ellos es el anillo de fretting, objeto de este proyecto [2].

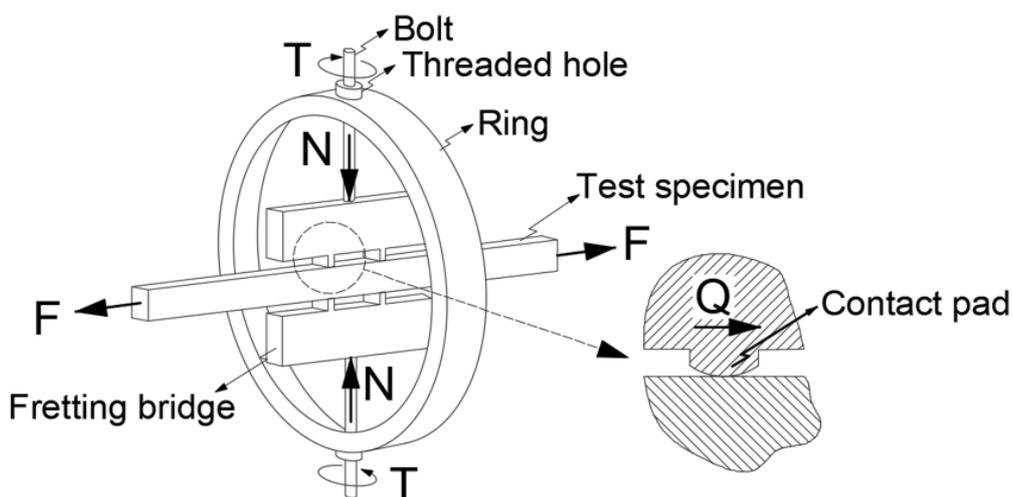


Figura 1-3 Esquema de un anillo de fretting

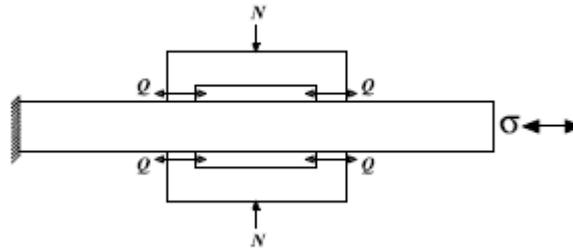


Figura 1-4 Puente de fretting

El funcionamiento del anillo de fretting mostrado es sencillo. A través de los tornillos superior e inferior se aplica una carga normal directamente al puente, que será transmitida a la probeta a través del contacto de ambos cuerpos. A la probeta además se le aplica una tensión, que unida a la presión ejercida por el puente hará que se tenga un ensayo de fatiga por fretting.

En la actualidad existen montajes más modernos, mediante actuadores hidráulicos. Estos montajes resultan muy útiles, ya que es posible controlar bien tanto los valores de la carga como los de tensión, así como usar diferentes geometrías [1].



## 2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

---

Existen numerosos proyectos y estudios destinados al estudio del fretting, como la estimación del tiempo de vida de una probeta, crecimiento de grietas, paliativos al fretting, etc.

Sin embargo, no se ha encontrado ninguno en el que se ponga el foco en el puente de fretting y se analice su comportamiento, estudiando variables que tal vez puedan ser de utilidad para futuros proyectos o diseños.

Como ya se ha mencionado, el objetivo de este proyecto es estudiar algunas variables que pueden resultar de interés cuando un puente de fretting está siendo ensayado. Para ello se hará un modelado en elementos finitos para su posterior análisis en ANSYS APDL.

Como se verá más adelante, el estudio se va a realizar para ver cómo varían las magnitudes elegidas en función de las variables de control del problema: carga normal aplicada sobre el puente, tensión global aplicada sobre la probeta y temperatura a la que se lleva a cabo el ensayo.

La variación de las variables de control hará que la geometría del mallado varíe, por lo que será necesario iniciar un proceso iterativo que actualice automáticamente el mallado. Esto se hará mediante MATLAB, un software de programación con el que el alumno de la escuela está familiarizado.

Las variables estudiadas a lo largo del proyecto son:

- Esfuerzos. Ya se ha mostrado en el primer capítulo que cuando se tiene una carga de presión ejercida por el puente y una tensión aplicada en la probeta aparece una carga tangencial  $Q$  y un momento alrededor del punto de contacto  $M$ .
- Rotación de la pata. Debido a la configuración del problema, cuando se aplique una tensión (de tracción y compresión) sobre la probeta, ésta se transmitirá al puente a través del contacto entre ambos y hará que la pata del puente de fretting gire.
- Rodadura. Es un movimiento acoplado a la rotación, por lo que es difícil distinguir ambos físicamente. Sin embargo, se ha definido aquí la rodadura como el desplazamiento de la zona de contacto.

Salvo los esfuerzos, ni la rotación de la pata ni la rodadura son datos arrojados directamente por ANSYS, por lo que será necesario manipular otros datos de forma que puedan obtenerse las magnitudes deseadas.

En principio cabe esperar que todas las variables crezcan conforme lo hace la tensión aplicada. Sin embargo, la variación con la carga normal es menos evidente, aunque parece que no debería tener mucha repercusión sobre la rodadura y la rotación, pero sí sobre los esfuerzos. Todo ello se comprobará a lo largo del proyecto.



## 3 MODELO NÚMÉRICO

En este capítulo se va a describir cómo se ha llevado a cabo el modelado 2D del puente de fretting en contacto con la probeta. Para ello, se ha hecho uso del programa ANSYS, concretamente su módulo APDL, que permite realizar el modelado de cualquier problema a partir de líneas de comando y textos. Ello permite realizar un modelado paramétrico del problema, en lugar de tener que hacer modificaciones continuas o rehacer el problema constantemente.

Para sacar las gráficas con los resultados se ha hecho uso del programa MATLAB, ampliamente usado durante los años de grado y máster, para poder obtener de forma iterativa la variación de las magnitudes objetivo frente al valor de la tensión aplicada (en tracción y compresión) y la fuerza normal.

### 3.1 Geometría

El puente de fretting utilizado en el modelo tiene las dimensiones que se indican en la siguiente imagen:

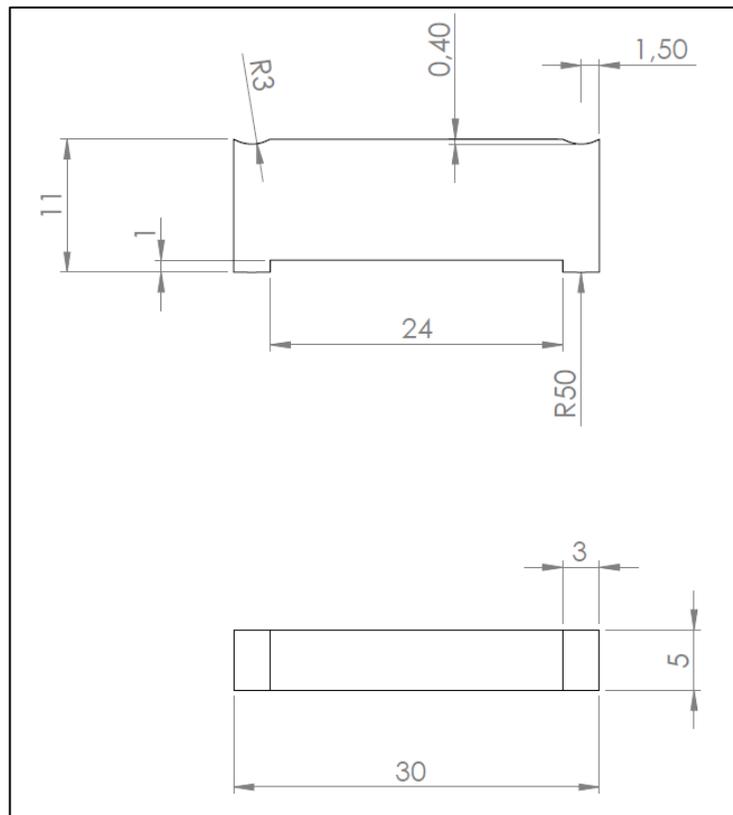


Figura 3-1 Dimensiones del puente de fretting (cotas en mm)

En este caso, dada la simetría tanto en la geometría como en las cargas, es posible aplicarla imponiendo las condiciones de contorno correspondientes:

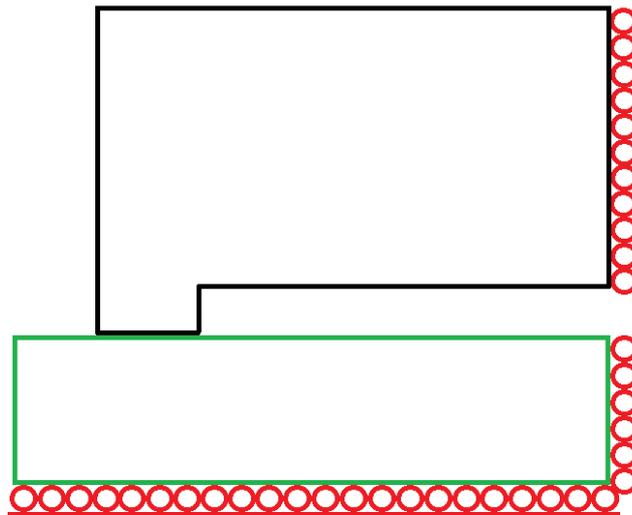


Figura 3-2 Geometría a resolver tras aplicar simetría

Tanto la creación del puente como de la probeta en APDL se ha hecho a base de *keypoints*. Además de los *keypoints* principales, como los que delimitan las aristas, centros de arcos, etc., también se han incluido una serie de *keypoints* adicionales por ciertos intereses como pueden ser el mallado, zonas a estudiar, etc.

La ubicación de estos *keypoints* en zonas de interés será comentada conforme vayan apareciendo en escena.

Los *keypoints* en APDL se crean con el comando '*K,NPT,X,Y,Z*', donde K es la función que llama a la creación del *keypoint*, NPT es la numeración que recibirá el *keypoint* a crear, y X,Y,Z son las coordenadas cartesianas.

Para generar la geometría se han unido los *keypoints* consecutivos, bien con líneas rectas a través del comando '*L,P1,P2*' (crea líneas rectas entre los *keypoints* P1 y P2), o bien con arcos a través del comando '*LARC,P1,P2,PC*' (crea un arco entre los puntos P1 y P2 con centro en PC).

Finalmente, se generan distintas áreas sobre las que posteriormente se realizará el mallado. Para ello se ha usado los comandos '*A,P1,P2,P3,P4...*', que genera áreas contenidas entre los *keypoints* P1, P2, P3, P4..., y '*AL,L1,L2,L3,L4...*', que hace lo propio a partir de líneas.

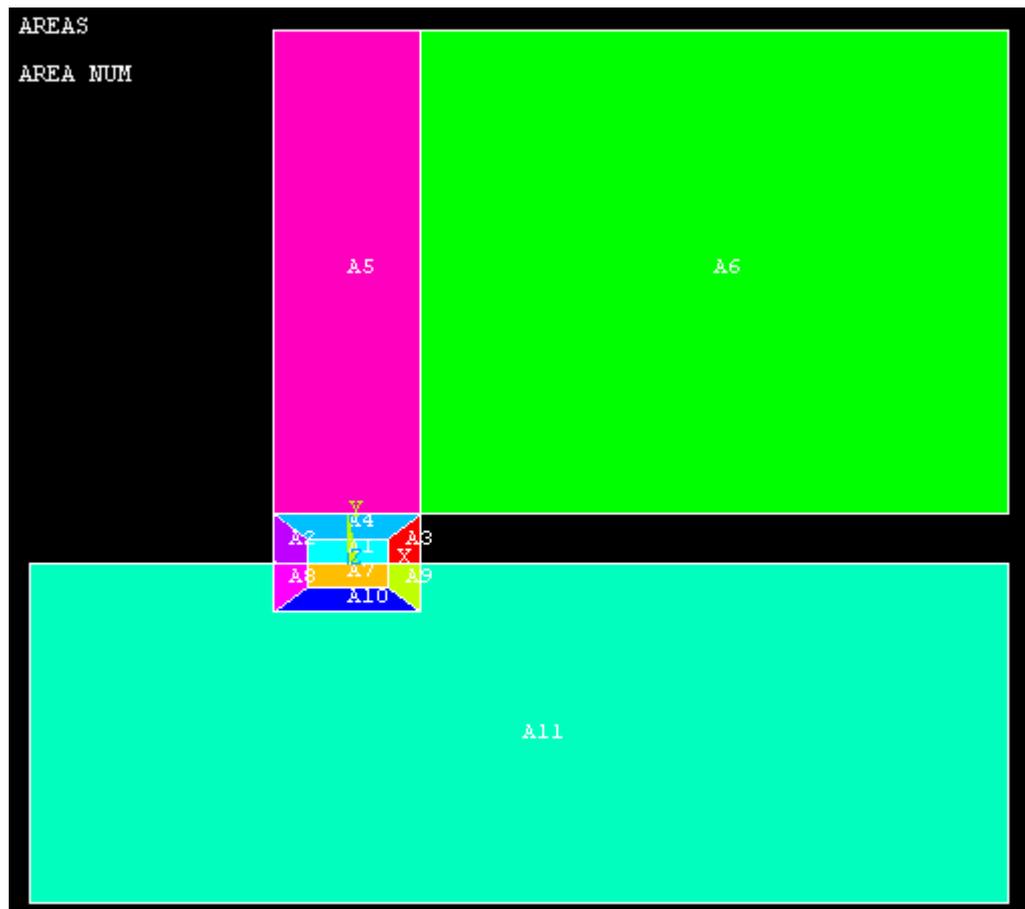


Figura 3-3 Geometría modelada en ANSYS

Recuérdese que en realidad la zona de contacto del puente es circular, pero al tener un radio mucho mayor que las dimensiones del propio puente no puede apreciarse bien, dando la sensación de que se trata de un contacto plano. No obstante, en la siguiente imagen se ha realizado un zoom en la zona de contacto, viéndose con un poco más de claridad la curvatura:

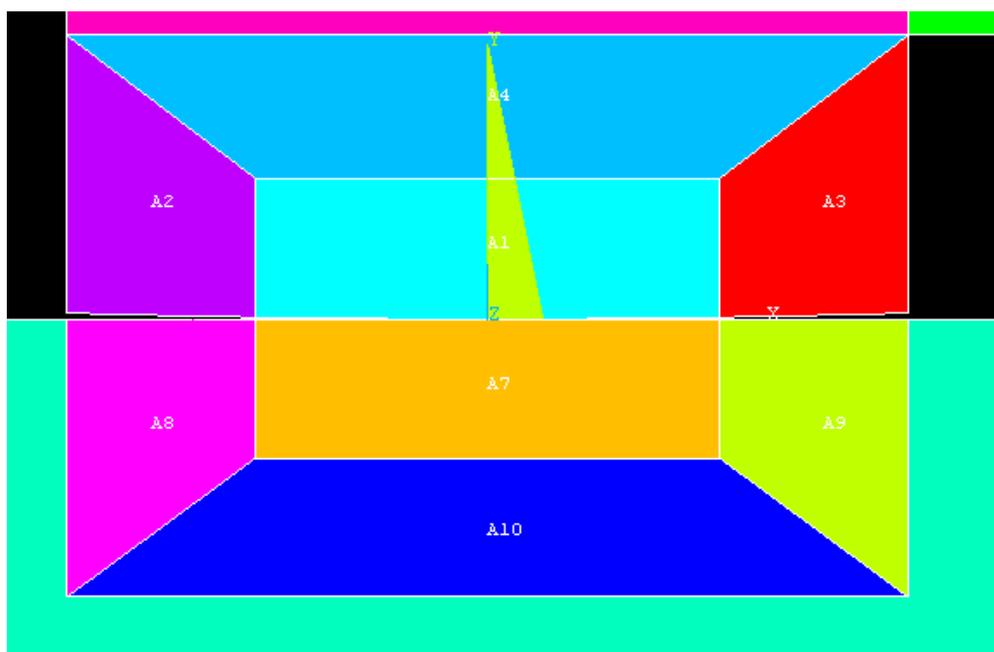


Figura 3-4 Zoom del modelado de la geometría en la zona de contacto

### 3.2 Mallado

Se ha escogido un elemento tipo PLANE182, pues es un elemento sencillo que satisface la configuración del problema y tiene como grados de libertad los desplazamientos en x e y, que son los permitidos en el problema.

El material usado es el Inconel 718, una aleación de níquel-cromo-molibdeno diseñado para resistir ambientes extremos (picaduras, altas temperaturas, corrosión, etc.). Al ser un material isótropo y elástico lineal es necesario proporcionar tanto el módulo de Young (E), como el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Como ya se ha comentado en el capítulo 1, en el proyecto se ha estudiado también la variación de las magnitudes objetivo con la temperatura. Ello se ha controlado a través de los valores de E y  $\nu$  proporcionados por el fabricante, a temperatura ambiente y a 650°C.

Los valores de E y  $\nu$  para diferentes temperaturas proporcionados por el fabricante vienen recogidos a continuación [3]:

INCONEL® alloy 718							
Table 4 - Modulus of Elasticity <sup>a</sup>							
Temperature, °F	Modulus of Elasticity, ksi x 10 <sup>3</sup>		Poisson's Ratio <sup>b</sup>	Temperature, °F	Modulus of Elasticity, ksi x 10 <sup>3</sup>		Poisson's Ratio <sup>b</sup>
	Young's Modulus	Torsional Modulus			Young's Modulus	Torsional Modulus	
70	29.0	11.2	0.294	1300	23.0	8.9	0.292
100	28.8	11.2	0.291	1400	22.3	8.5	0.306
200	28.4	11.0	0.288	1500	21.3	8.1	0.321
300	28.0	10.9	0.280	1600	20.2	7.6	0.331
400	27.6	10.8	0.280	1700	18.8	7.1	0.334
500	27.1	10.6	0.275	1800	17.4	6.5	0.341
600	26.7	10.5	0.272	1900	15.9	5.8	0.366
700	26.2	10.3	0.273	2000	14.3	5.1	0.402
800	25.8	10.1	0.271	<sup>a</sup> Hot-rolled flat heat-treated 1800°F/1 hr, A.C. + 1325°F/8 hr, F.C. 20°F/hr to 1150°F, held for total aging time of 18 hr. Dynamic testing involved frequencies of from 813 to 571 cps in bending and from 3110 to 2097 cps in torsion. <sup>b</sup> Computed from $(E-2G)/2G$ , where E is Young's Modulus and G is torsional modulus.			
900	25.3	9.9	0.272				
1000	24.8	9.7	0.271				
1100	24.2	9.5	0.276				
1200	23.7	9.2	0.283				

Figura 3-5 Módulo de Young y coeficiente de Poisson del Inconel 718 a diferentes temperaturas

A partir de aquí ya solo faltaba definir cómo iba a ser el mallado. El programa permite hacer un mallado completamente homogéneo, automático, extremadamente fino, etc. a lo largo de toda la superficie de puente y probeta. Sin embargo, esto no resulta eficiente en términos computacionales, además de proporcionar resultados demasiado precisos en zonas donde no interesan (alejadas del contacto) o imprecisos en zonas cercanas al contacto si se usase un mallado más basto.

Por ello, se decidió dividir tanto el puente como la probeta en tres zonas [4]:

- Zona A: corresponde a la zona próxima al contacto. Esta zona, al ser el contacto, es la más importante, por lo que aquí interesará que el mallado sea más fino y mapeado, con elementos cuadrangulares. Para hacer un ajuste personalizado del elemento se hace uso del comando 'LESIZE', que ajusta o bien el tamaño del elemento a lo largo de una línea, o configura el número de elementos en dicha línea. En este proyecto se ha optado por fijar el tamaño del elemento, quedando garantizada una cantidad de elementos en el contacto adecuada.
- Zona B: servirá de transición entre la Zona A y Zona C. Dado que el interés está focalizado en la Zona A, aquí el mallado será automático y con elementos triangulares, que tienen un menor costo computacional.
- Zona C: Es la más alejada de todas y la que apenas tiene interés. El mallado será igual que en la Zona B.

A continuación, puede verse gráficamente lo descrito anteriormente:

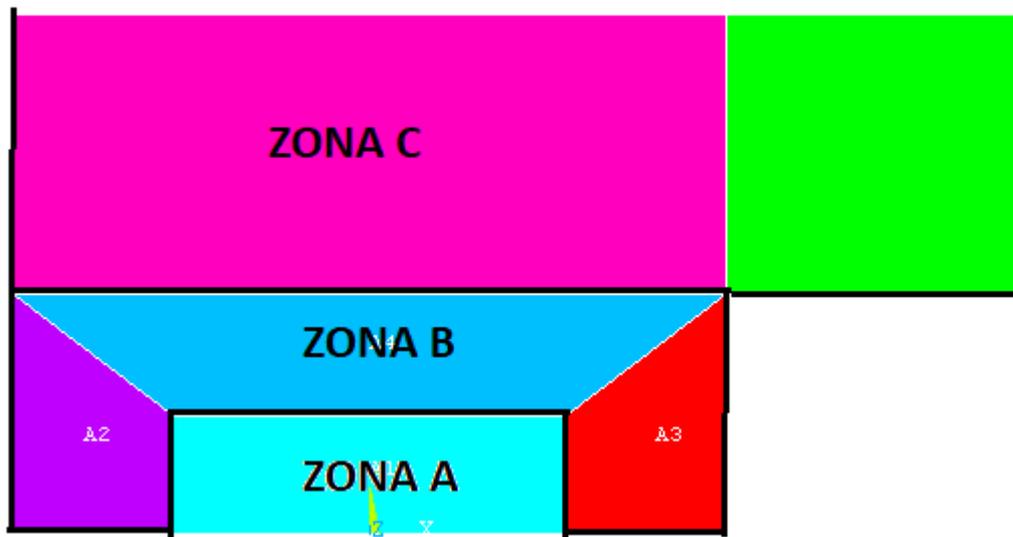


Figura 3-6 Delimitación de las zonas relevantes para el mallado

Es importante destacar que, aunque solo se haya mostrado las zonas sobre el puente, en la probeta se ha seguido el mismo criterio. Lo ideal es que un elemento del puente tenga su homólogo en la probeta para que no surja ningún problema en la creación del par de contacto (en este caso era posible).

Ahora bien, en el apartado anterior quedó pendiente la explicación de la ubicación de algunos *keypoints* intermedios que no correspondían con puntos básicos para definir la geometría del puente. Estos *keypoints* permitieron dividir todo el área del puente en otras áreas más pequeñas que luego resultarían interesantes de cara al mallado que se ha explicado antes.

Mientras que la zona C y parte de la zona B vienen definidas por límites puramente geométricos, la zona A viene definida después de haberse seguido un criterio diferente.

Haciendo uso de la mecánica de contacto de Hertz, que define el contacto entre un cilindro y una superficie plana de la siguiente manera [5]:

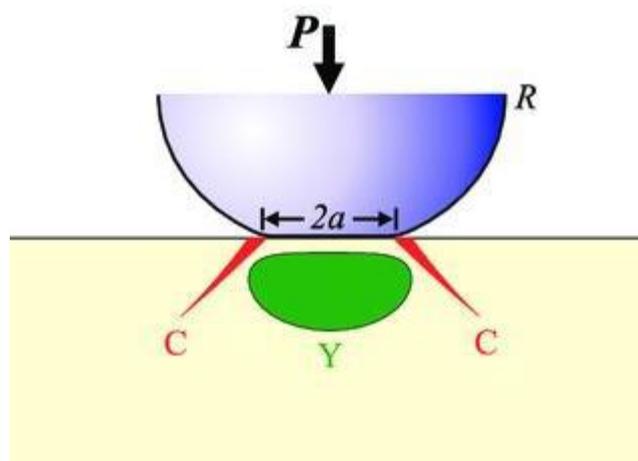


Figura 3-7 Par de contacto cilindro-superficie plana

El semiancho  $a$  de la zona de contacto viene dado por la siguiente expresión:

$$a = \sqrt{\frac{8PR(1 - \nu^2)}{\pi E}}$$

siendo  $P$  la fuerza que se está aplicando (N en este problema),  $R$  el radio (en este problema, la curvatura de la pata del puente), y  $E$  y  $\nu$  el módulo de Young y coeficiente de Poisson respectivamente.

Por tanto, la zona A definida en la geometría es aquella que se ve influenciada por el contacto y habitualmente suele definirse en torno a  $1.2a$  (hacia cada lado del contacto).

Sin embargo, la probeta va a estar sometida a una tensión global de tracción y compresión, que al estar en contacto con el puente hará que la zona de contacto se desplace. El par de contacto, como se verá más adelante, se construye a partir de la definición de un grupo de nodos destinados a este fin (en este caso, todos los nodos que definen el borde inferior de la zona A).

Si la zona de contacto se mueve por efecto de la tracción-compresión, de forma que el contacto físico se produzca en una zona donde no hay nodos definidos en el par de contacto, ANSYS no arrojará una solución válida.

De esta forma, el límite inferior de la zona de contacto tendrá una longitud  $x_a$  y, dado que la zona de contacto del puente es curva, será necesario también calcular la coordenada  $y_a$ , quedando configurados los *keypoints* con coordenadas  $(x_a, y_a)$  y  $(-x_a, y_a)$  que formaran el arco de la zona A del puente:

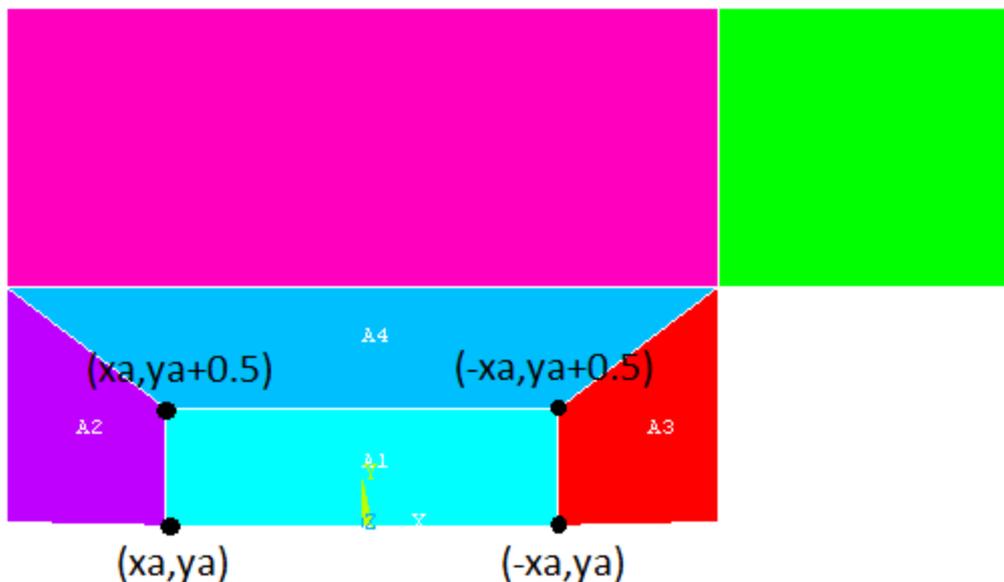


Figura 3-8 Ubicación de los *keypoints* que definen la zona de contacto

Por simple geometría, las coordenadas vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$x_a = \gamma \cdot a$$

$$y_a = R \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{x_a}{R}\right)\right)$$

Sin ninguna razón de peso, más de allá de coger un área considerable pero prudente, se ha definido la altura de la zona A como  $y_a+0.5$ , de forma que ocupe la mitad de la pata, formando por tanto una especie de “cuadrilátero”.

Como puede verse, la coordenada  $x_a$  se ha definido en función de un parámetro  $\gamma$ . Este parámetro no es más que un multiplicador que definirá la zona de influencia, y por tanto el tamaño total de la zona A. Será mayor cuanto mayor sea el valor de la tensión global aplicada, ya que la zona de contacto se desplazará más, por lo que hará falta definir una zona de influencia cada vez mayor.

En la siguiente tabla vienen recogidos los valores que se han usado para el multiplicador  $\gamma$  en este proyecto, en función del valor de la tensión-compresión aplicada:

$\sigma_{\text{global}}$ (MPa)	$\gamma$
100	1.35
200	1.40
300	1.45
400	1.50
500	1.55
600	1.60

Tabla 3-1 Valor del multiplicador  $\gamma$  en función de la tensión aplicada

Tras esto, se crea el mallado a través del comando 'AMESH', que crea el mallado en las áreas seleccionadas de forma automática, respetando cualquier ajuste que se haya hecho en algún elemento de la zona, como el tamaño del elemento para las líneas que estén contenidas en el área (y que se controló con el comando 'LESIZE' como se comentó anteriormente).

El resultado es el siguiente:

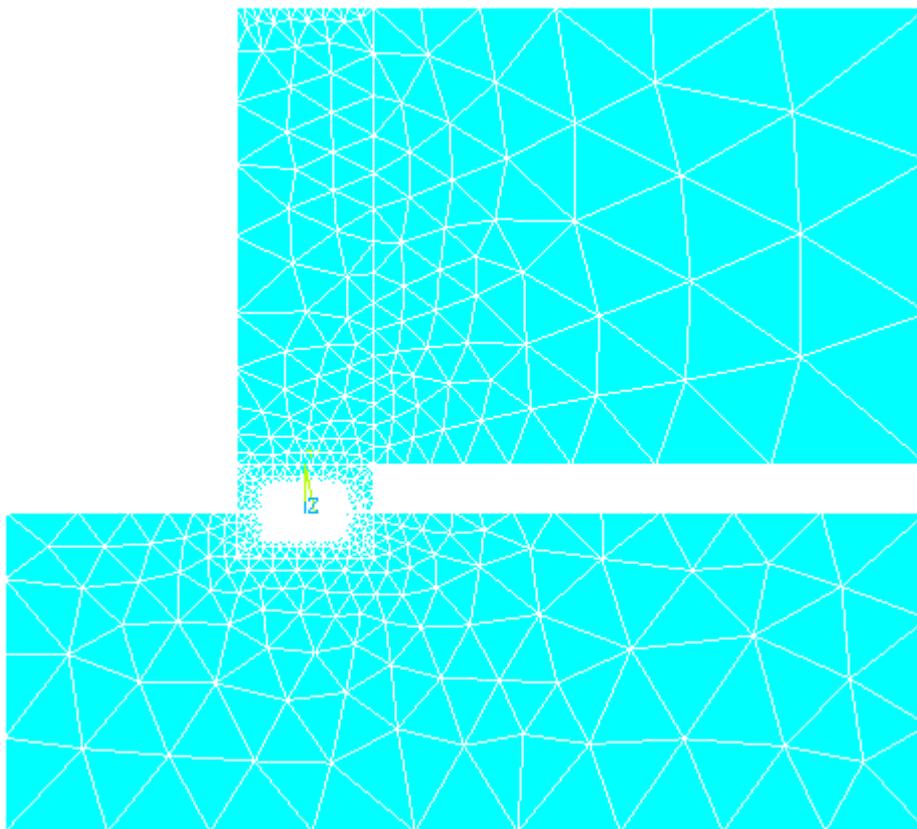


Figura 3-9 Mallado del puente de fretting y la probeta

Puede verse que la zona de contacto está predominada por el color blanco. Esto es debido a que, como se comentó, corresponde a la Zona A, donde se ha hecho un mallado mucho más fino y por tanto hay un número más elevado de elementos. A partir de ahí se produce una transición suave hacia la Zona C a través de la Zona B.

En la siguiente figura puede verse la zona de contacto aumentada:

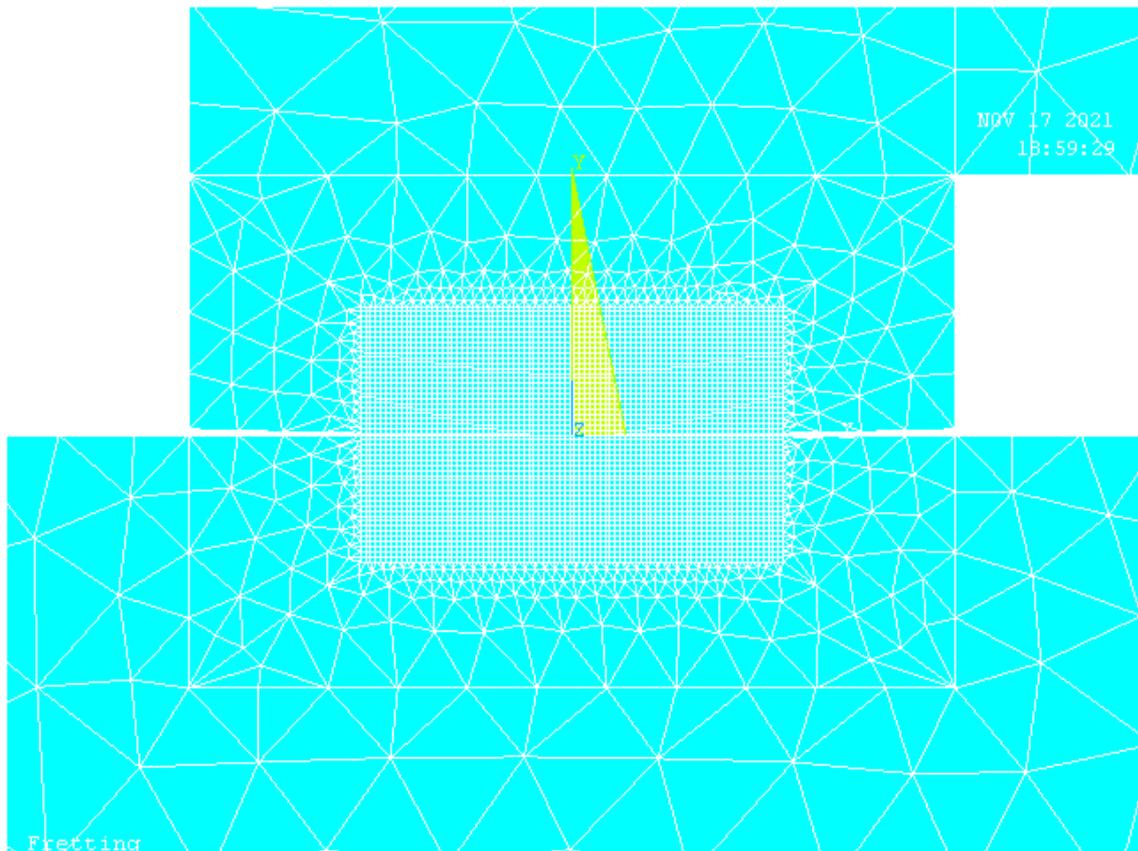


Figura 3-10 Zoom del mallado en la zona de contacto

Finalmente queda reproducir el contacto en el problema. No basta solo con crear la geometría de forma que haya contacto, sino que hay que crear un par de contacto.

Las líneas de código para crear el par de contacto son varias y algo complejas, por lo que de forma excepcional se ha creado un contacto genérico utilizando el *Contact Manager* de la GUI de ANSYS y copiado las líneas que genera (ver en Anexo A – Código de ANSYS).

Lo único que es necesario modificar de ese par de contacto creado es la elección de la *Target Surface* y la *Contact Surface* y el coeficiente de rozamiento. Dado que para este problema la elección de cuáles serán las *Target Surface* y *Contact Surface* no va a generar singularidades en la resolución, se ha elegido la superficie del puente como *Target Surface* y la de la probeta como *Contact Surface*. El coeficiente de rozamiento se ha fijado en 0.7.

### 3.3 Condiciones de contorno y aplicación de cargas

Lo último que queda antes de proceder a la resolución del problema es la imposición de las condiciones de contorno y la aplicación de las cargas.

Respecto a las condiciones de contorno, ya se comentó en el apartado 3.1 que se puede aplicar simetría. En los bordes derechos del puente y la probeta quedan impedidos los desplazamientos horizontales, mientras que en el borde inferior de la probeta es el desplazamiento vertical el que no está permitido. Las restricciones en desplazamientos se llevan a cabo a través del comando 'D'.

En cuanto a las cargas, en el problema se aplican en tres pasos. El primer paso de carga corresponde a la aplicación de la fuerza normal (N) que aplica el actuador hidráulico sobre el puente y que hará que entre en

contacto con la probeta, con mayor o menor penetración dependiendo del valor de la fuerza.

La forma que tiene ANSYS de aplicar una carga en un contorno es creando un grupo de nodos rigidizados respecto a un nodo maestro creado previamente. En otras palabras, todo lo que le ocurra a este nodo maestro será transmitido al resto de nodos que se han rigidizado con él.

De esta forma, aplicando la fuerza sobre el nodo maestro se aplicará al conjunto de nodos del puente sobre los que se desea aplicar la fuerza. En la siguiente imagen se puede ver de forma clara:

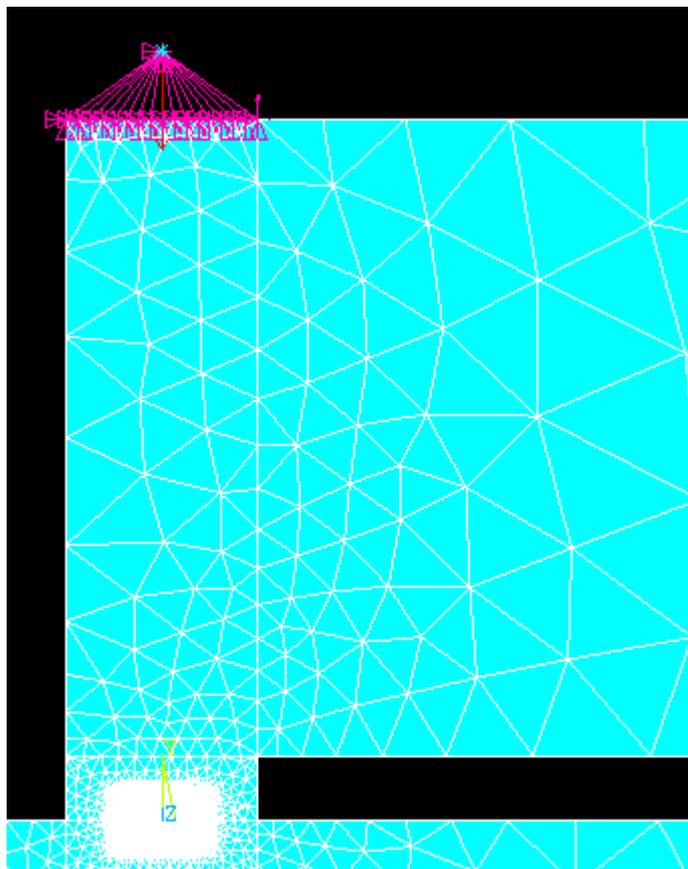


Figura 3-11 Aplicación de la fuerza normal a través de un nodo maestro

Puede verse cómo la fuerza normal (flecha roja) está siendo aplicada sobre un nodo que se ha creado fuera de la geometría del puente y que es distribuida al resto de nodos seleccionados (rigidizados) en color magenta.

La rigidización de los nodos se hace a través del comando '*CERIG*', y la aplicación de la fuerza con el comando '*F*'.

El valor de la fuerza normal viene acotado por un valor máximo de 1000 N, que es el que se ha fijado para que el puente y la probeta puedan resistir. Sin embargo, en diversas simulaciones con distintas combinaciones de  $N$  y  $\sigma$  se observó que la solución no convergía. Esto hacía que el valor de la fuerza normal no solo estuviese acotado en un valor máximo, sino también mínimo, de forma que se garantizase la convergencia.

En la siguiente tabla vienen los valores mínimos que se han empleado para  $N$  dependiendo del valor que se tuviese de  $\sigma$ :

$\sigma_{\text{global}}$ (MPa)	$N_{\text{min}}$ (N)
100	-
200	-
300	-
400	500
500	650
600	750

Tabla 3-2 Valores mínimos de N que garantizan la convergencia

Tras el primer paso de carga, se aplica la tracción y, tras este, la compresión.

Ambos se modelan de la misma forma, a través del comando '*SF*', que genera una carga superficial. Para distinguir la tracción de la compresión solo hay que cambiar el signo de una respecto de la otra.

A continuación, puede verse cómo queda el modelo definitivo, con el mallado, condiciones de contorno y cargas aplicadas:

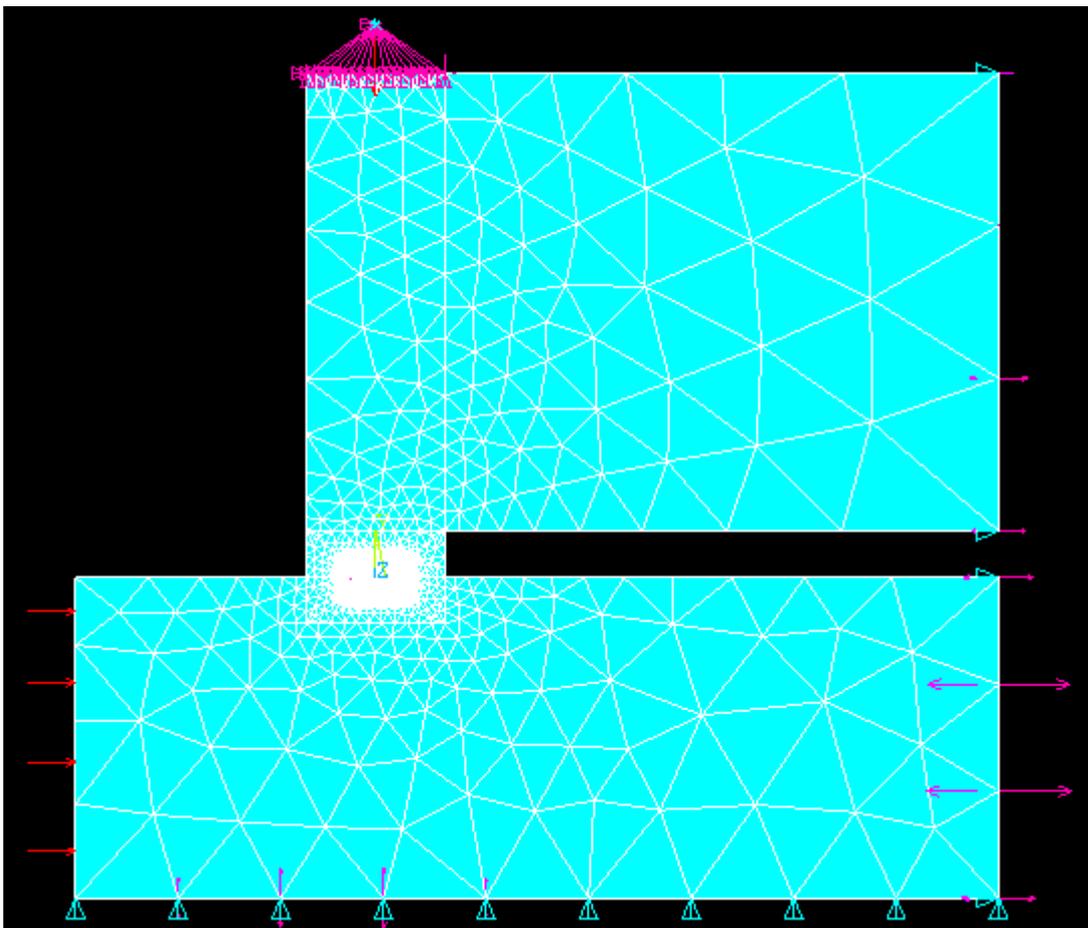


Figura 3-12 Modelo definitivo en ANSYS

### 3.4 Obtención de variables objetivo

Tras la resolución en ANSYS tocaba hacer un post-procesado de los resultados arrojados, y manipularlos de forma que se pudieran obtener las magnitudes que evaluarán el comportamiento del puente de fretting, objetivo de este proyecto.

#### 3.4.1 Esfuerzos en el puente de fretting

Los esfuerzos que aparecen en el puente como respuesta a la combinación de carga normal y tensión global de tracción-compresión aplicada en la probeta salen directamente de ANSYS. Por equilibrio de fuerzas y momentos, estos esfuerzos serán iguales a las reacciones en el borde derecho del puente.

Por tanto, seleccionando los nodos de ese borde y usando el commando *\*GET* se pueden obtener las reacciones horizontales ( $F_x$ ) de esos nodos. Es importante también obtener las coordenadas  $y$  de cada nodo (que también se obtienen directamente a través del commando *\*GET*), ya que serán necesarias para obtener los momentos de reacción ( $M_z$ ). Las reacciones totales serán el sumatorio de las obtenidas en cada nodo:

$$Q = \sum_{i=1}^n F_{x_i}$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_{z_i} = \sum_{i=1}^n F_{x_i} \cdot y_i$$

#### 3.4.2 Rotación de la pata del puente de fretting

Tras varias simulaciones con distintos valores de  $N$  y  $\sigma$  se observó que la pata giraba de forma considerable hasta aproximadamente la mitad del borde izquierdo del puente. En las siguientes figuras puede verse este resultado:

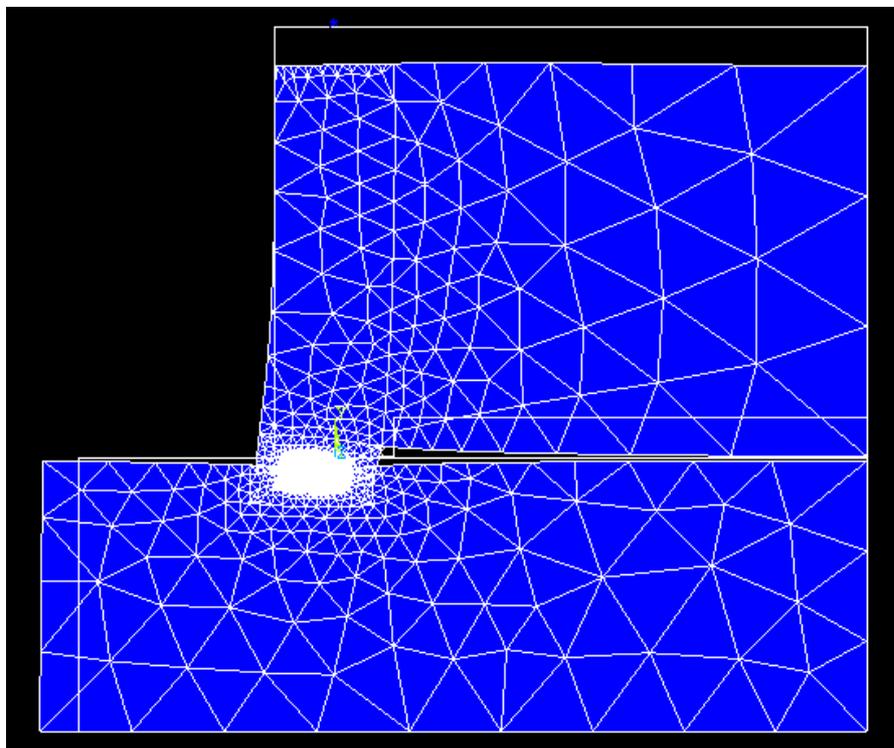


Figura 3-13 Deformación durante la tracción de la probeta

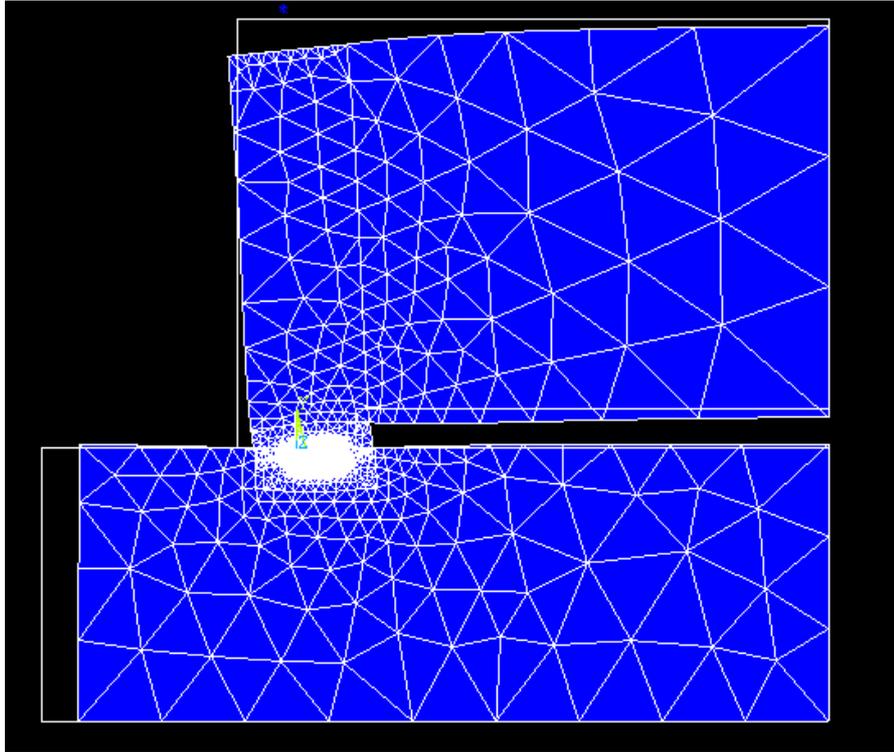


Figura 3-14 Deformación durante la compresión de la probeta

Por un lado, puede observarse que el modelo está bien diseñado, pues se comporta como debería: al traccionar la probeta se produce un giro de la pata del puente en el sentido de las agujas del reloj, y lo contrario cuando se aplica la compresión.

Por otro lado, sirve para justificar la decisión de tomar los nodos del borde izquierdo de la pata desde el contacto hasta aproximadamente la mitad de la pata, puesto que es la zona donde se producen los mayores desplazamientos.

La rotación de la pata se ha calculado haciendo la media de lo que giran todos los elementos contenidos en el tramo seleccionado. El giro de cada elemento se ha calculado a partir de los desplazamientos de los dos nodos que forman su borde izquierdo:

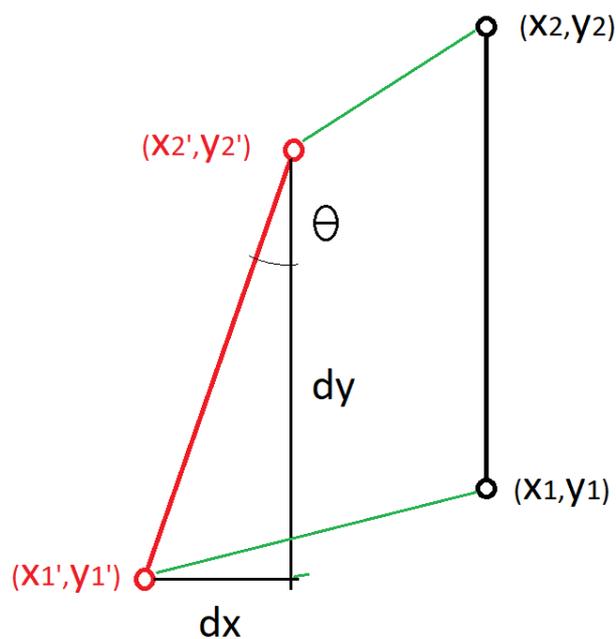


Figura 3-15 Cálculo del giro de un elemento a partir de los desplazamientos de sus nodos

$$d_x = x'_1 - x'_2 = (x_1 + u_{x_1}) - (x_2 + u_{x_2}) = u_{x_1} - u_{x_2}$$

$$d_y = y'_1 - y'_2 = (y_1 + u_{y_1}) - (y_2 + u_{y_2})$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{d_x}{d_y} \right)$$

Tanto los desplazamientos como las coordenadas de los nodos seleccionados se obtienen directamente de ANSYS nuevamente a través del comando *\*GET*.

### 3.4.3 Rodadura del puente de fretting

Al traccionar o comprimir la probeta tienen lugar dos movimientos acoplados. Por una parte, se produce la rotación de la pata, ya analizada en el punto anterior, y por otro lado, la rodadura.

Al estar acoplados ambos movimientos resulta complicado diferenciarlos, pero puede definirse la rodadura como el movimiento que hace que la zona de contacto entre el puente y la probeta se desplace.

La forma de obtener la zona de rodadura ha sido a través del comando *'ETABLE'*. Con este comando puede obtenerse prácticamente cualquier dato de un elemento o grupo de elementos previamente seleccionados (en este caso, los elementos del puente de la zona de contacto, contenidos en el borde inferior).

Uno de los datos que pueden obtenerse del contacto es el *"status"*, es decir, el estado en el que se encuentran los elementos seleccionados. Los estados son los siguientes:

- 0: sin contacto ni cerca de él.
- 1: sin contacto, pero cerca de él.
- 2: en contacto y deslizando.
- 3: en contacto sin deslizamiento.

Es posible que se den estados intermedios, es decir, 1.5 ó 2.5. Esto significa que parte del elemento está en un estado y parte en otro (1.5 significaría que una parte no estaría contactando, pero sí cerca, y la otra parte sí estaría contactando, aunque deslizando).

De forma esquemática, se podría tener la siguiente configuración en el contacto y sus proximidades (configuración completamente aleatoria e inventada):

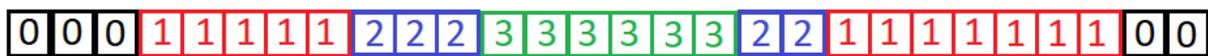


Figura 3-16 Esquema de un posible estado de los elementos en el contacto y sus proximidades

Se puede calcular la rodadura de cada lado del puente, es decir, cuánto se ha movido la zona de contacto en cada lado (que a priori deberían ser iguales o muy similares) de la siguiente forma:

$$\delta_{izq} = \left| x_{min,st>1}^N - x_{min,st>1}^{T/C} \right|$$

$$\delta_{dcha} = \left| x_{max,st>1}^N - x_{max,st>1}^{T/C} \right|$$

Para el caso de la rodadura por el lado izquierdo bastaría con obtener la coordenada  $x$  del primer elemento que tiene un estado mayor que 1 en cada paso de carga y calcular la diferencia entre ambas coordenadas. Así se obtiene cuánto se ha desplazado la zona de contacto hacia la izquierda.

El cálculo para el lado derecho es exactamente el mismo, pero sería necesario obtener la coordenada  $x$  del último elemento cuyo estado sea mayor que 1.

El criterio de elegir aquellos con “estado mayor que 1” es evidente: un estado mayor que 1 (1.5 o superior) implica que el elemento está en contacto parcial o totalmente, ya sea deslizando o no.

La obtención de las coordenadas para el cálculo de la rodadura se ha hecho a través de MATLAB, siguiendo este procedimiento:

- 1) ANSYS envía a MATLAB las coordenadas y el estado de todos los elementos de la Zona A (zona de contacto) y MATLAB los almacena en una matriz, cuyas columnas son las coordenadas  $x$  de cada elemento y su estado.
- 2) MATLAB ordena la matriz en orden ascendente según la coordenada  $x$ .
- 3) MATLAB lee la matriz completa y almacena en un nuevo vector la coordenada  $x$  de todos los elementos cuyo estado sea mayor que 1.

Para obtener la coordenada  $x$  necesaria para  $\delta_{izq}$  se selecciona la primera componente del vector obtenido en el paso 3), y la última para  $\delta_{dcha}$ .

# 4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se mostrará gráficamente cómo evolucionan los esfuerzos, la rotación de la pata y la rodadura en función de las tres variables de control del problema: la tensión global, la carga normal y la temperatura.

Todas las gráficas que se van a mostrar son a temperatura ambiente, ya que una temperatura diferente lo único que hace es desplazar la gráfica. Sin embargo, durante la realización del proyecto se han obtenido los resultados para ambas temperaturas, con el objetivo de poder comparar las evoluciones a diferentes temperaturas.

Pero antes de pasar a estudiar las gráficas se van a mostrar aquí algunas distribuciones de presiones, que pueden resultar de interés de cara al estudio del fenómeno de fretting.

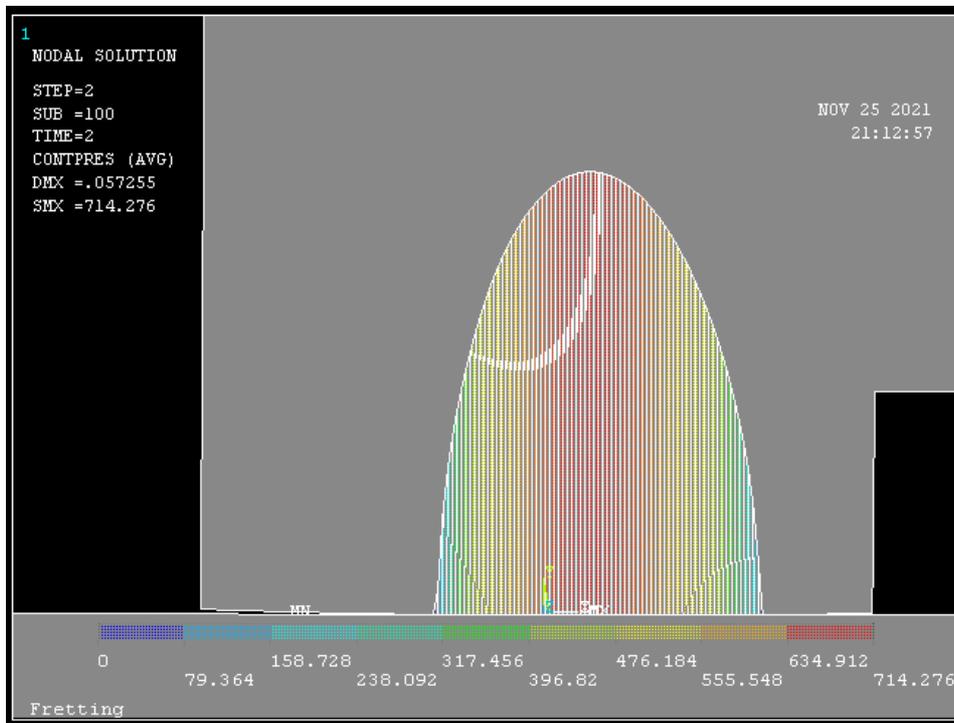


Figura 4-1 Distribución de presiones en el contacto (en tracción)

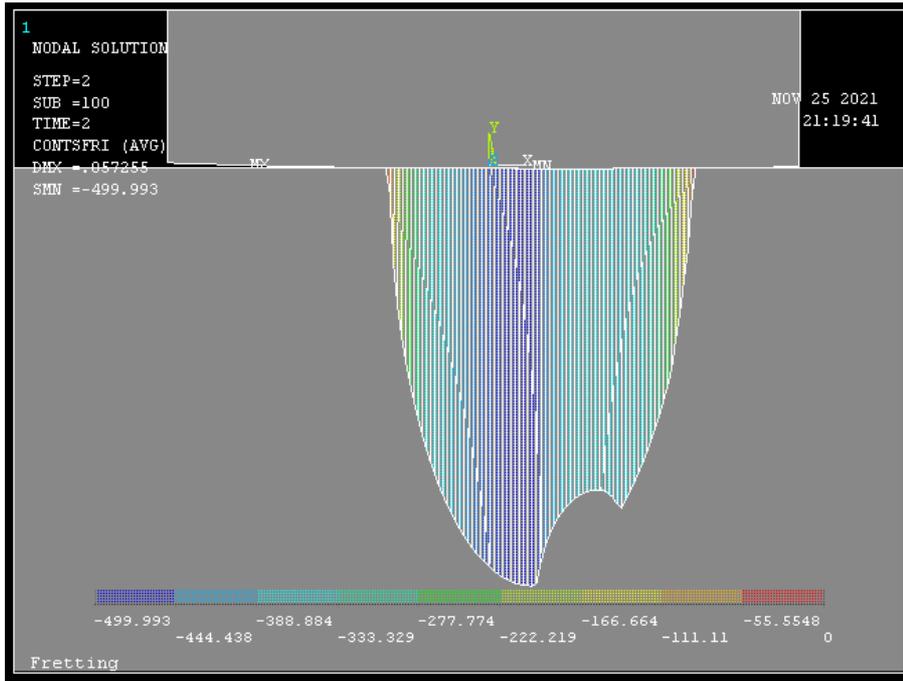


Figura 4-2 Distribución de tensiones de fricción en el contacto (en tracción)

Puede verse una evolución suave de las tensiones tangenciales en el contacto. Además, se ve como una especie de “corte”. Eso significa que todos esos elementos están en deslizamiento parcial (esto es, el cociente entre la la tensión tangencial y la normal es inferior al coeficiente de rozamiento del problema) y, por tanto, están adheridos a la superficie de contacto.

Si se el cociente entre la tensión tangencial y normal fuera exactamente igual al coeficiente de rozamiento, se hablaría de deslizamiento global, y no habría zona de adhesión alguna. La forma que tendría la distribución de tensiones tangenciales sería una campana (como las presiones), y la constante de proporcionalidad que habría entre ambas distribuciones sería justamente el coeficiente de rozamiento.

Esto es lo que ocurre para la compresión, como puede verse en las dos figuras siguientes:

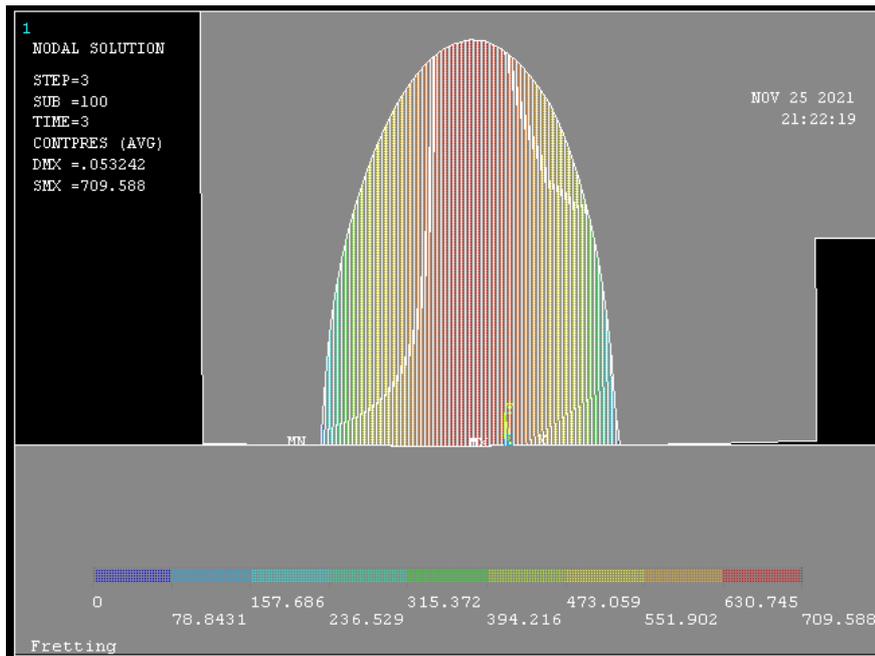


Figura 4-3 Distribución de presiones en el contacto (en compresión)

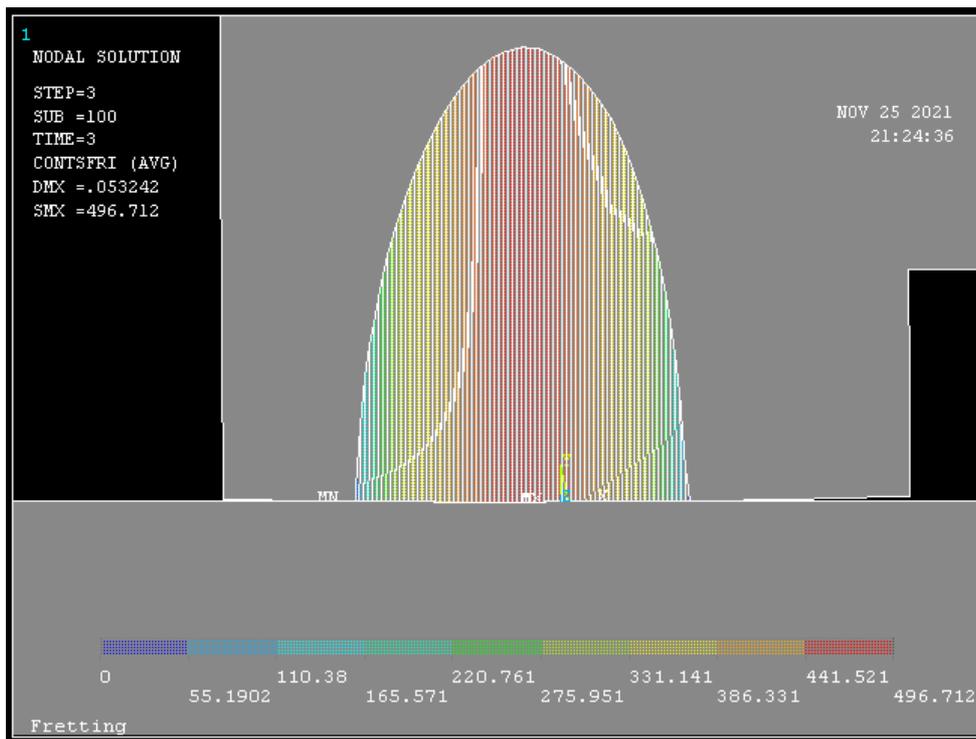


Figura 4-4 Distribución de tensiones de fricción en el contacto (en compresión)

Por otro lado, resulta interesante mostrar la distribución de tensiones de Von Mises:

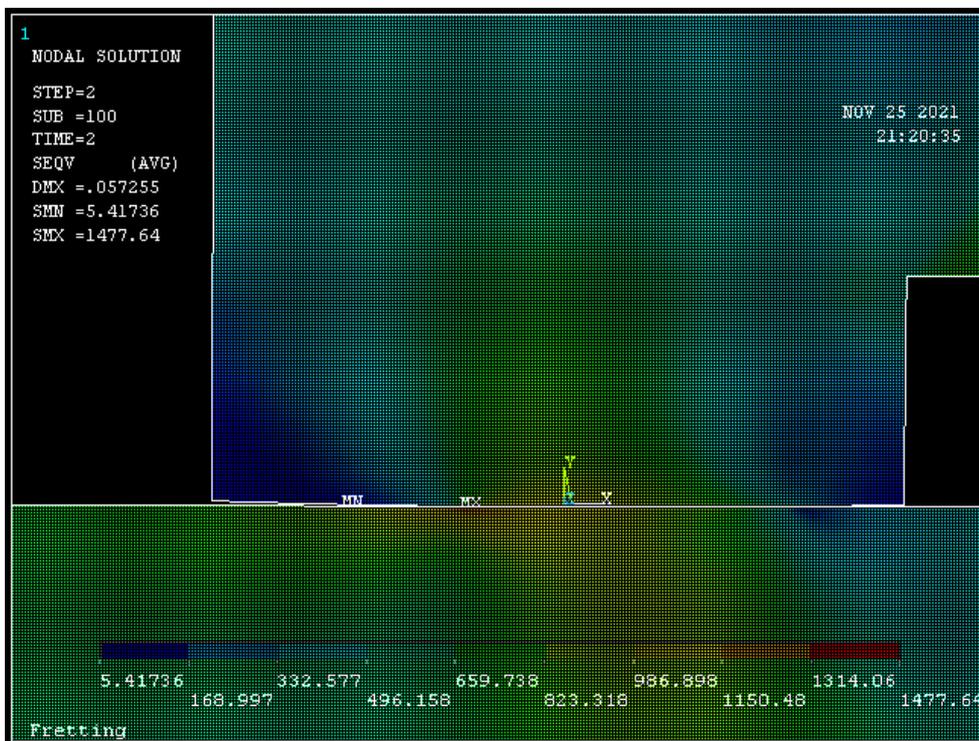


Figura 4-5 Distribución de tensiones de Von Mises en la tracción

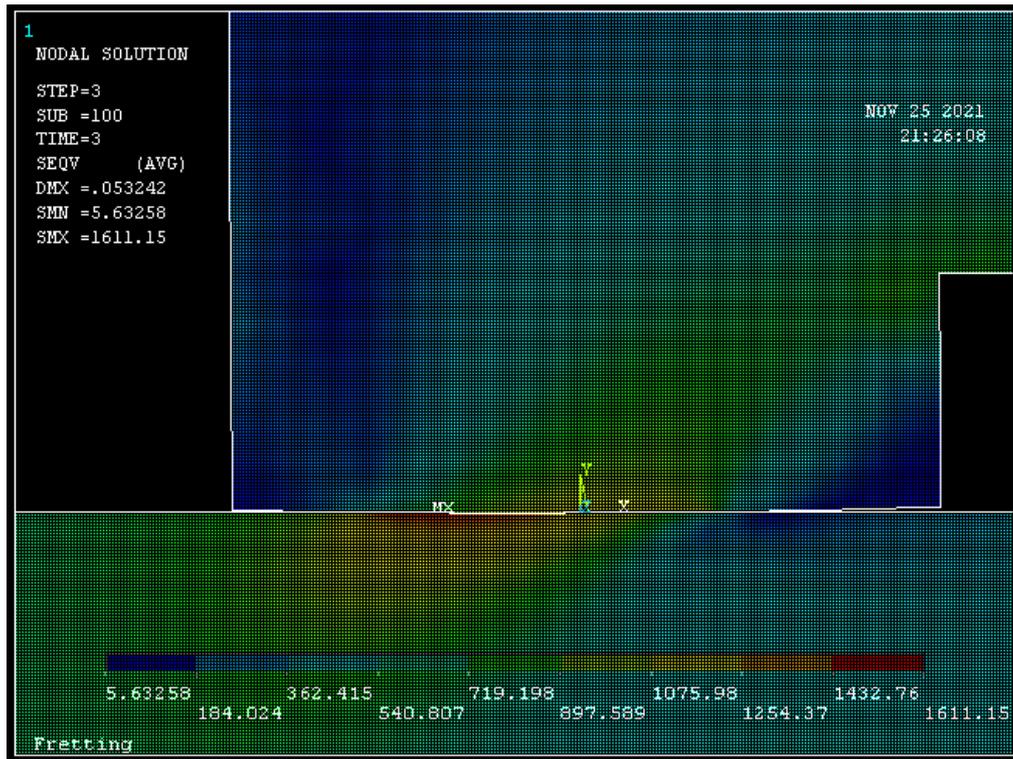


Figura 4-6 Distribución de tensiones de Von Mises en la compresión

La distribución se muestra en el conjunto completo, y el máximo en la escala de color de ambas figuras pertenece a la probeta.

Para el caso del puente, la tensión máxima en tracción es de 1094 MPa, y en compresión es de 1252 MPa. El límite elástico a temperatura ambiente del Inconel 718 es de 1034 MPa. Atendiendo al criterio de fallo de Von Mises, puede deducirse que la zona roja-anaranjada en ambas figuras ha entrado en plasticidad (en la gráfica de tracción no se distingue bien, pero corresponde a la zona indicada con “MX”). Conocer la zona plástica es interesante para el estudio de iniciación de grietas en la fatiga por fretting [6].

## 4.1 Variación con $\sigma$

En principio, cabe esperar que las tres variables crezcan conforme lo hace el valor (en módulo) de la tensión global aplicada en la probeta.

### 4.1.1 Esfuerzos

A continuación se muestran los esfuerzos Q y M. En la gráfica se han mostrado juntas las evoluciones tanto en tracción como en compresión, pero ha de tenerse en cuenta que se han representado en valores absolutos para poder compararse entre ellos a través de su módulo, pues el sentido será diferente en la tracción y en la compresión:

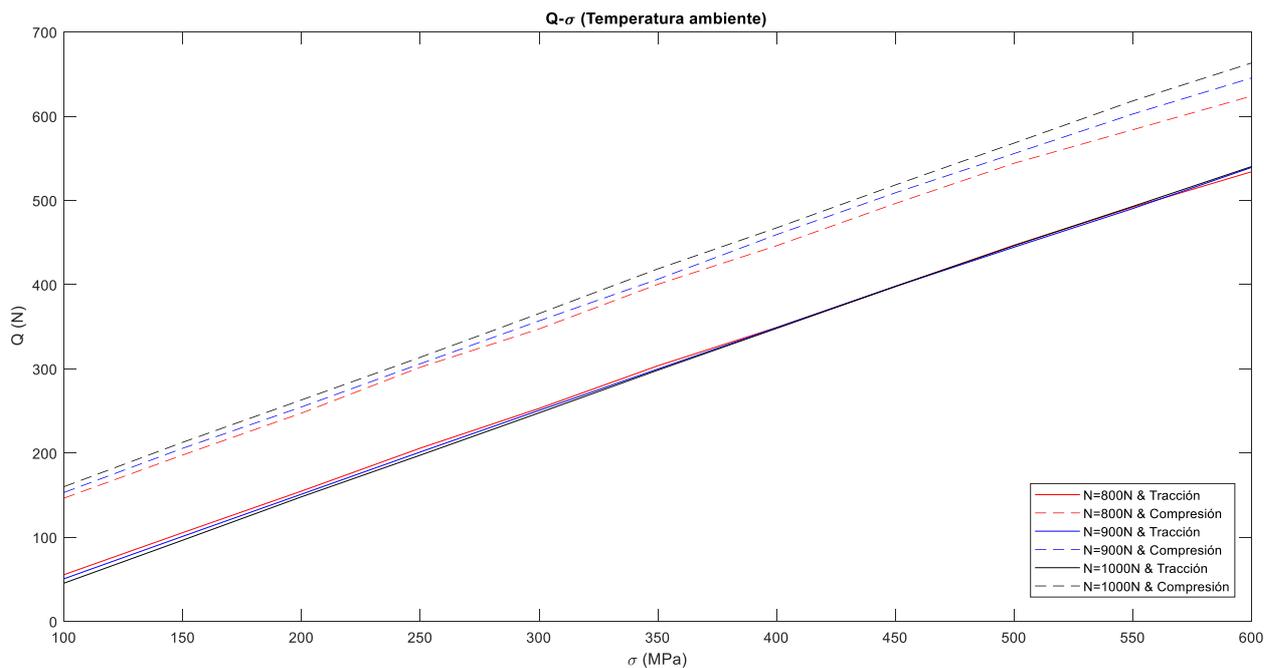


Figura 4-7 Q- $\sigma$  a temperatura ambiente

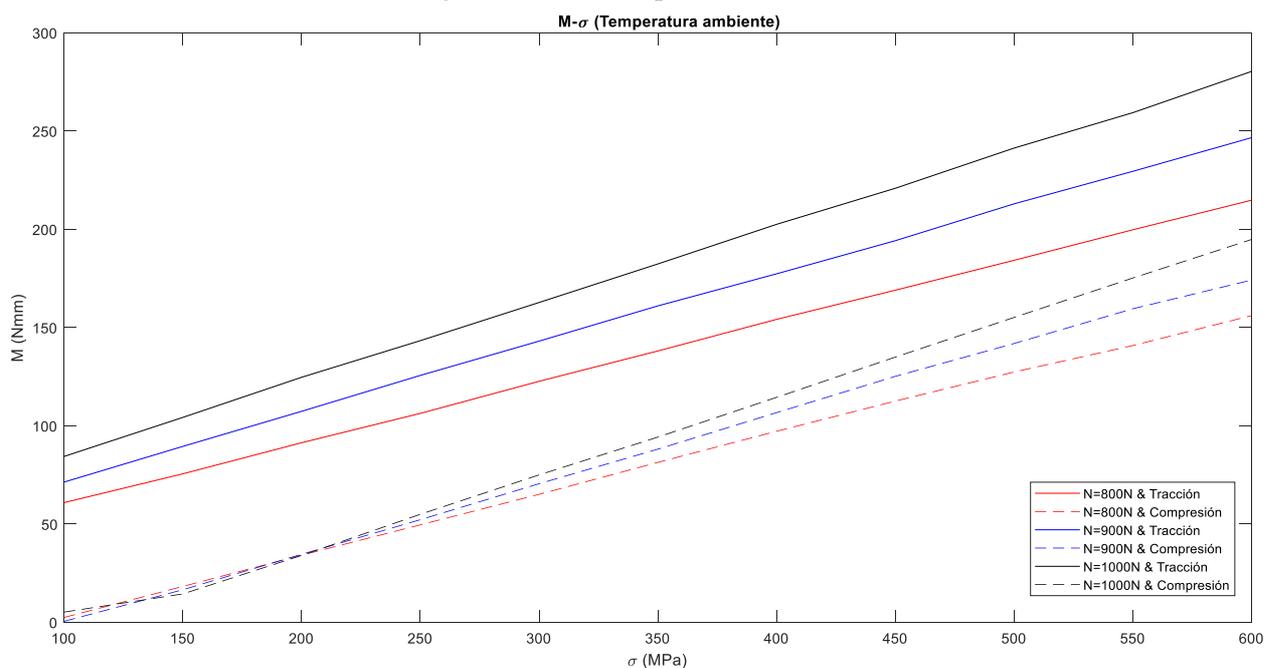


Figura 4-8 M- $\sigma$  a temperatura ambiente

Como era de esperar, se ve claramente una evolución ascendente y lineal de los esfuerzos con  $\sigma$ , algo lógico ya que, si se tira de la probeta con una mayor tensión, el puente presentará una mayor carga tangencial y un mayor momento respecto al punto de contacto.

También puede verse que los esfuerzos no son iguales en tracción y en compresión. Esta será la tónica habitual en todos los resultados, puesto que el puente no se comporta igual a tracción que a compresión.

En el caso de  $Q$  puede verse que es mayor en la compresión que en la tracción y, sin embargo, ocurre lo contrario para  $M$ . Esto es posible debido a que, como se vio en el apartado 3.4.1,  $M$  se obtiene a partir de la suma de los productos de las reacciones horizontales de los nodos y su cota. Por tanto, es posible que, aunque la suma de las reacciones horizontales (obteniéndose  $Q$ ) sean mayores en un caso que en otro, se revierta para cuando se haga la suma de los productos (para obtener  $M$ ).

Por otro lado, y como se verá en el apartado 4.2.1, las líneas de colores están muy juntas entre ellas para el esfuerzo  $Q$ . Cada línea de color corresponde a un valor de la fuerza normal ( $N$ ) que se ha mantenido constante en el barrido de  $\sigma$ , por lo que puede concluirse en una primera observación que el esfuerzo  $Q$  no tendrá una gran variación respecto a  $N$ .

Por último, cabe destacar que tiene sentido que el momento sea mayor en tracción (línea continua) que en la compresión. En tracción, tanto la tensión global como la carga normal contribuyen de la misma forma a la flexión del puente (en el sentido de las agujas del reloj), mientras que en la compresión el efecto de la tensión global contrapone al de la carga normal, por lo que el momento será, por lo general, menor.

#### 4.1.2 Rotación

Para el caso de la rotación de la pata se ha procedido de la misma forma. Se han representado en valores absolutos, aunque giran en sentido opuesto: cuando se tracciona la probeta, la pata del puente rotará en el sentido de las agujas del reloj, y en la compresión lo hará en el sentido contrario.

Puede verse, al igual que ocurría con los esfuerzos, que la rotación de la pata es mayor cuanto mayor sea la tensión aplicada, tanto en tracción como en compresión. Cuando se aplica una mayor tensión, lo normal es que la pata gire más.

Nuevamente, como pasaba con el esfuerzo  $Q$ , la variación de  $\theta$  en la tracción con la fuerza normal aplicada es pequeña. En la compresión sí que tiene una variación un poco más perceptible. Se verá gráficamente en el apartado 4.2.2.

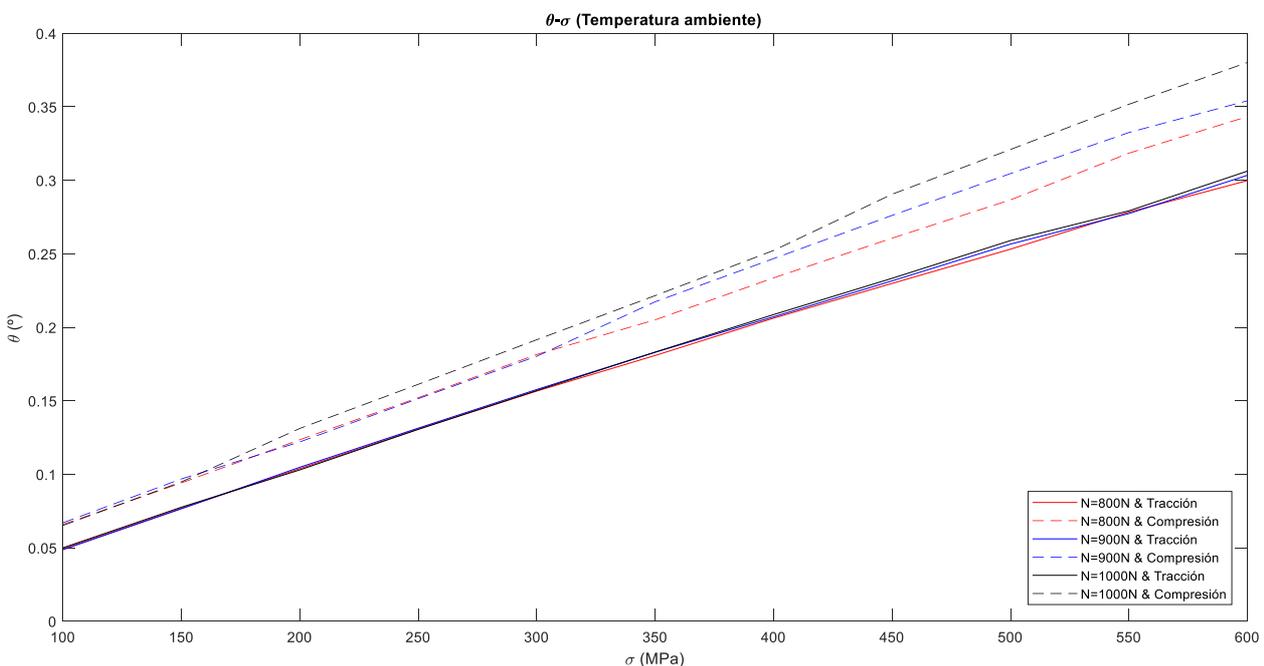


Figura 4-9  $\theta$ - $\sigma$  a temperatura ambiente

Puede verse también que la pata no rota en la misma cantidad en tracción que en compresión. Esto es debido, nuevamente, a que el comportamiento es diferente en tracción y en compresión.

#### 4.1.3 Rodadura

A continuación se muestran las evoluciones de la rodadura en tracción y compresión (comparando la rodadura en ambos lados de la pata), así como las rodaduras en lado izquierdo y derecho (comparándolas en tracción y compresión).

Solo se ha representado para un valor de  $N$ , ya que si se ponían tres, como en las anteriores, se mezclaban mucho las gráficas y perdía legibilidad. De todas formas, la variación con  $N$  se estudia más adelante.

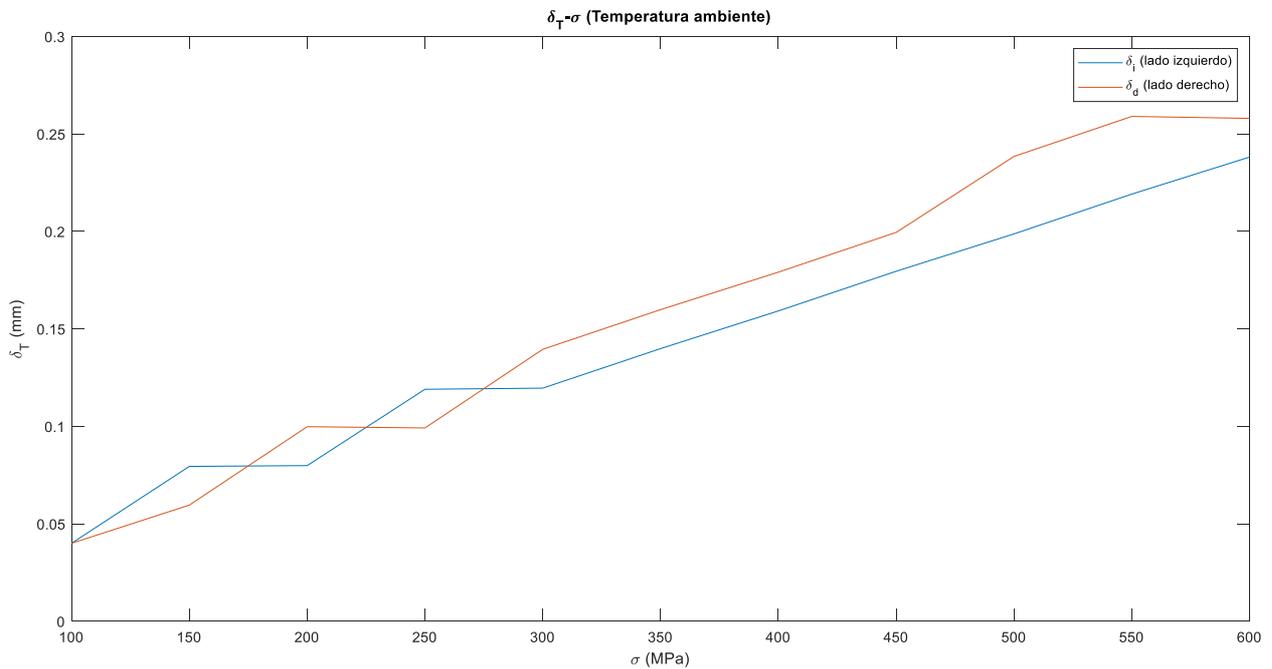


Figura 4-10  $\delta_T$ - $\sigma$  a temperatura ambiente

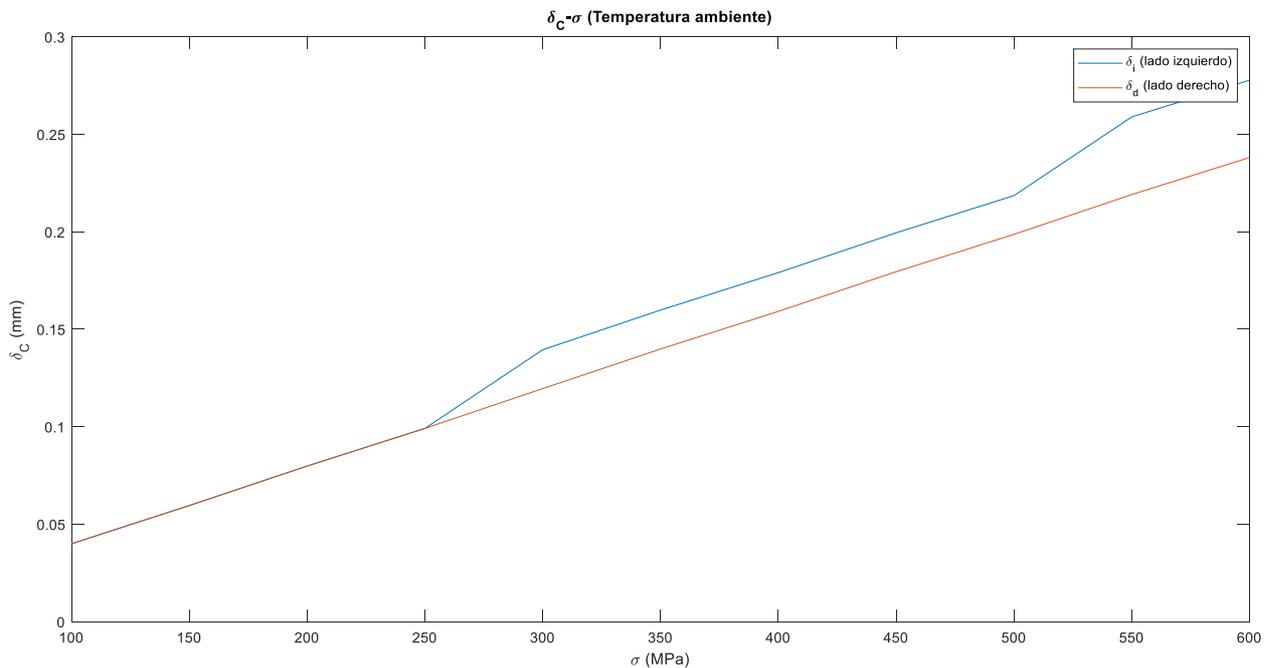


Figura 4-11  $\delta_C$ - $\sigma$  a temperatura ambiente

Puede verse, como viene siendo habitual, un aumento de la rodadura con el valor de la tensión global. La explicación es la misma que se dio anteriormente para la rotación.

Además, puede apreciarse también que, cuantitativamente, la rodadura por ambos lados no es la misma, aunque sí muy similar. Una posible explicación es que la deformación en los elementos de un lado es mayor que en el otro, dependiendo de si está en tracción o compresión.

Para el caso de la tracción y, en menor medida, en la compresión, puede verse la presencia de dientes de sierra

en la evolución. Esto se hace mucho más pronunciado cuando se estudia la variación respecto a  $N$ , por lo que se explicará en el apartado 4.3.3., así como una posible solución en el capítulo 5.

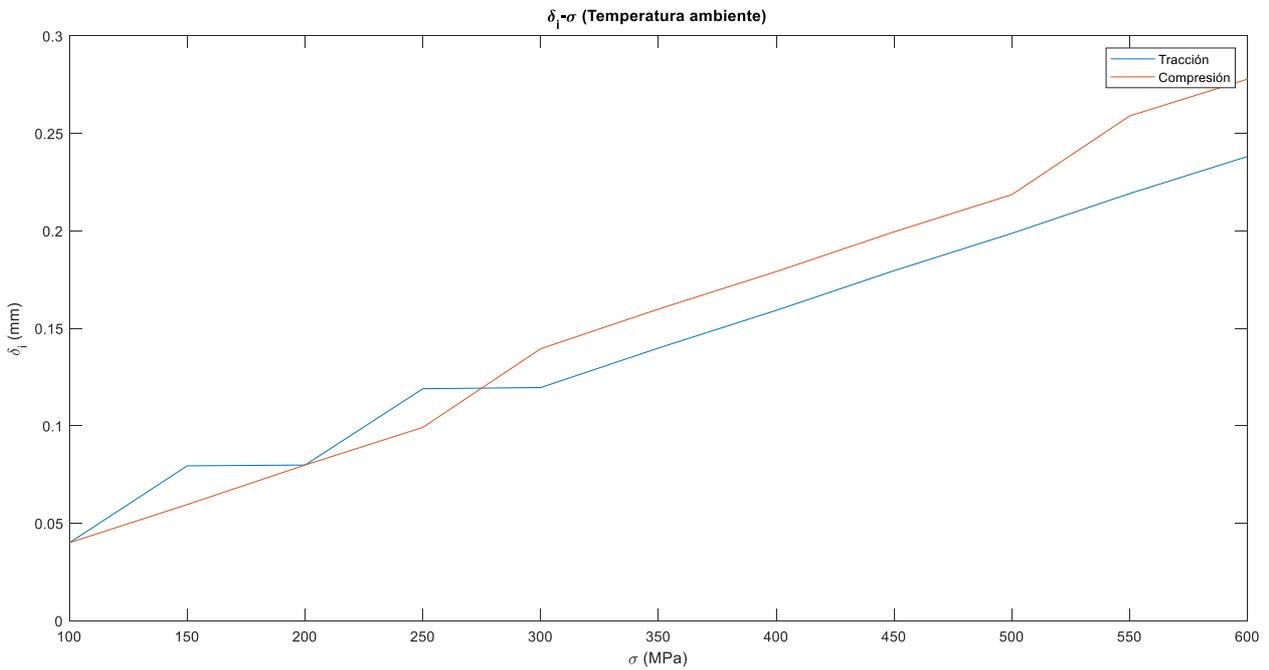


Figura 4-12  $\delta_{\text{izquierda}}-\sigma$  a temperatura ambiente

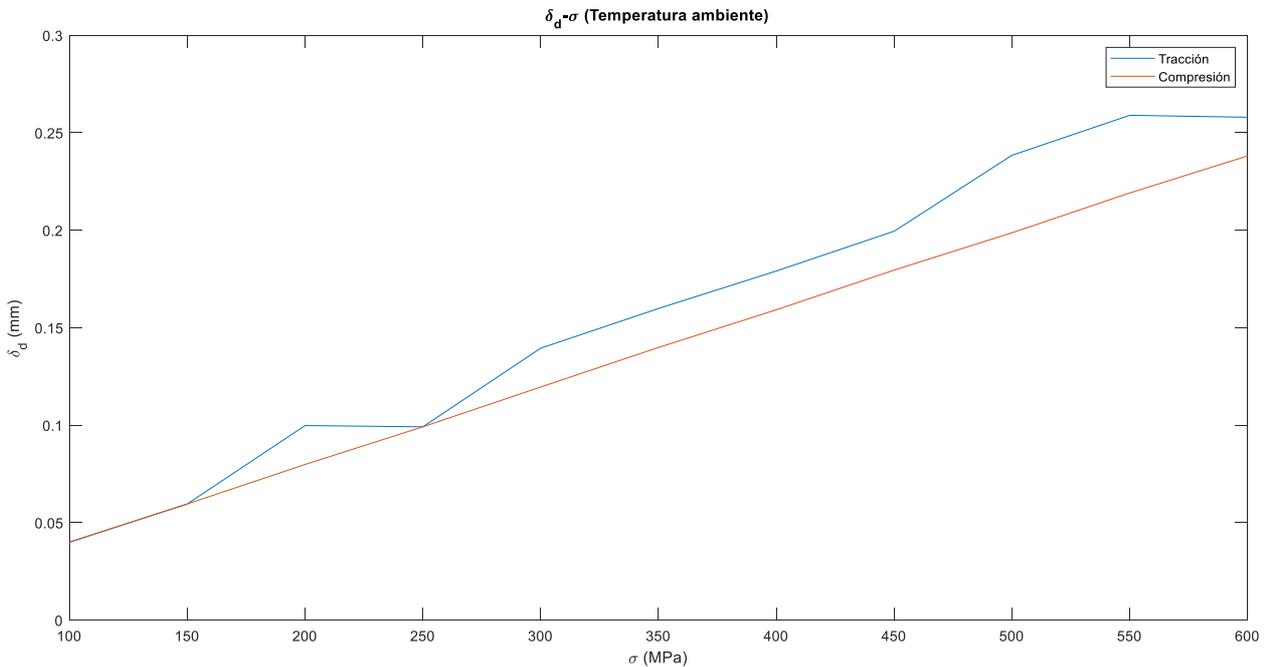


Figura 4-13  $\delta_{\text{derecha}}-\sigma$  a temperatura ambiente

Finalmente, cuando se analizan las rodaduras de forma independiente en cada lado puede verse que no son iguales en la tracción y la compresión. La razón es la misma que en la rotación: el comportamiento a tracción y compresión no es el mismo.

## 4.2 Variación con N

En este punto se analizará la variación de las distintas variables en función de N. En principio podría esperarse que no dependiesen en gran medida de N, ya que un incremento de la fuerza normal solo conseguirá principalmente un aumento de la penetración del puente en la probeta y una zona de contacto mayor.

### 4.2.1 Esfuerzos

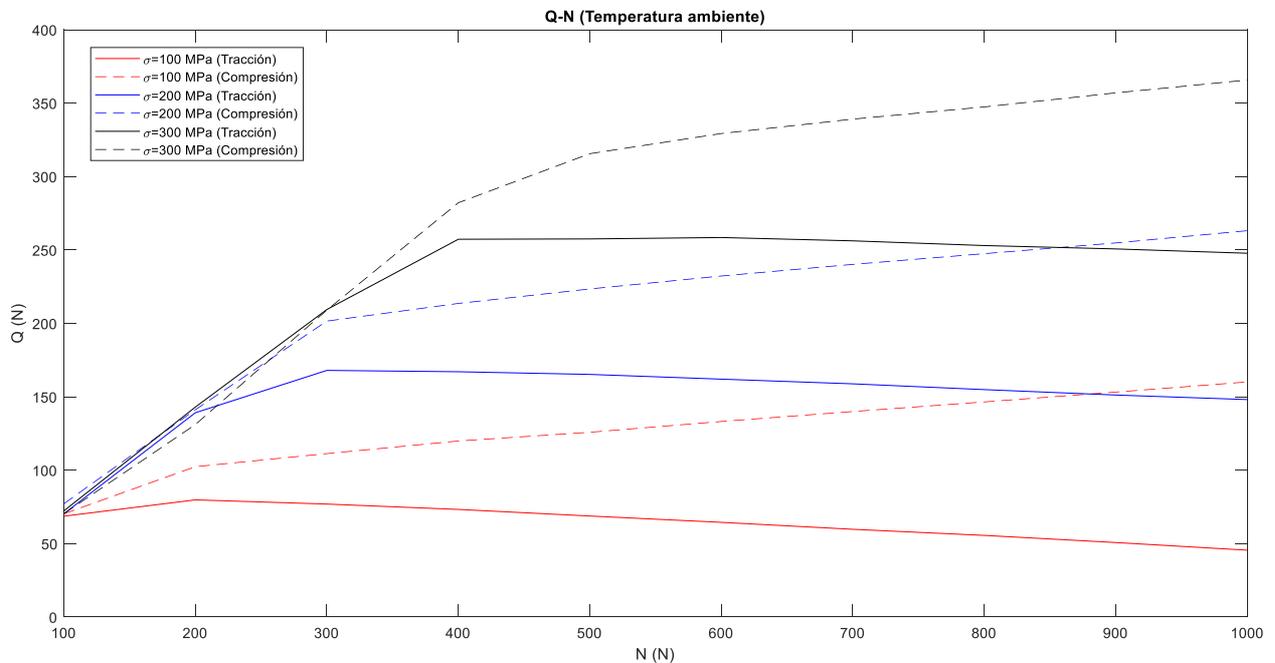


Figura 4-14 Q-N a temperatura ambiente

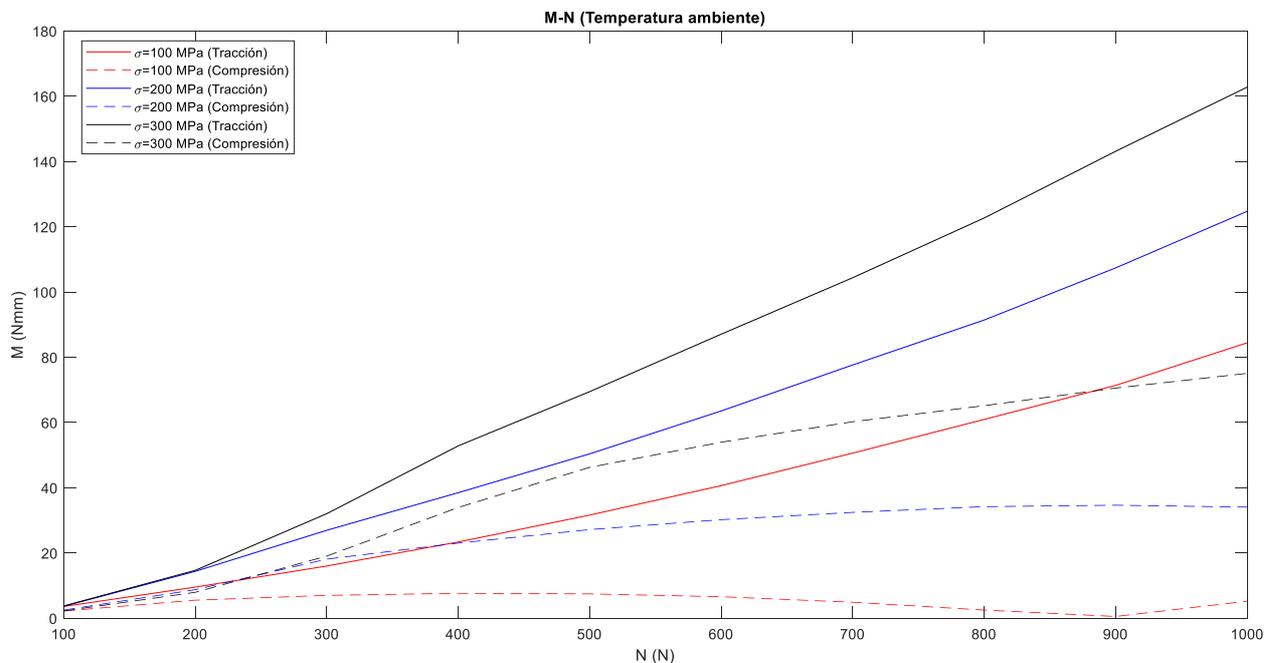


Figura 4-15 M-N a temperatura ambiente

Como puede verse, Q tiene una fase de crecimiento (que es mayor cuanto mayor es la tensión aplicada) hasta llegar a un punto en el que se mantiene aproximadamente constante (realmente crece muy lentamente en

compresión y decrece en la tracción).

Para el caso de M el comportamiento es similar en la compresión, pero en tracción crece bastante.

## 4.2.2 Rotación

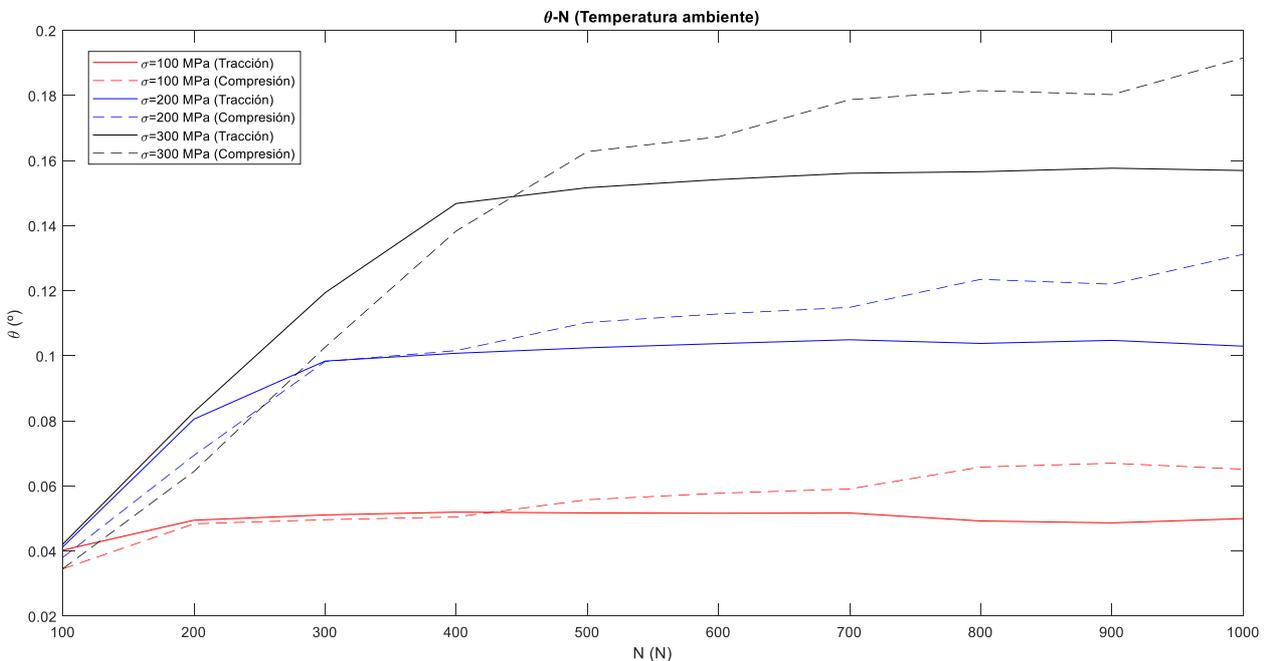


Figura 4-16  $\theta$ -N a temperatura ambiente

La rotación de la pata presenta la misma evolución que los esfuerzos: crecen hasta un punto a partir del cual se mantiene constante.

Aquí puede apreciarse además el carácter ascendente de la rotación con la tensión aplicada, como ya se comprobó en el apartado 4.2.2. Cada línea de color corresponde con un valor de tensión diferente.

## 4.2.3 Rodadura

A continuación se muestran las mismas gráficas anteriores para la rodadura, pero su variación respecto a N.

El comportamiento es similar al resto de variables estudiadas, es decir, primero crece y luego se mantiene constante, a pesar de mostrar unos dientes de sierra mucho más pronunciados que cuando se estudió respecto a la tensión.

La diferencia de cota entre los picos de los dientes de sierra es de 0.02 mm. Este valor coincide con el tamaño que se le ha dado al elemento a la hora de realizar el mallado. Por tanto, este fenómeno es debido a un error en la precisión del mallado y a la obtención de forma discreta de los elementos que están en contacto.

Poniendo un ejemplo, es posible que para un caso concreto de tensión y fuerza normal se tenga el primer elemento en contacto con un estado 2. Sin embargo, el contacto físico se produce un poco antes, teóricamente cuando el estado es 1.5, pero al no haber elemento con este estado el algoritmo no lo detecta. Cuando se produce la siguiente iteración (misma tensión pero fuerza diferente) es posible que ahora sí que haya un elemento con estado 1.5, y que por lo general estará desplazado 0.02 mm respecto al primer caso, dando lugar a los dientes de sierra.

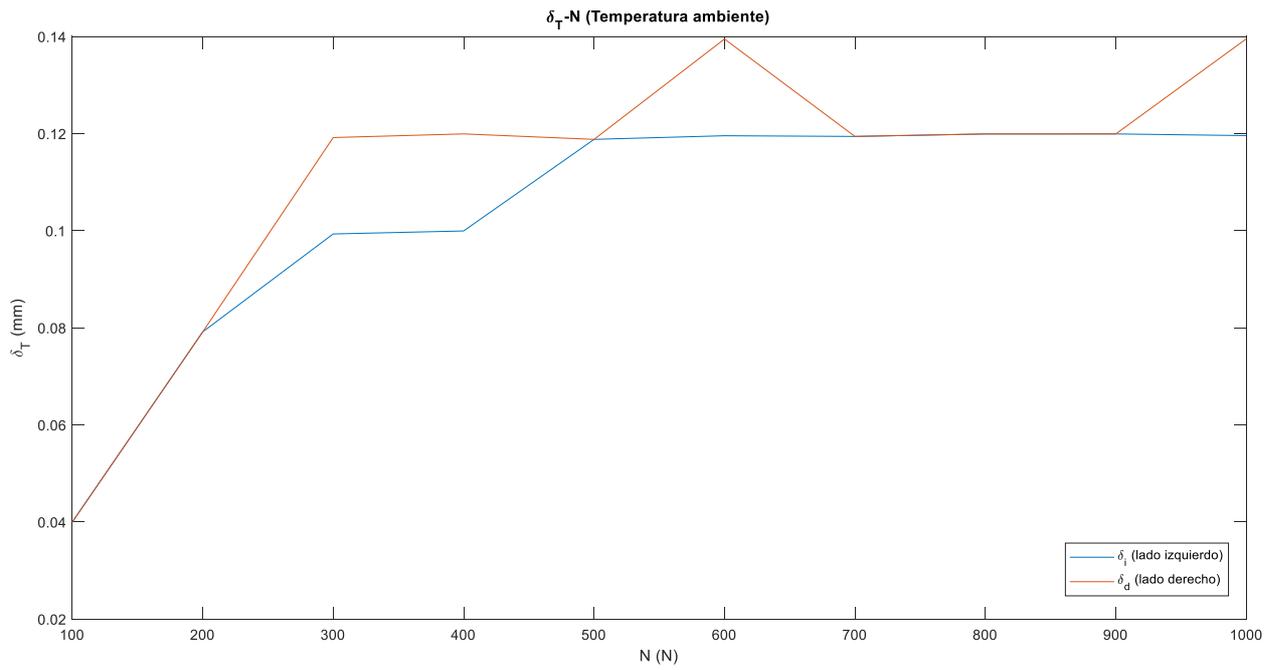


Figura 4-17  $\delta_T$ -N a temperatura ambiente

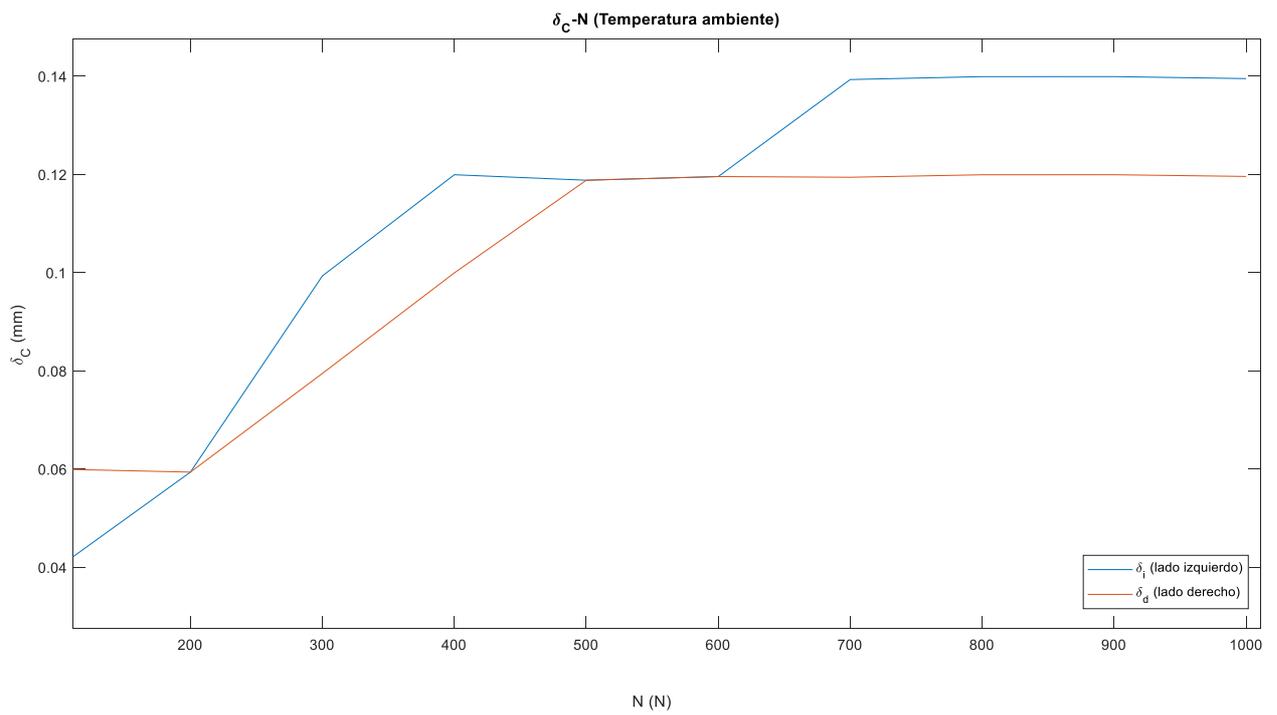
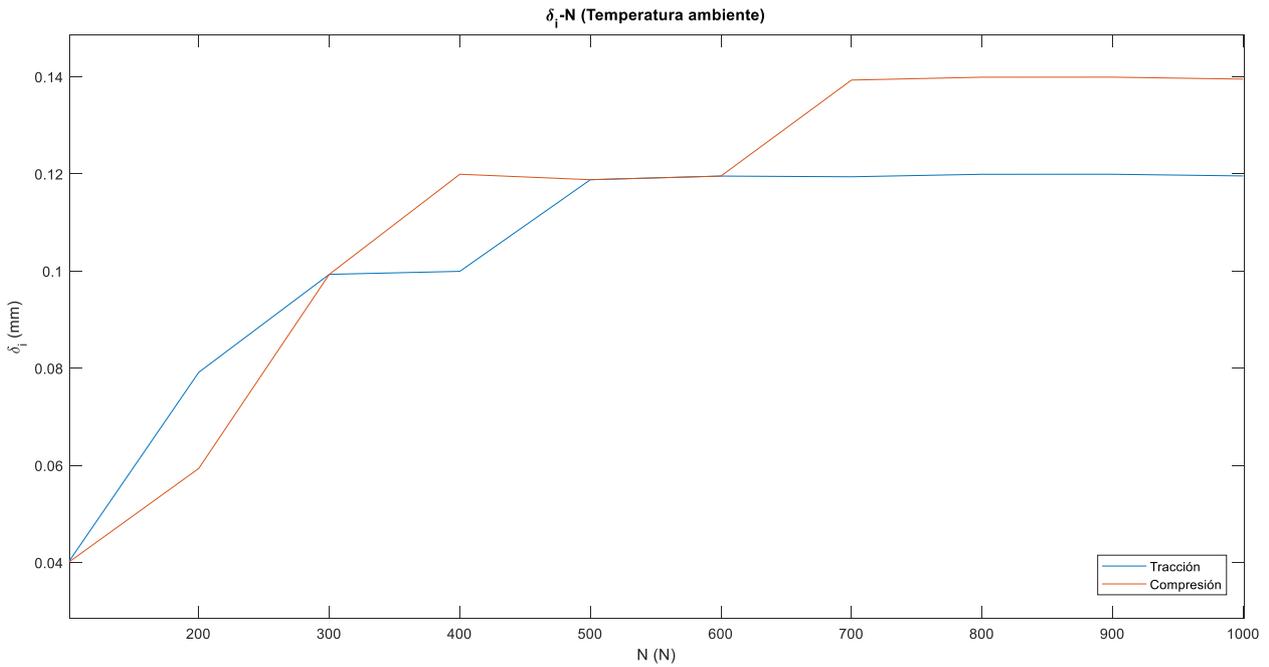
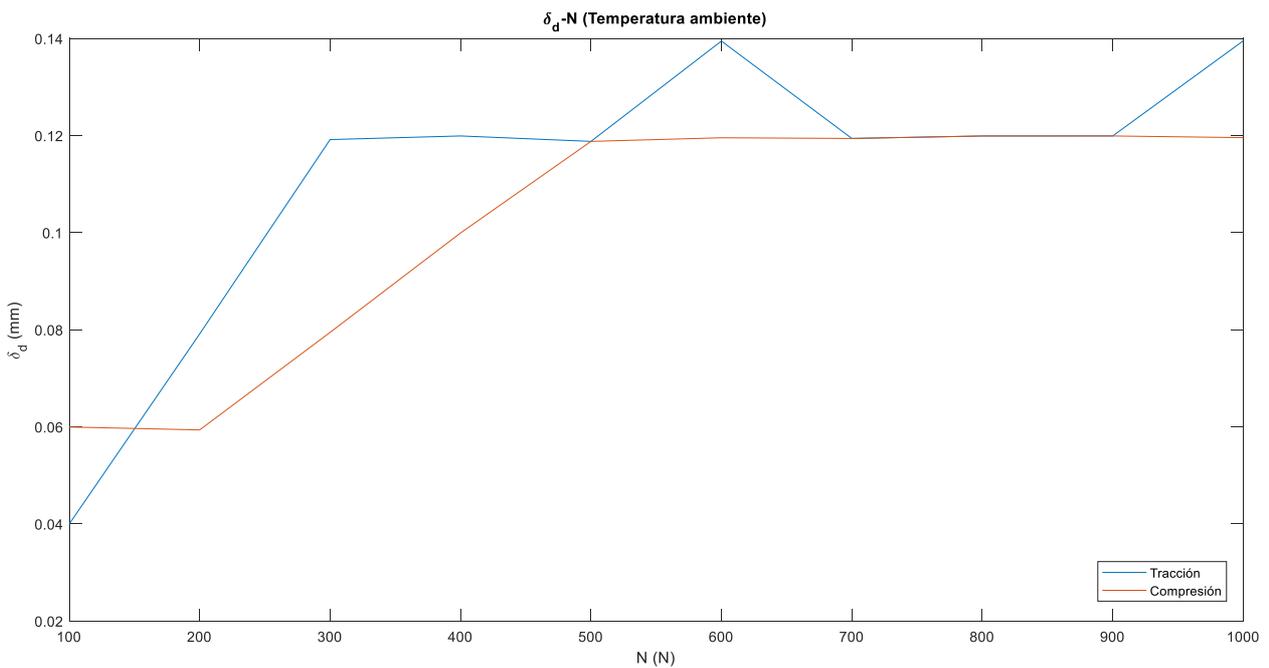


Figura 4-18  $\delta_C$ -N a temperatura ambiente

Figura 4-19  $\delta_{\text{izquierda}}-N$  a temperatura ambienteFigura 4-20  $\delta_{\text{derecha}}-N$  a temperatura ambiente

### 4.3 Variación con la temperatura

El estudio de la variación con la temperatura es el más fácil de predecir de todos. Tanto el módulo de Young como el coeficiente de Poisson decrecen cuando la temperatura aumenta, por lo que el material se vuelve menos rígido y, por tanto, los esfuerzos, rotaciones y rodaduras serán mayores.

En los siguientes apartados se han mostrado todas las gráficas enseñadas anteriormente. Su análisis cualitativo ya se ha hecho, y puede verse que el efecto de la temperatura es desplazar las gráficas. En todas ellas puede verse cómo una curva a temperatura ambiente está por debajo de su homóloga (mismas condiciones de fuerza y tensión).

Para finalizar el análisis, puede verse en algunas gráficas cómo para el valor de 600 MPa se ha roto el comportamiento que llevaba la gráfica. Esto se ha comentado anteriormente, y es debido a que a partir de ciertos valores de la tensión es necesaria una fuerza normal mínima para que el problema sea compatible y la convergencia quede garantizada. En este caso no se ha dado y ANSYS ha devuelto el último valor que tenía, que es el correspondiente a una tensión de 550 MPa, de ahí que continúe constante.

#### 4.3.1 Esfuerzos

Se puede ver que, tanto en la tracción como en la compresión, el efecto de la temperatura en el esfuerzo  $Q$  es prácticamente imperceptible, aunque sí está por encima de su homóloga a temperatura ambiente. Esto es porque la única fuerza horizontal del problema es la provocada por la tensión global y los esfuerzos inducidos por la dilatación térmica del material, que serán pequeños debido al buen comportamiento del Inconel 718 a altas temperaturas, por lo que  $Q$  permanece prácticamente inalterado.

Para el momento  $M$  el efecto de la temperatura sí es notable. En este caso, la tensión global tiende a flectar el puente en el sentido de las agujas del reloj (en tracción) o en el sentido contrario (en compresión). Esta flexión será mayor cuanto mayor sea la tensión, como se vio en las gráficas anteriores, pero también lo será conforme la temperatura aumente, ya que el material se vuelve menos rígido (módulo de elasticidad más pequeño). El efecto es por tanto que  $M$  crezca. Además, en la compresión, la diferencia entre temperaturas se acentúa más cuanto mayor es la tensión aplicada, debido a que el efecto de la tensión va predominando sobre la carga normal.

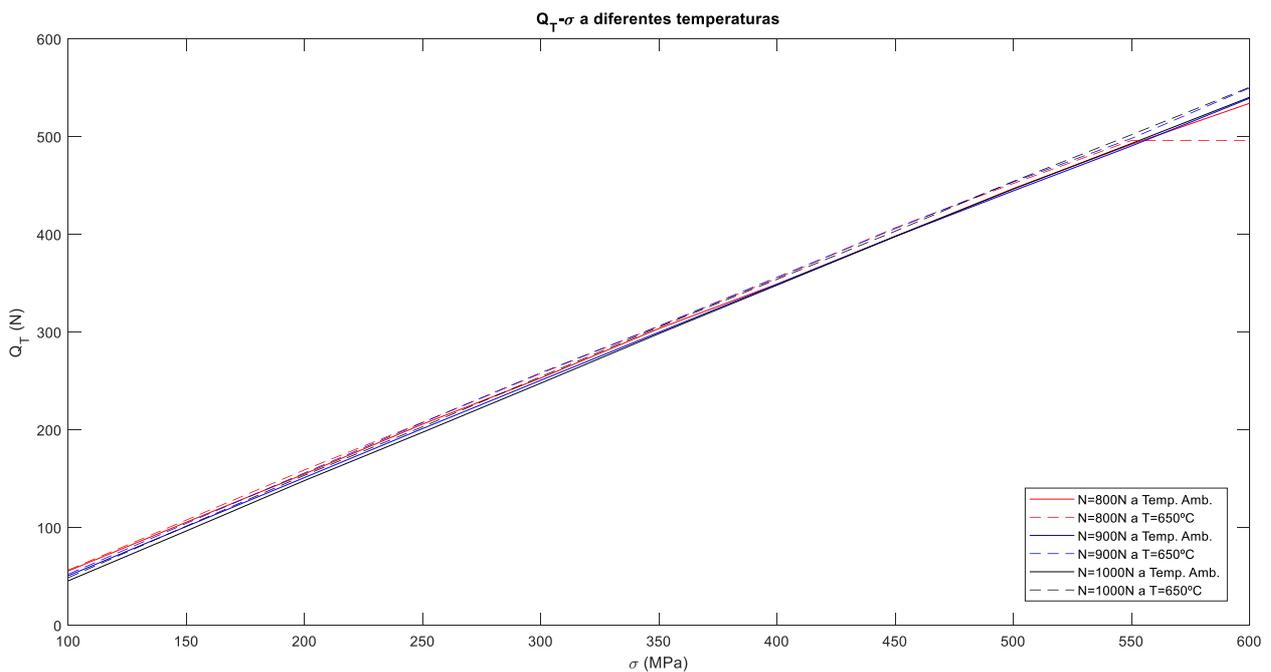


Figura 4-21  $Q_T$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas

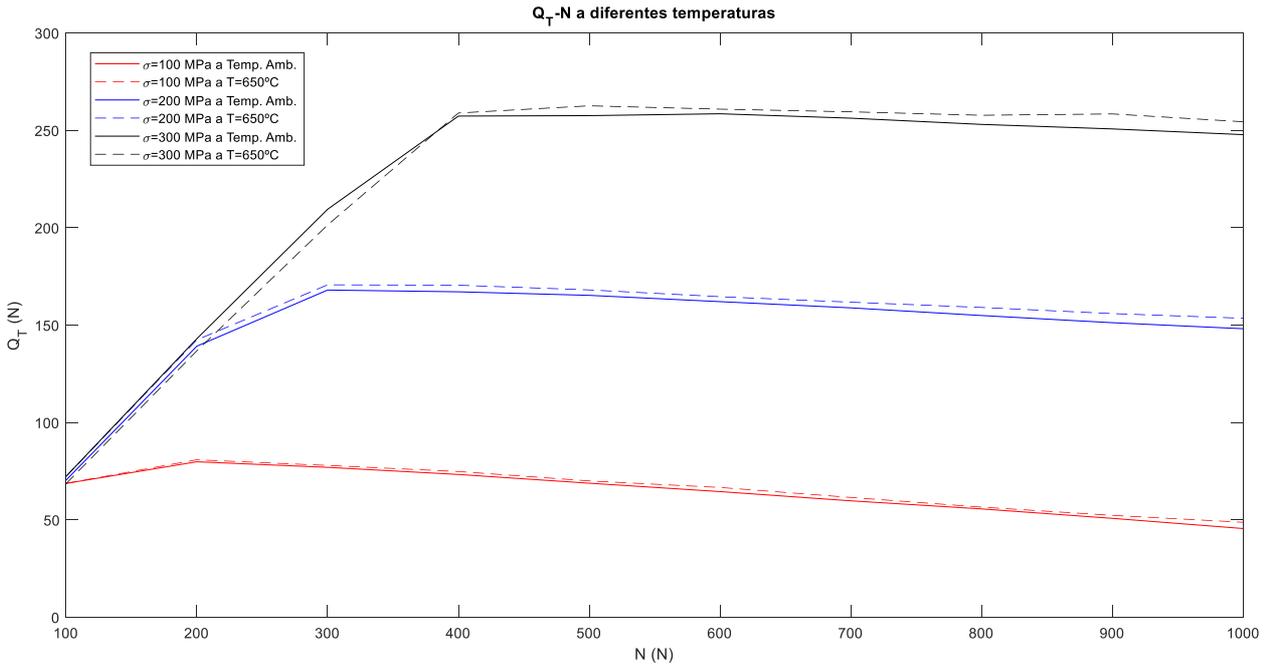


Figura 4-22  $Q_T$ - $N$  a diferentes temperaturas

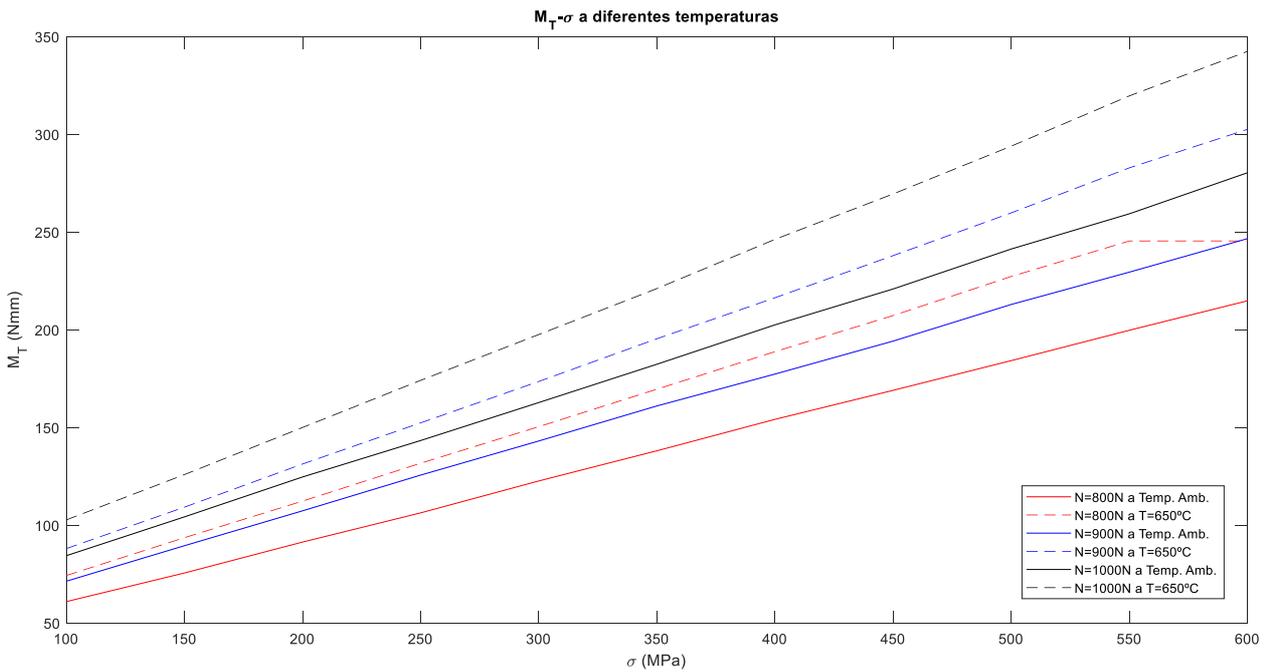


Figura 4-23  $M_T$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas

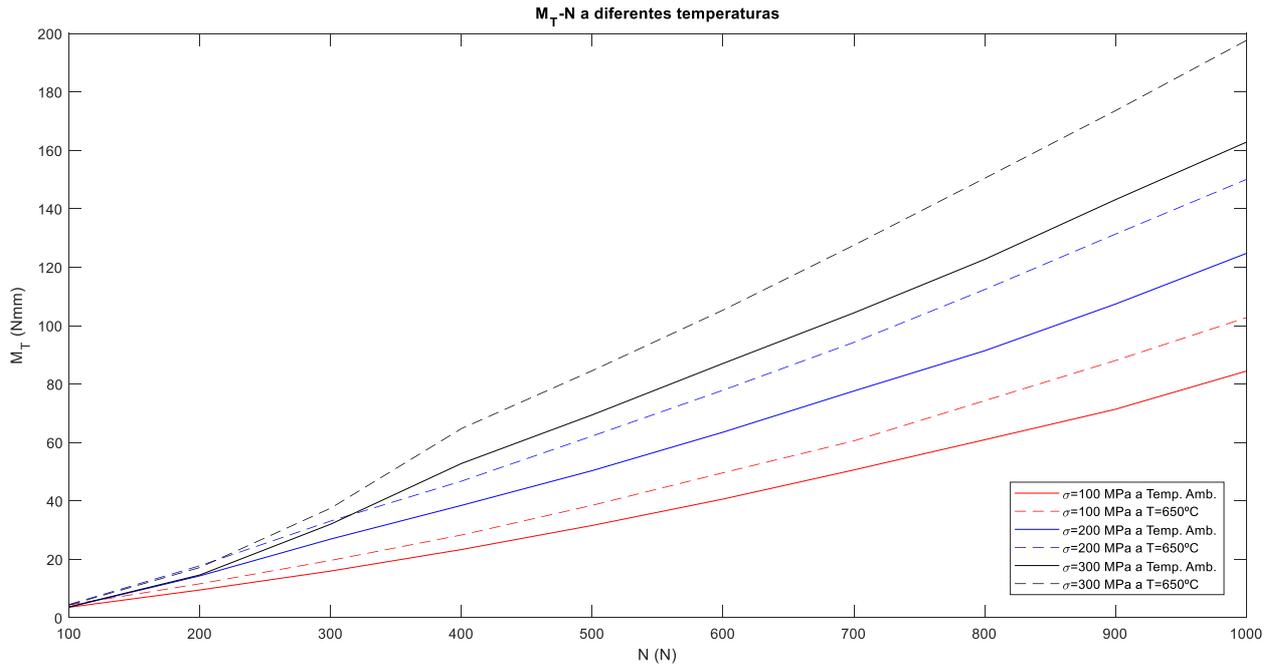


Figura 4-24  $M_T$ - $N$  a diferentes temperaturas

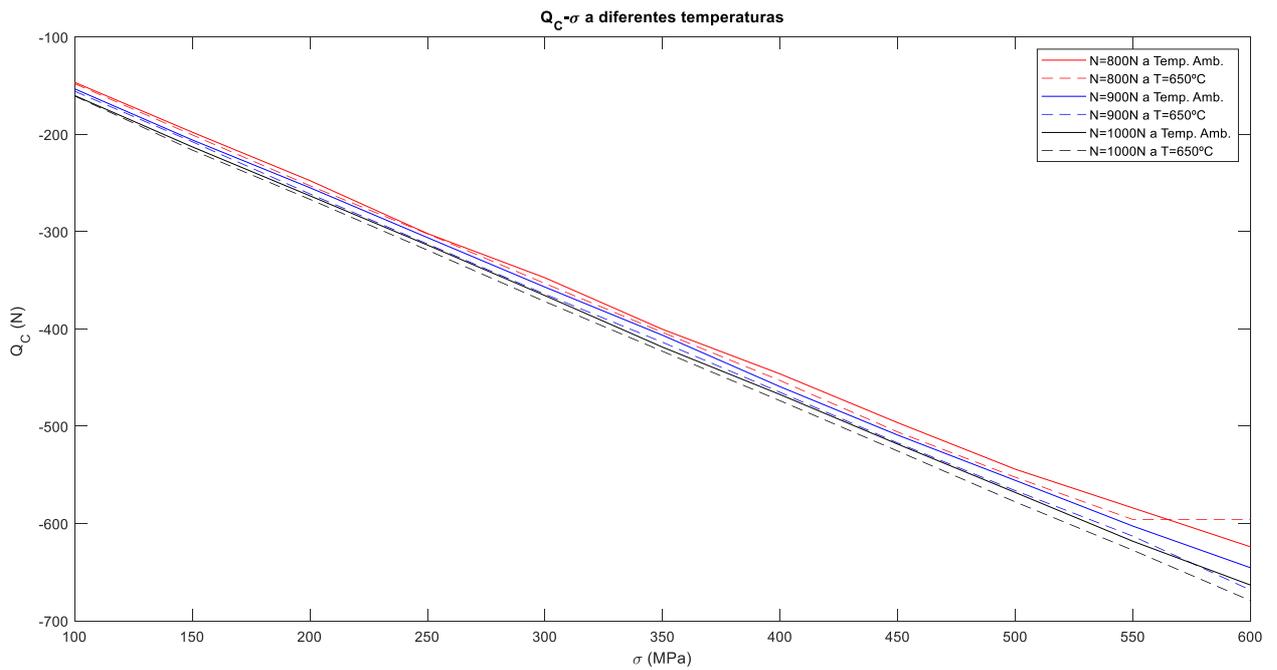


Figura 4-25  $Q_C$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas

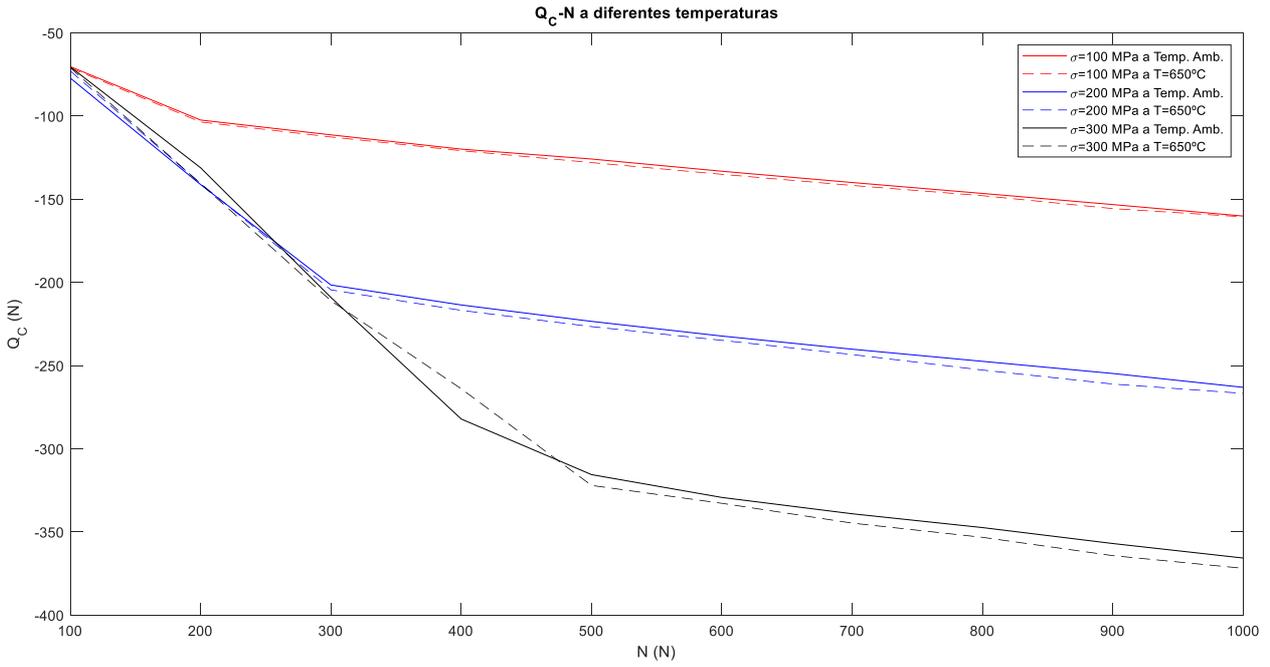


Figura 4-26  $Q_C$ - $N$  a diferentes temperaturas

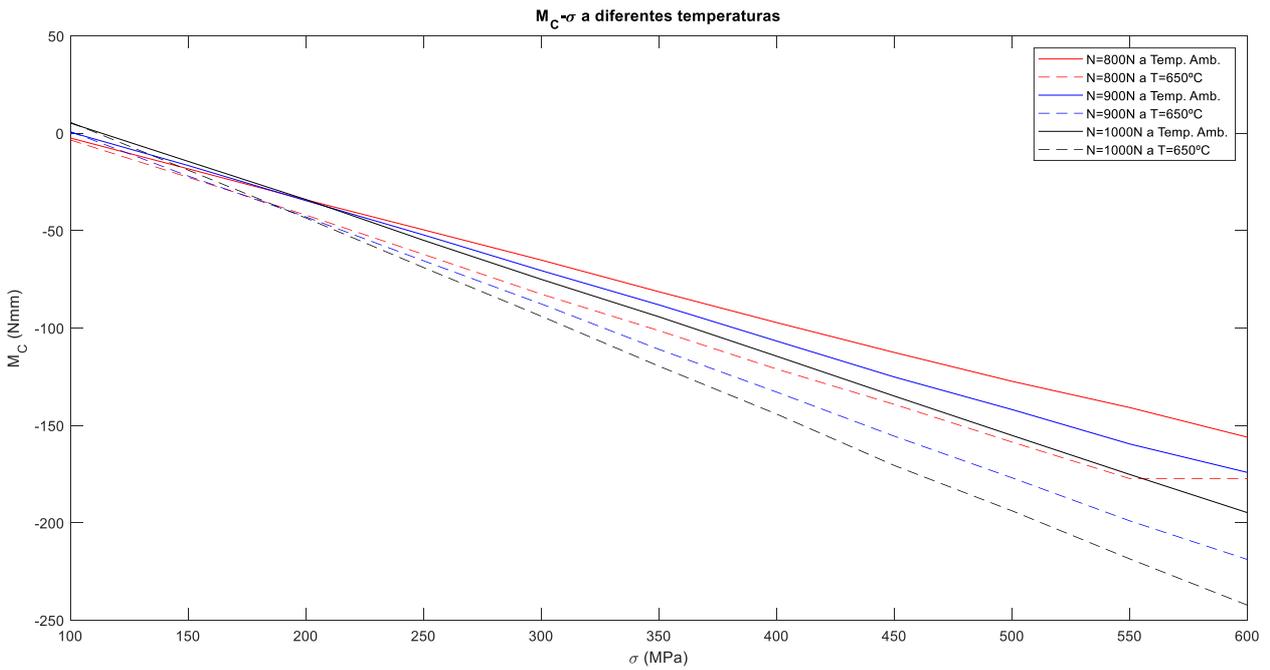


Figura 4-27  $M_C$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas

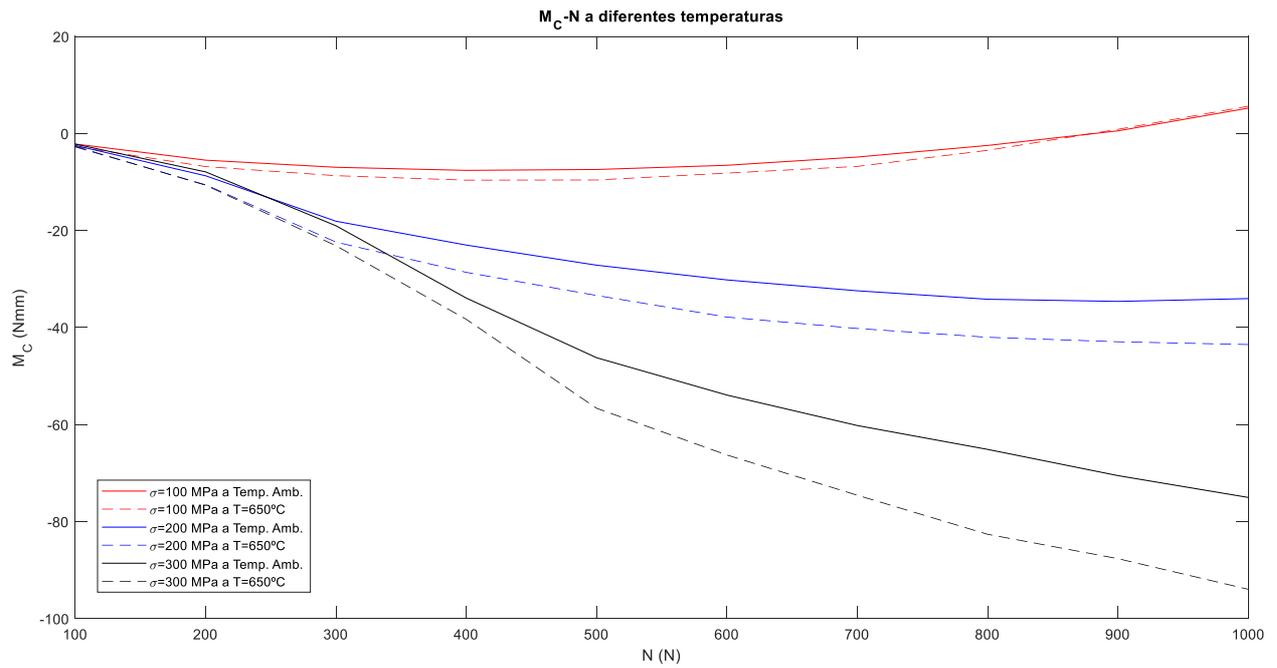


Figura 4-28  $M_C$ - $N$  a diferentes temperaturas

### 4.3.2 Rotación

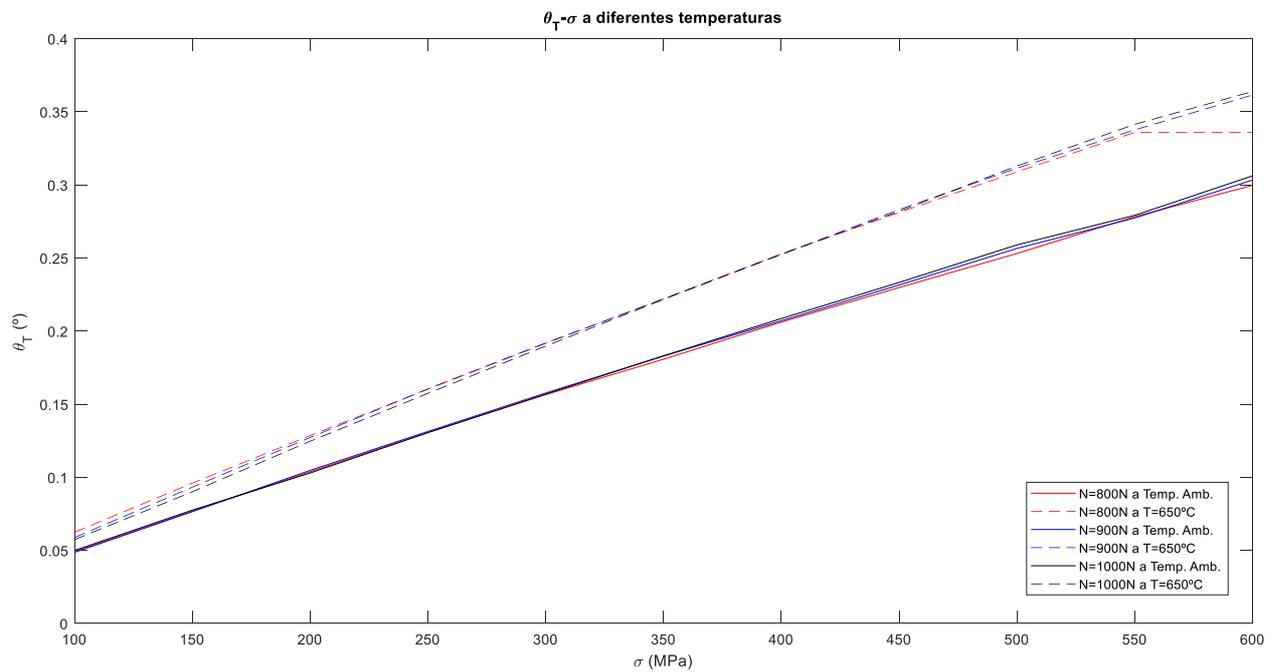


Figura 4-29  $\theta_T$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas

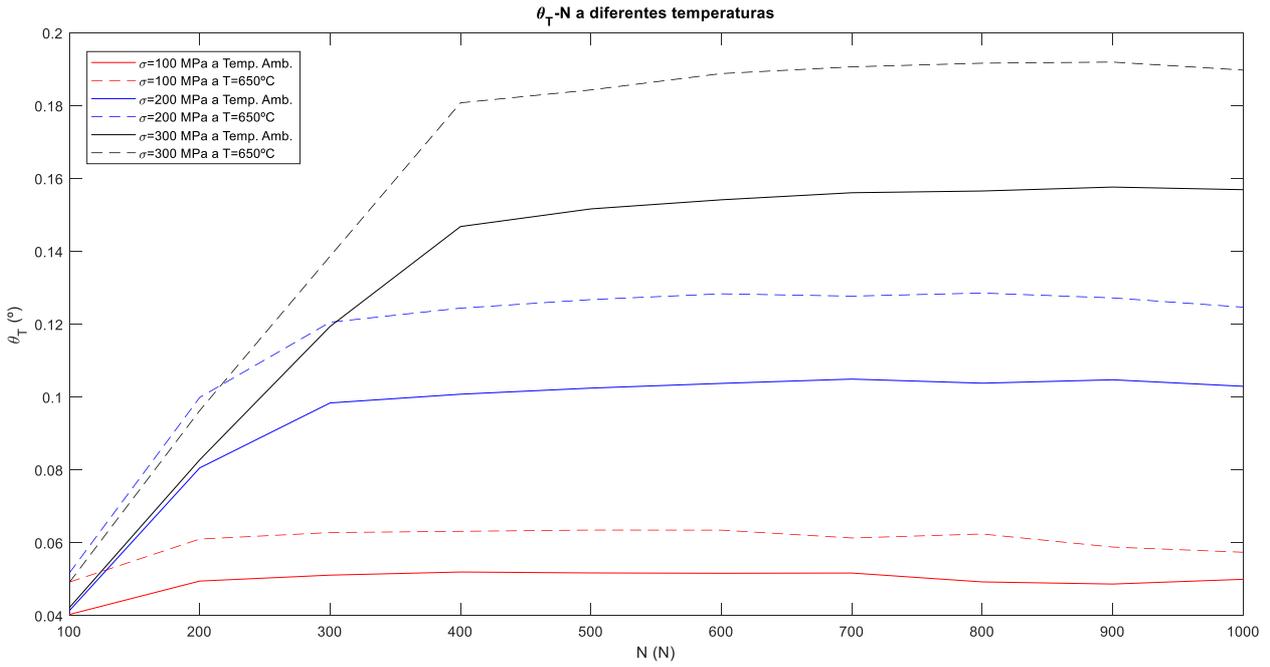


Figura 4-30  $\theta_T$ - $N$  a diferentes temperaturas

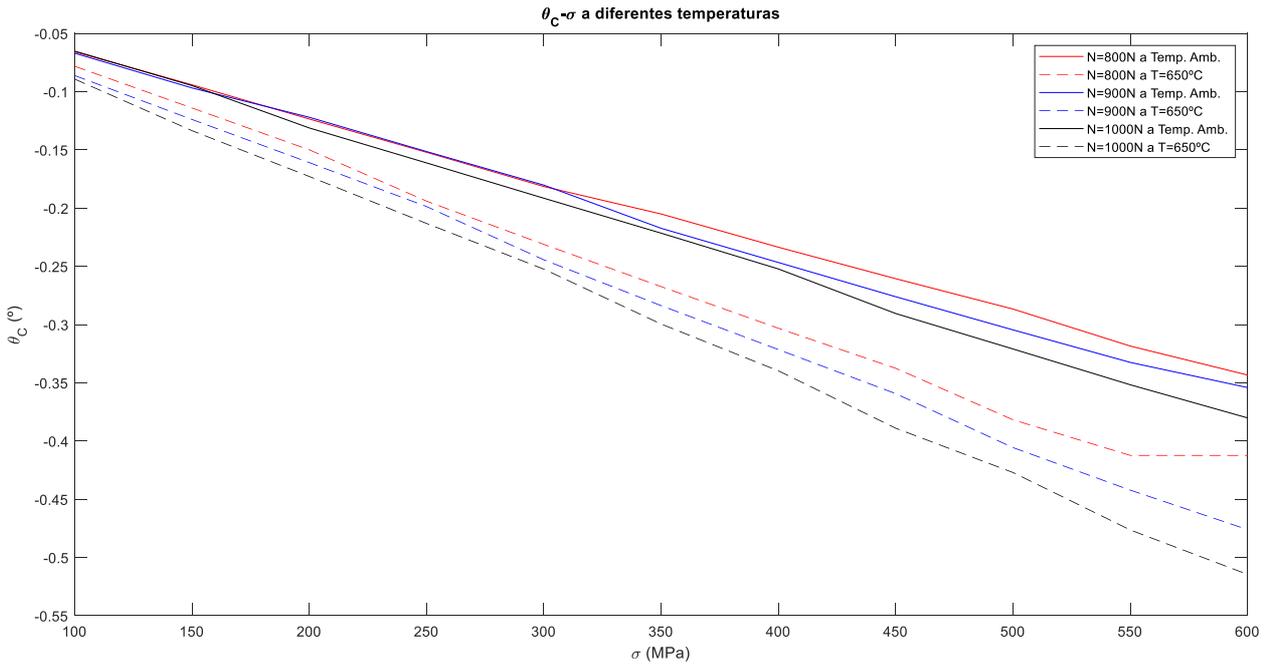


Figura 4-31  $\theta_C$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas

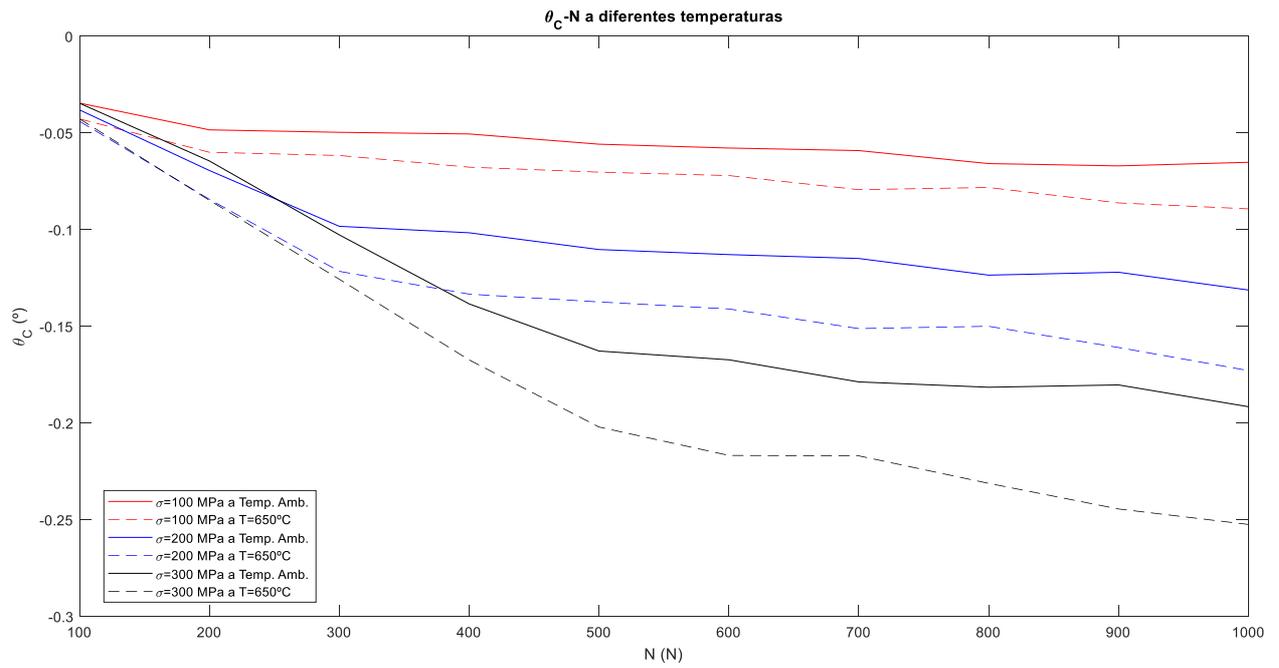


Figura 4-32  $\theta_c$ - $N$  a diferentes temperaturas

### 4.3.3 Rodadura

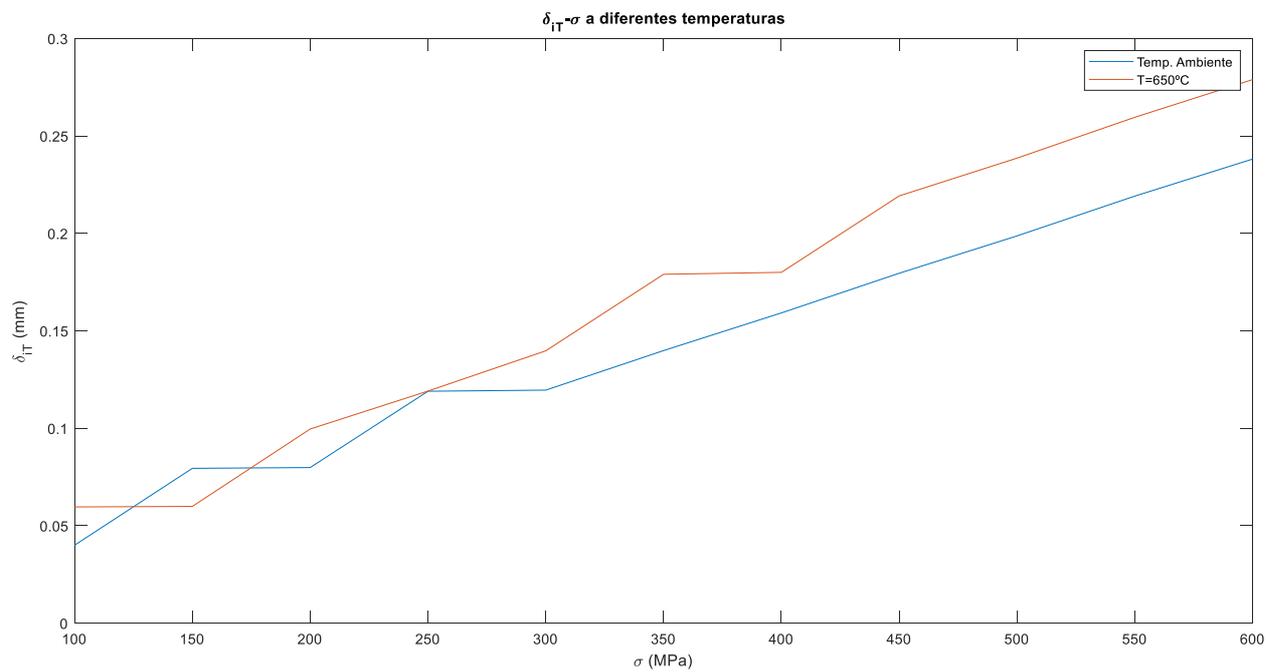


Figura 4-33  $\delta_{II}$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas (en tracción)

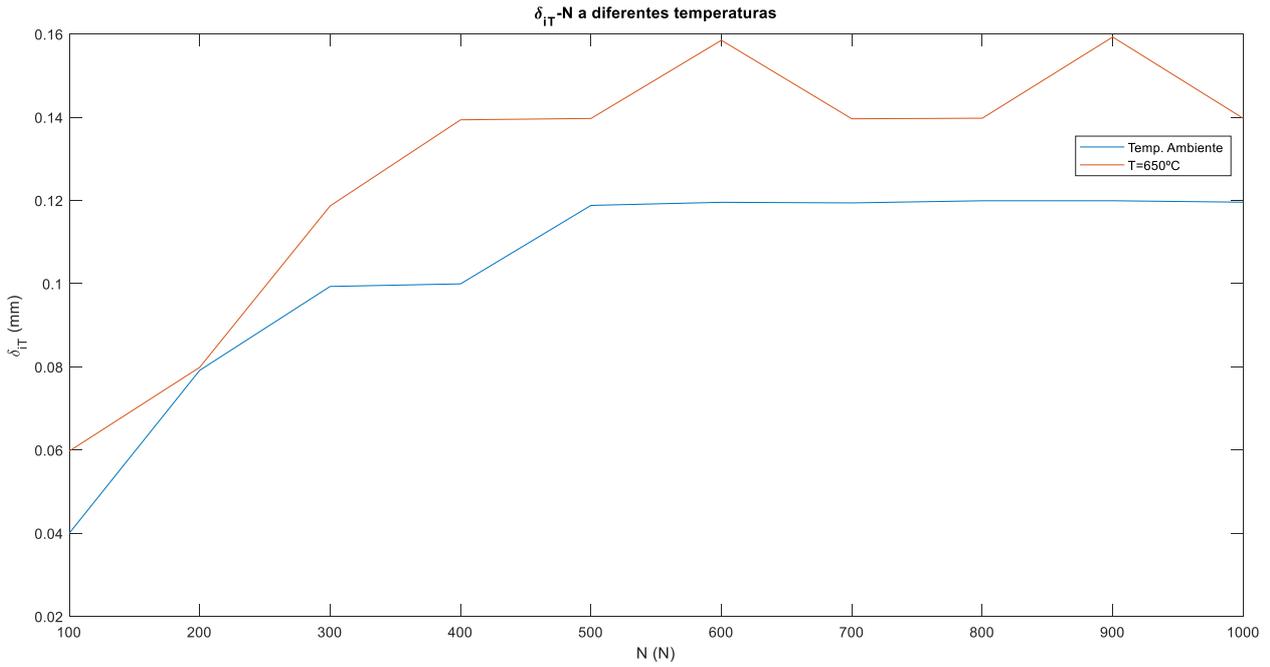


Figura 4-34  $\delta_{izquierda}$ -N a diferentes temperaturas (en tracción)

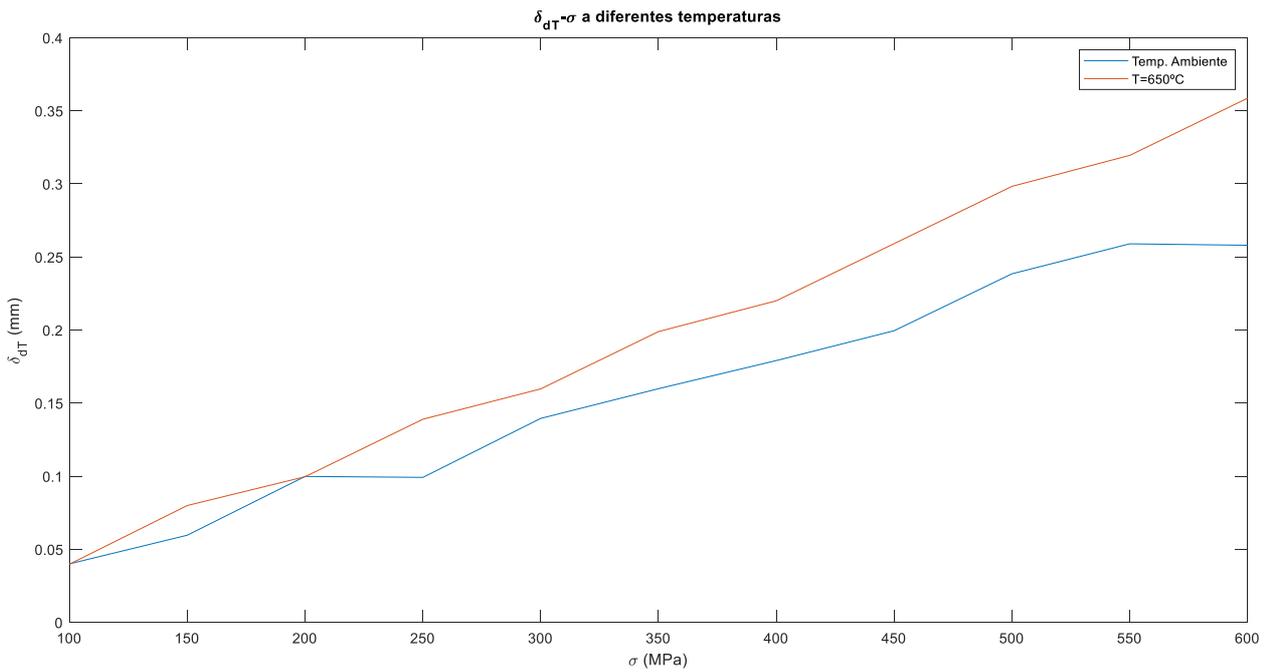


Figura 4-35  $\delta_{derecha}$ -σ a diferentes temperaturas (en tracción)

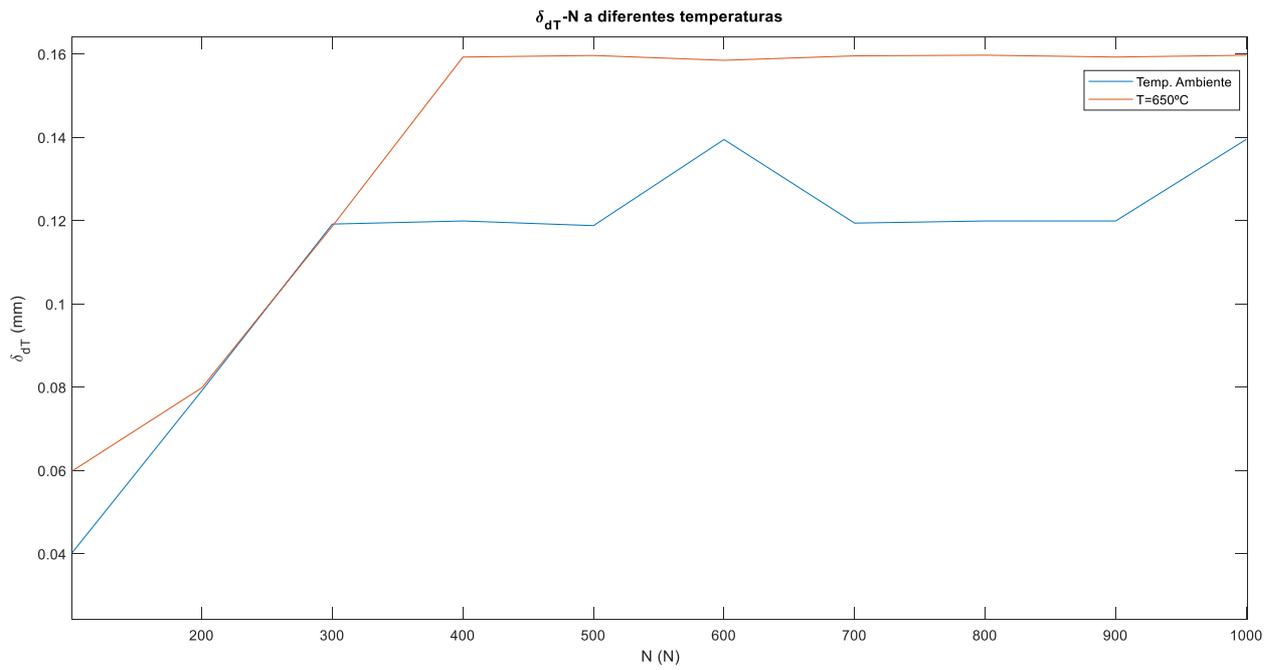


Figura 4-36  $\delta_{derecha}$ -N a diferentes temperaturas (en tracción)

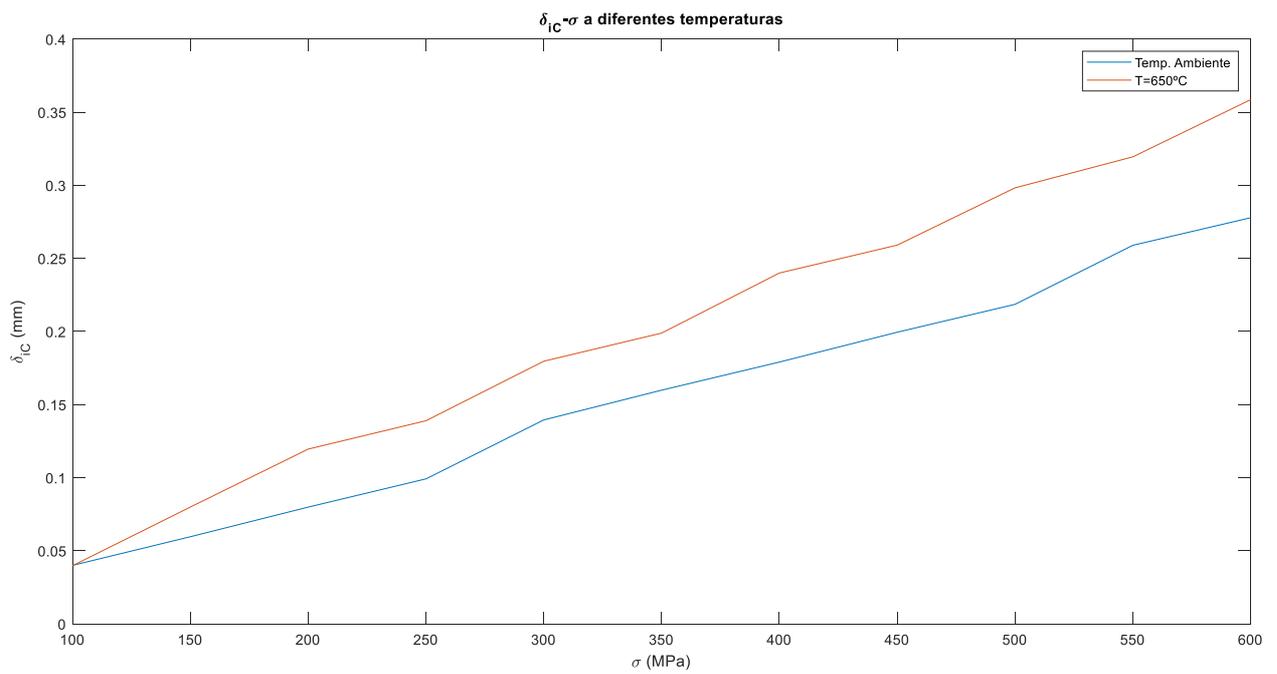


Figura 4-37  $\delta_{izquierda}$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas (en compresión)

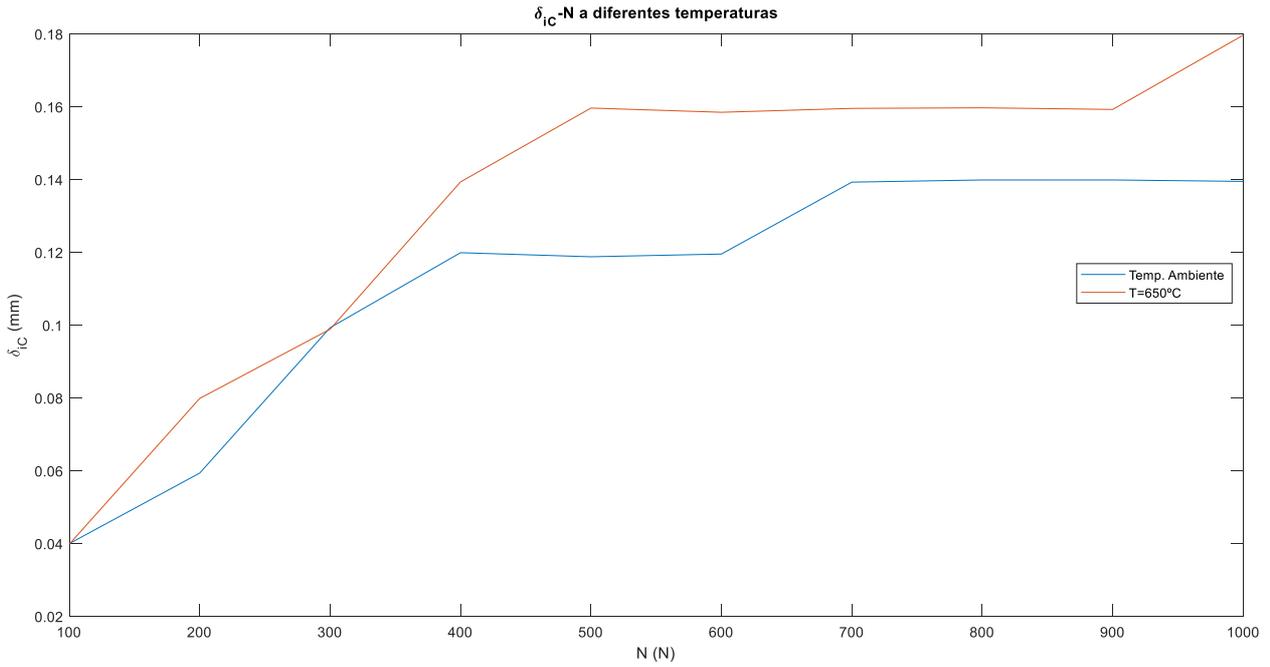


Figura 4-38  $\delta_{izquierda}$ -N a diferentes temperaturas (en compresión)

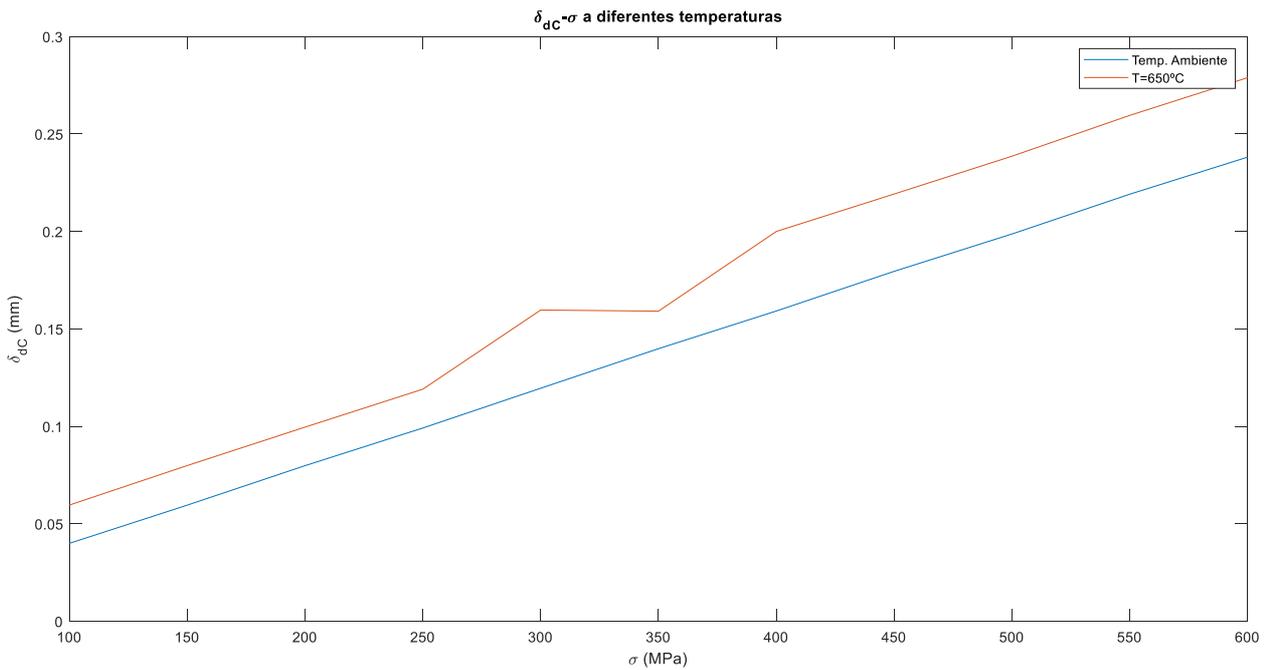


Figura 4-39  $\delta_{derecha}$ - $\sigma$  a diferentes temperaturas (en compresión)

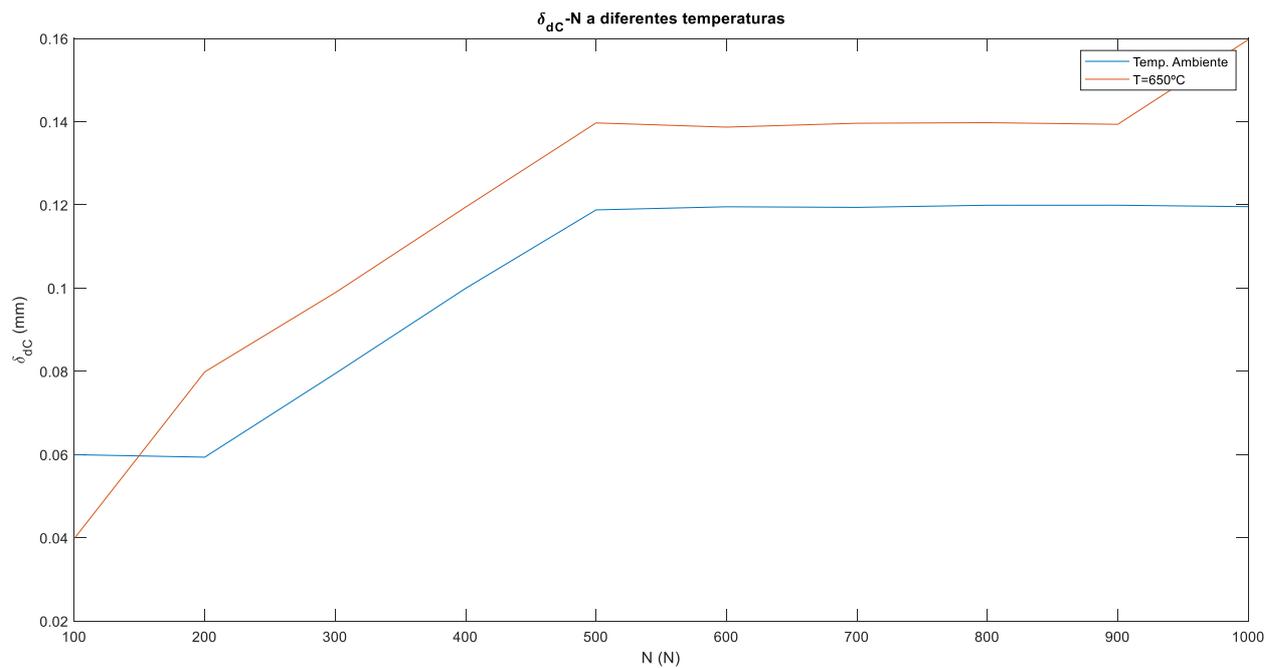


Figura 4-40  $\delta_{derecha}$ -N a diferentes temperaturas (en compresión)



## 5 CONCLUSIONES Y VÍAS DE TRABAJO FUTURO

---

Para finalizar el proyecto se expondrán en este capítulo algunas de las conclusiones que se han podido obtener, así como posibles trabajos futuros.

Se puede decir que el problema planteado ha sido bien modelado en ANSYS, pues como se vio en gráficas extraídas del propio ANSYS, el puente actúa como se presupone que debe actuar.

Por otro lado, ha quedado patente que para el análisis de las variables estudiadas con  $\sigma$  el tamaño de la malla elegido es adecuado, siendo por tanto una solución de compromiso entre el tiempo y recursos necesarios y la exactitud del modelo, desde un punto de vista cualitativo.

Sin embargo, se ha visto cómo han aparecido dientes de sierra en las gráficas de la rodadura, mucho más pronunciados en el estudio variando el valor de la fuerza normal aplicada.

Ya se dio una explicación a este fenómeno en el apartado 4.2. Sin embargo, aquí se tratará de dar una solución.

La forma óptima y precisa de calcular la rodadura es encontrando y usando la coordenada  $x$  del elemento cuyo estado sea 1.5. Este elemento será el primero que esté en contacto (realmente, será un borde el que esté en contacto y deslizando, mientras que el otro no lo estará), y habrá uno a la izquierda del contacto y otro a la derecha.

Sin embargo, no está garantizado que para cada caso con una pareja de valores  $\sigma$ - $N$  haya un elemento que tenga un estado de contacto 1.5, sino que pase directamente de un elemento con estado 1 al siguiente con un estado 2 (completamente en contacto y deslizando), y el algoritmo programado en MATLAB coja el que tiene estado 2.

El contacto se habrá producido antes, pero al obtenerse los valores de forma discreta no podrá detectarse al no haber ningún elemento con estado 1.5. Una posible solución a esto sería afinar aún más la malla, de forma que aumenten las posibilidades de que cuando se produzca el contacto físico (con un teórico estado 1.5) haya un elemento, y por tanto pueda ser detectado su estado y recogida su coordenada  $x$ .

Por ello, se ha hecho una nueva simulación para comparar los resultados con dos tamaños de malla diferentes y así poder comprobar si lo expuesto anteriormente es cierto. Se han extraído para un caso concreto de tensión ( $\sigma=300$  MPa) el valor de la rodadura con un tamaño del elemento de 20 micras (el usado en todo el proyecto) y con 5 micras (4 veces más pequeño, lo que ha conllevado un alto coste computacional).

El resultado para la rodadura ha sido el siguiente:

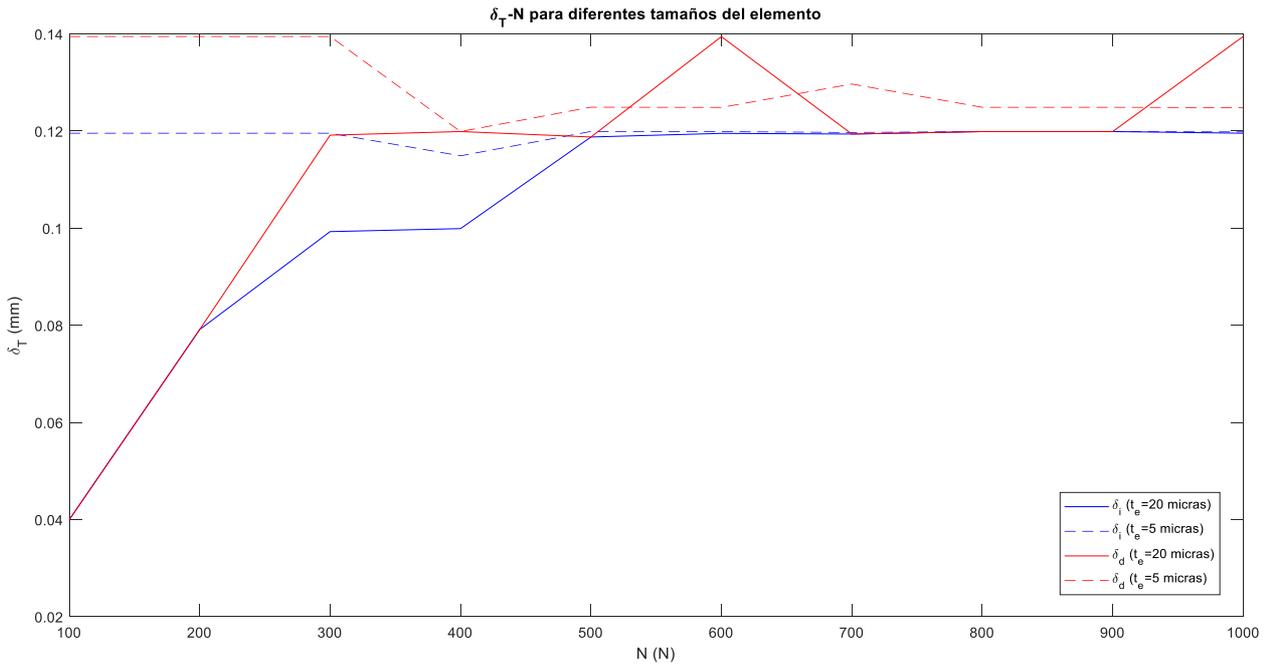


Figura 5-1  $\delta_T$ -N para diferentes tamaños del elemento

Los dientes de sierra prácticamente son inexistentes ahora y, como se presuponía, la rodadura permanece aproximadamente constante cuando se varía el valor de la carga normal.

Aprovechando que se ha ejecutado el programa completo se muestran a continuación cómo varían el resto de las variables estudiadas con  $N$ , para los dos tamaños de malla empleados.

Para el caso de los esfuerzos sufridos por el puente, los resultados han sido los siguientes:

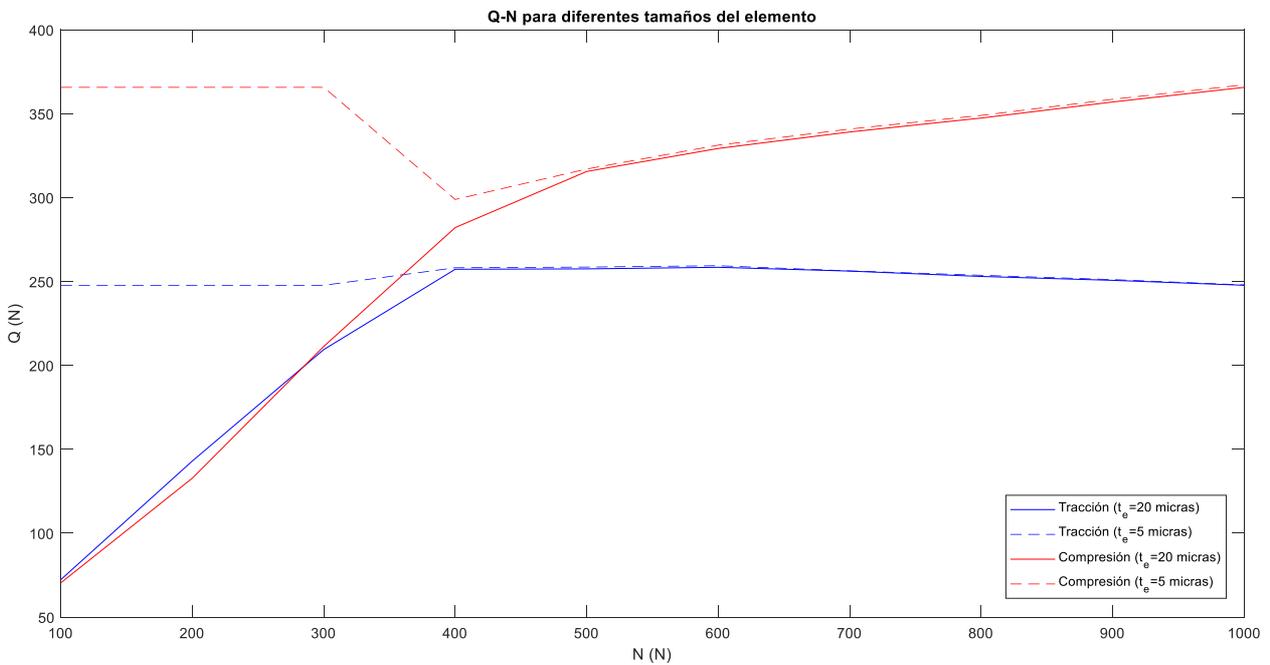


Figura 5-2 Q-N para diferentes tamaños del elemento

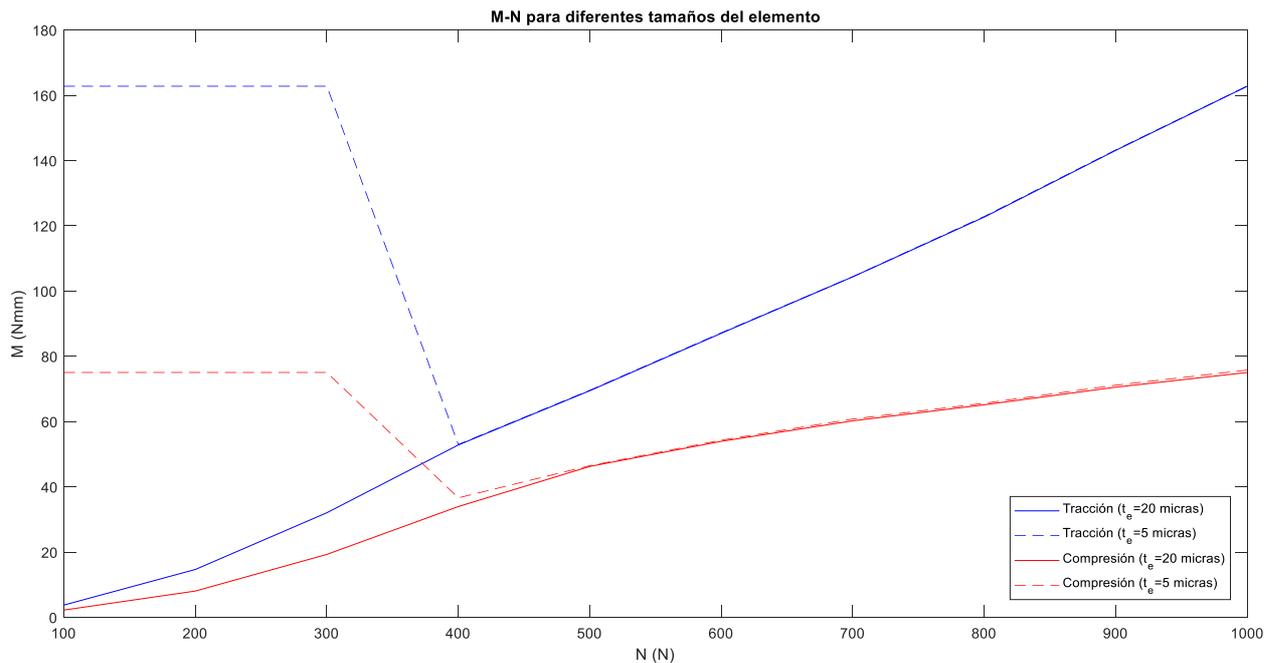


Figura 5-3 M-N para diferentes tamaños del elemento

Aunque una afinación en el mallado pueda contribuir cuantitativamente a las variables estudiadas, cualitativamente los esfuerzos no se han visto afectados. Esto era fácilmente previsible, pues como se vio en el capítulo 3, los esfuerzos se obtienen por equilibrio a través de las reacciones nodales en el borde derecho del puente, que están lejos de la zona de contacto y por tanto no quedan afectadas por el tamaño del elemento.

En cuanto a la rotación de la pata, a continuación se muestra la gráfica comparativa:

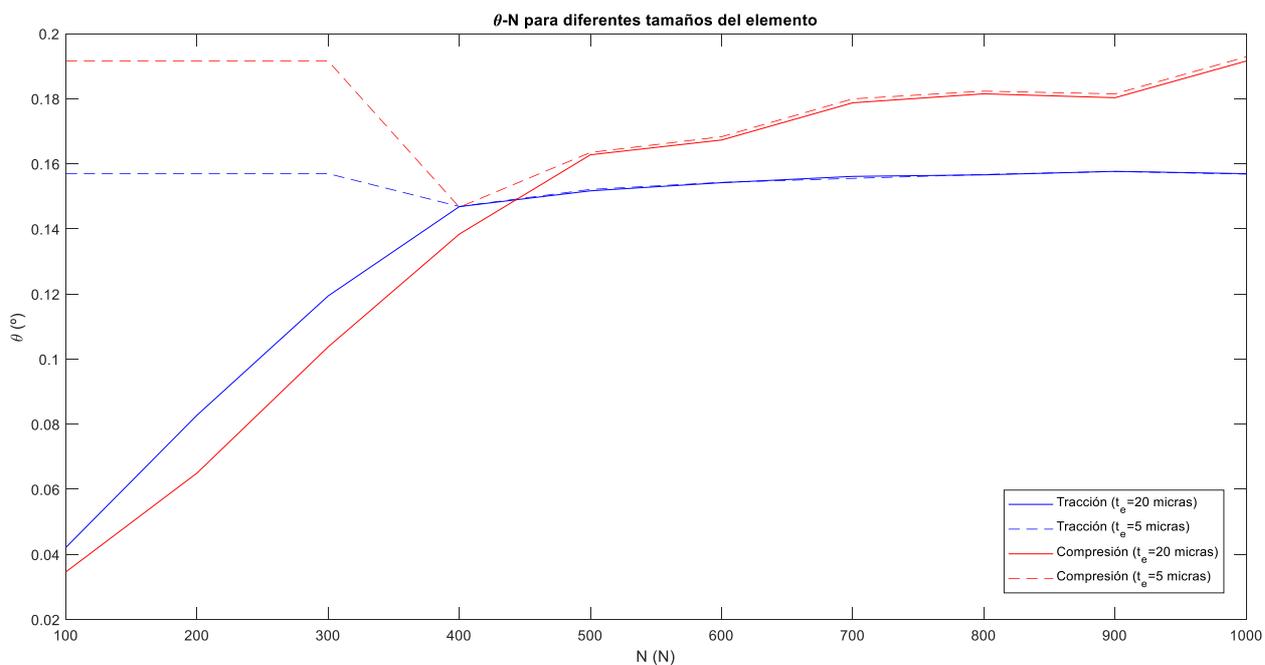


Figura 5-4  $\theta$ -N para diferentes tamaños del elemento

Aquí puede verse de forma gráfica que el tamaño del elemento elegido inicialmente (20 micras) es adecuado, puesto que se han obtenido prácticamente los mismos resultados en una zona que esta vez sí es cercana a la zona de contacto y por tanto puede verse influenciada por el tamaño del elemento elegido.

Así pues, puede concluirse que, salvo los esfuerzos, tanto la rodadura como la rotación de la pata permanecen constantes, como en un principio podía esperarse.

Sin embargo, puede verse en algunas de las gráficas un tramo constante que va desde los 100 a 300 N, para el caso de la compresión. Esto es, nuevamente, debido a que el problema no ha convergido. Se ve por tanto que para esos casos concretos de tensión, carga, temperatura y tamaño de malla el problema no es compatible y es, por tanto, una de las posibles áreas de mejora: crear un sistema lo suficientemente robusto como para que la convergencia quede garantizada, siempre y cuando la configuración del problema sea compatible de forma práctica.

Hablando de posibles trabajos futuros, se podría hacer una contrastación con un modelo de laboratorio. Actualmente ya hay algún diseño y podrían obtenerse las variables estudiadas a partir de los datos arrojados por las bandas extensométricas localizadas en el puente, al menos la rotación de la pata y los esfuerzos. Así podría comprobarse la validez del modelo numérico de este proyecto.

Finalmente, con el objetivo de una mayor precisión de cara a usos que pudieran darse a las variables obtenidas, podría incluirse también algún modelo de desgaste del puente. El material empezará a desprenderse en la zona de contacto y las variables estudiadas se verán alteradas, llegando un punto en el que ya no es válido el estudio realizado aquí, al tenerse una geometría completamente distinta. Sería interesante ver cómo varían las magnitudes estudiadas ya no solo con la tensión, carga y temperatura, sino también con el desgaste sufrido después de un número determinado de ciclos.

# ANEXO A: CÓDIGO DE ANSYS

---

```
finish
/clear
/title, Fretting

/prep7

! DATOS DEL MATERIAL Y VALOR DE LA CARGA
E=199947.96
nu=0.294
N=600
sigma=200
alpha=1.4

! GEOMETRÍA DE LA PROBETA
X=20
Y=7

! GEOMETRÍA DEL PUENTE
H1 = 10
H2 = 1
H=H1+H2
L1 = 12
L2 = 3
L=L1+L2

R=50
beta=asin(L2/2/R)
d=R*(1-cos(beta))

! SEMIANCHO TEÓRICO DE LA ZONA DE CONTACTO
pi=3.141592654
a=sqrt(8*N*R*(1-nu**2)/(pi*E))

xa=alpha*a
theta=asin(xa/R)
ya=R*(1-cos(theta))

! DEFINICIÓN DEL PUENTE
k,1,-L2/2,d
k,2,-L2/2,d+H
k,3,L1+L2/2,d+H
```

k,4,L1+L2/2,d+H2  
k,5,L2/2,d+H2  
k,6,L2/2,d  
k,7,0,R  
k,8,-L2/2,d+H2  
k,9,L2/2,d+H  
k,11,-xa,ya  
k,12,-xa,ya+0.5  
k,13,xa,ya+0.5  
k,14,xa,ya

larc,11,14,7,50  
l,11,12  
l,12,13  
l,13,14  
larc,1,11,7,50  
l,1,8  
l,8,12  
l,5,8  
larc,6,14,7,50  
l,5,6  
l,5,13

a1,1,2,3,4  
a1,2,5,6,7  
a1,4,9,10,11  
a1,3,7,8,11  
a,2,9,5,8  
ldiv,14,,,  
a,3,4,5,9

! DEFINICIÓN DE LA PROBETA

k,51,-(X-L1-L2/2),0  
k,52,L1+L2/2,0  
k,53,L1+L2/2,-Y  
k,54,-(X-L1-L2/2),-Y  
k,55,-xa,0  
k,56,-xa,-0.5  
k,57,xa,-0.5  
k,58,xa,0  
k,59,-L2/2,0  
k,60,-L2/2,-H2  
k,61,L2/2,-H2  
k,62,L2/2,0

a, 55, 56, 57, 58  
a, 55, 56, 60, 59  
a, 57, 58, 62, 61  
a, 56, 57, 61, 60  
a, 51, 59, 60, 61, 62, 52, 53, 54

! DEFINICIÓN DEL ELEMENTO  
et, 1, plane182  
mp, ex, 1, E  
mp, nuxy, 1, NU  
te=0.02

! MALLADO  
lesize, 1, te  
lesize, 2, te  
lesize, 3, te  
lesize, 4, te  
lesize, 12, , , 16

amesh, 1  
mshape, 1  
amesh, 2  
amesh, 3  
amesh, 4  
amesh, 5  
amesh, 6

nummrg, node  
cm, nodos\_pad, node

lesize, 19, te  
lesize, 20, te  
lesize, 21, te  
lesize, 22, te

mshape, 0  
amesh, 7  
mshape, 1  
amesh, 8  
amesh, 9  
amesh, 10  
amesh, 11

```

cmse1,u,nodos_pad
nummrg,node

! CREACIÓN DE GRUPOS DE NODOS PARA EL CONTACTO
lsel,s,line,,1
nsll,s,1
cm,ncontacto_puente,node
allsel
lsel,s,line,,22
nsll,s,1
cm,ncontacto_probeta,node

! CONSTRUCCIÓN DEL PAR DE CONTACTO - INICIO

CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.7
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,81
REAL,81
ET,81,169
ET,82,172
R,81,,1.0,0.1,0,
RMORE,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,82,3,0
KEYOPT,82,4,0
KEYOPT,82,5,3
KEYOPT,82,7,0
KEYOPT,82,8,0
KEYOPT,82,9,0
KEYOPT,82,10,2
KEYOPT,82,11,0
KEYOPT,82,12,0
KEYOPT,82,2,0
! Generate the target surface
NSEL,S,,NCONTACTO_PUENTE

```

```
CM,_TARGET,NODE
TYPE,81
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
NSEL,S,,NCONTACTO_PROBETA
CM,_CONTACT,NODE
TYPE,82
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,81
ESEL,A,TYPE,,82
ESEL,R,REAL,,81
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPlot
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,81
ESEL,A,TYPE,,82
ESEL,R,REAL,,81
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
```

! CONSTRUCCIÓN DEL PAR DE CONTACTO - FIN

```
! CONDICIONES DE CONTORNO
```

```
nse1,s,loc,x,L1+L2/2
```

```
d,all,ux,0
```

```
allsel
```

```
nse1,s,loc,y,-Y
```

```
d,all,uy,0
```

```
! CARGAS
```

```
*get,nmax,node,0,num,maxd
```

```
n,nmax+1,0,1.1*H
```

```
ET,80,MASS21
```

```
R,80,1E-10,1E-10,1E-10,1E-10,1E-10,1E-10
```

```
TYPE,80
```

```
REAL,80
```

```
E,nmax+1
```

```
lsel,s,line,,12
```

```
nsll,s,1
```

```
nse1,a,node,,nmax+1
```

```
cerig,nmax+1,all,,
```

```
allsel
```

```
F,nmax+1,fy,-N
```

```
allsel
```

```
/solu
```

```
EQSL,AMG
```

```
nsubst,100,100,100
```

```
solve
```

```
lsel,s,line,,34
```

```
nsll,s,1
```

```
cm,nodos_sigma,node
```

```
/PSF,PRES,NORM,2,0,1
```

```
sf,nodos_sigma,pres,-sigma
```

```
allsel
```

```
nsubst,100,100,100
```

```
solve
```

```
/PSF,PRES,NORM,2,0,1
```

```
sf,nodos_sigma,pres,sigma
```

```
allsel
nsubst,100,100,100
solve

/post1

lsel,s,line,,6
lsel,a,line,,14
nsl1,s,1
cm,ngiro,node
*set,tabla_ngiro
*vget,tabla_ngiro,node,,nlist
*get,num_ngiro,node,0,count

esel,s,type,,82
nsl,e,s
cm,erod,elem
*set,tabla_erod
*vget,tabla_erod,elem,,elist
*get,num_erod,elem,0,count

lsel,s,line,,16
nsl1,s,1
cm,nreaccion,node
*set,tabla_nreaccion
*vget,tabla_nreaccion,node,,nlist
*get,num_nreaccion,node,0,count

! ANÁLISIS DE LA PRESIÓN
set,1,last
esel,s,elem,,erod
nsl,e,s
etable,econt,cont,stat
*set,Tabla_Rod_F
*dim,Tabla_Rod_F,array,num_erod,3
*do,I,1,num_erod,1
cx_rod=centrx(tabla_erod(I))
cy_rod=centry(tabla_erod(I))
*get,ContYN,etab,1,elem,tabla_erod(I)
Tabla_Rod_F(I,1)=cx_rod
Tabla_Rod_F(I,2)=cy_rod
Tabla_Rod_F(I,3)=ContYN
*enddo
```

```
! ANÁLISIS DE LA TRACCIÓN
set,2,last
esel,s,elem,,erod
nsle,s
etable,econt,cont,stat
*set,Tabla_Rod_T
*dim,Tabla_Rod_T,array,num_erod,3
*do,I,1,num_erod,1
cx_rod=centrx(tabla_erod(I))
cy_rod=centry(tabla_erod(I))
*get,ContYN,etab,1,elem,tabla_erod(I)
Tabla_Rod_T(I,1)=cx_rod
Tabla_Rod_T(I,2)=cy_rod
Tabla_Rod_T(I,3)=ContYN
*enddo

*set,Tabla_Giro_T
*dim,Tabla_Giro_T,array,num_ngiro,4
*do,I,1,num_ngiro,1
cx_giroT=nx(tabla_ngiro(I))
cy_giroT=ny(tabla_ngiro(I))
dx_giroT=ux(tabla_ngiro(I))
dy_giroT=uy(tabla_ngiro(I))
Tabla_Giro_T(I,1)=cx_giroT
Tabla_Giro_T(I,2)=cy_giroT
Tabla_Giro_T(I,3)=dx_giroT
Tabla_Giro_T(I,4)=dy_giroT
*enddo

*set,Tabla_Reaccion_T
*dim,Tabla_Reaccion_T,array,num_nreaccion,4
*do,I,1,num_nreaccion,1
cx_reaccionT=nx(tabla_nreaccion(I))
cy_reaccionT=ny(tabla_nreaccion(I))
*get,Fx_T,node,tabla_nreaccion(I),RF,FX
Mz_T=Fx_T*cy_reaccionT
Tabla_Reaccion_T(I,1)=cx_reaccionT
Tabla_Reaccion_T(I,2)=cy_reaccionT
Tabla_Reaccion_T(I,3)=Fx_T
Tabla_Reaccion_T(I,4)=Mz_T
*enddo
```

```
! ANÁLISIS DE LA COMPRESIÓN
set,3,last
esel,s,elem,,erod
nsle,s
etable,econt,cont,stat
*set,Tabla_Rod_C
*dim,Tabla_Rod_C,array,num_erod,3
*do,I,1,num_erod,1
cx_rod=centrx(tabla_erod(I))
cy_rod=centry(tabla_erod(I))
*get,ContYN,etab,1,elem,tabla_erod(I)
Tabla_Rod_C(I,1)=cx_rod
Tabla_Rod_C(I,2)=cy_rod
Tabla_Rod_C(I,3)=ContYN
*enddo

*set,Tabla_Giro_C
*dim,Tabla_Giro_C,array,num_ngiro,4
*do,I,1,num_ngiro,1
cx_giroC=nx(tabla_ngiro(I))
cy_giroC=ny(tabla_ngiro(I))
dx_giroC=ux(tabla_ngiro(I))
dy_giroC=uy(tabla_ngiro(I))
Tabla_Giro_C(I,1)=cx_giroC
Tabla_Giro_C(I,2)=cy_giroC
Tabla_Giro_C(I,3)=dx_giroC
Tabla_Giro_C(I,4)=dy_giroC
*enddo

*set,Tabla_Reaccion_C
*dim,Tabla_Reaccion_C,array,num_nreaccion,4
*do,I,1,num_nreaccion,1
cx_reaccionC=nx(tabla_nreaccion(I))
cy_reaccionC=ny(tabla_nreaccion(I))
*get,Fx_C,node,tabla_nreaccion(I),RF,FX
Mz_C=Fx_C*cy_reaccionC
Tabla_Reaccion_C(I,1)=cx_reaccionC
Tabla_Reaccion_C(I,2)=cy_reaccionC
Tabla_Reaccion_C(I,3)=Fx_C
Tabla_Reaccion_C(I,4)=Mz_C
*enddo
```

```
! EXPORTACIÓN DE LOS RESULTADOS
*CREATE, 'Tablas_Resultados', ' ', ' '

*CFOPEN, Tabla_Rod_F, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Rod_F(1,1,1), Tabla_Rod_F(1,2,1), Tabla_Rod_F(1,3,1),
((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*CFOPEN, Tabla_Rod_T, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Rod_T(1,1,1), Tabla_Rod_T(1,2,1), Tabla_Rod_T(1,3,1),
((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*CFOPEN, Tabla_Giro_T, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Giro_T(1,1,1), Tabla_Giro_T(1,2,1), Tabla_Giro_T(1,3,1), Tabla_Giro_T
(1,4,1), ((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*CFOPEN, Tabla_Reaccion_T, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Reaccion_T(1,1,1), Tabla_Reaccion_T(1,2,1), Tabla_Reaccion_T(1,3,1),
Tabla_Reaccion_T(1,4,1), ((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*CFOPEN, Tabla_Rod_C, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Rod_C(1,1,1), Tabla_Rod_C(1,2,1), Tabla_Rod_C(1,3,1),
((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*CFOPEN, Tabla_Giro_C, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Giro_C(1,1,1), Tabla_Giro_C(1,2,1), Tabla_Giro_C(1,3,1), Tabla_Giro_C
(1,4,1), ((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*CFOPEN, Tabla_Reaccion_C, dat, ,
*VWRITE, Tabla_Reaccion_C(1,1,1), Tabla_Reaccion_C(1,2,1), Tabla_Reaccion_C(1,3,1),
Tabla_Reaccion_C(1,4,1), ((SP)6E14.6, ' ')
*CFCLOSE

*END

*USE, Tablas_Resultados
```

# ANEXO B: CÓDIGO DE MATLAB

```
clear all
close all
clc

%% VARIACIÓN CON EL VALOR DE LA TRACCIÓN-COMPRESIÓN (SIGMA) A TEMPERATURA
AMBIENTE

F=[800,900,1000];
S=(100:50:600);
Alpha=(1.35:0.025:1.6);
E=199947.96;
nu=0.294;

f=length(F);
s=length(S);
Ux_G_T_S_T1=zeros(f,s); Uy_G_T_S_T1=zeros(f,s);
Ux_G_C_S_T1=zeros(f,s); Uy_G_C_S_T1=zeros(f,s);
Theta_T_S_T1=zeros(f,s); Theta_C_S_T1=zeros(f,s);
delta1_T_S_T1=zeros(f,s); delta1_C_S_T1=zeros(f,s);
delta2_T_S_T1=zeros(f,s); delta2_C_S_T1=zeros(f,s);
Q_T_S_T1=zeros(f,s); M_T_S_T1=zeros(f,s);
Q_C_S_T1=zeros(f,s); M_C_S_T1=zeros(f,s);

for i=1:f
    N=F(i);

    for j=1:s
        sigma=S(j);
        alpha=Alpha(j);

        fileID=fopen('Parametros_S.txt','w');

        fprintf(fileID,'finish\n');
        fprintf(fileID,'/clear\n');
        fprintf(fileID,'/title, Fretting\n');
        fprintf(fileID,'/prep7\n');

        fprintf(fileID,'E=%1.2f\n',E);
        fprintf(fileID,'nu=%1.3f\n',nu);
        fprintf(fileID,'sigma=%1.0f\n',sigma);
        fprintf(fileID,'N=%1.0f\n',N);
        fprintf(fileID,'alpha=%1.2f\n',alpha);

        system('copy Parametros_S.txt+Fretting_Matlab.txt fichero_ansys.mac')
        system('SET KMP_STACKSIZE=4096k & "C:\Program Files\ANSYS
Inc\v150\ansys\bin\winx64\ANSYS150.exe" -b -i ansys -i "fichero_ansys.mac" -o
"feaoutt.txt" ')

    % ESTUDIO DE LA ROTACIÓN DE LA PATA

    TG_T_S_T1=dlmread('Tabla_Giro_T.dat');
    TG_C_S_T1=dlmread('Tabla_Giro_C.dat');

    G_T_S_T1=sortrows(TG_T_S_T1,2,'ascend');
    G_C_S_T1=sortrows(TG_C_S_T1,2,'ascend');
```

```

cx_G_T_S_T1=G_T_S_T1(:,1);
cy_G_T_S_T1=G_T_S_T1(:,2);
ux_G_T_S_T1=G_T_S_T1(:,3);
uy_G_T_S_T1=G_T_S_T1(:,4);

cx_G_C_S_T1=G_C_S_T1(:,1);
cy_G_C_S_T1=G_C_S_T1(:,2);
ux_G_C_S_T1=G_C_S_T1(:,3);
uy_G_C_S_T1=G_C_S_T1(:,4);

n1=length(cy_G_T_S_T1);
dx_G_T_S_T1=zeros(n1,1); dy_G_T_S_T1=zeros(n1,1);
theta_G_T_S_T1=zeros(n1-1,1);
dx_G_C_S_T1=zeros(n1,1); dy_G_C_S_T1=zeros(n1,1);
theta_G_C_S_T1=zeros(n1-1,1);

for k=1:n1-1

    dx_G_T_S_T1(k)=ux_G_T_S_T1(k)-ux_G_T_S_T1(k+1);
    dy_G_T_S_T1(k)=(cy_G_T_S_T1(k)+uy_G_T_S_T1(k))-
(cy_G_T_S_T1(k+1)+uy_G_T_S_T1(k+1));
    theta_G_T_S_T1(k)=atan(dx_G_T_S_T1(k)/dy_G_T_S_T1(k));

    dx_G_C_S_T1(k)=ux_G_C_S_T1(k)-ux_G_C_S_T1(k+1);
    dy_G_C_S_T1(k)=(cy_G_C_S_T1(k)+uy_G_C_S_T1(k))-
(cy_G_C_S_T1(k+1)+uy_G_C_S_T1(k+1));
    theta_G_C_S_T1(k)=atan(dx_G_C_S_T1(k)/dy_G_C_S_T1(k));

end

Theta_T_S_T1(i,j)=180/pi*mean(theta_G_T_S_T1);
Theta_C_S_T1(i,j)=180/pi*mean(theta_G_C_S_T1);

Ux_G_T_S_T1(i,j)=mean(ux_G_T_S_T1);
Uy_G_T_S_T1(i,j)=mean(uy_G_T_S_T1);
Ux_G_C_S_T1(i,j)=mean(ux_G_C_S_T1);
Uy_G_C_S_T1(i,j)=mean(uy_G_C_S_T1);

% ESTUDIO DE LA RODADURA

TR_F_S_T1=dlmread('Tabla_Rod_F.dat');
TR_T_S_T1=dlmread('Tabla_Rod_T.dat');
TR_C_S_T1=dlmread('Tabla_Rod_C.dat');

R_F_S_T1=sortrows(TR_F_S_T1);
R_T_S_T1=sortrows(TR_T_S_T1);
R_C_S_T1=sortrows(TR_C_S_T1);

cx_R_F_S_T1=R_F_S_T1(:,1);
cy_R_F_S_T1=R_F_S_T1(:,2);
st_R_F_S_T1=R_F_S_T1(:,3);

cx_R_T_S_T1=R_T_S_T1(:,1);
cy_R_T_S_T1=R_T_S_T1(:,2);
st_R_T_S_T1=R_T_S_T1(:,3);

cx_R_C_S_T1=R_C_S_T1(:,1);
cy_R_C_S_T1=R_C_S_T1(:,2);

```

```

st_R_C_S_T1=R_C_S_T1(:,3);

Cx_R_F_S_T1=zeros(sum(R_F_S_T1(:,3)>2),1);
Cx_R_T_S_T1=zeros(sum(R_T_S_T1(:,3)>2),1);
Cx_R_C_S_T1=zeros(sum(R_C_S_T1(:,3)>2),1);

n2=length(st_R_F_S_T1);
q=1; r=1; t=1;
for p=1:n2
    if st_R_F_S_T1(p)>1
        Cx_R_F_S_T1(q)=cx_R_F_S_T1(p);
        q=q+1;
    end

    if st_R_T_S_T1(p)>1
        Cx_R_T_S_T1(r)=cx_R_T_S_T1(p);
        r=r+1;
    end

    if st_R_C_S_T1(p)>1
        Cx_R_C_S_T1(t)=cx_R_C_S_T1(p);
        t=t+1;
    end
end

m1=length(Cx_R_F_S_T1); m2=length(Cx_R_T_S_T1);
m3=length(Cx_R_C_S_T1);

delta1_T_S_T1(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T1(1)-Cx_R_T_S_T1(1));
delta1_C_S_T1(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T1(1)-Cx_R_C_S_T1(1));

delta2_T_S_T1(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T1(m1)-Cx_R_T_S_T1(m2));
delta2_C_S_T1(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T1(m1)-Cx_R_C_S_T1(m3));

% ESTUDIO DE LAS REACCIONES

TF_T_S_T1=dlmread('Tabla_Reaccion_T.dat');
TF_C_S_T1=dlmread('Tabla_Reaccion_C.dat');

F_T_S_T1=sortrows(TF_T_S_T1,2,'ascend');
F_C_S_T1=sortrows(TF_C_S_T1,2,'ascend');

cx_F_T_S_T1=F_T_S_T1(:,1);
cy_F_T_S_T1=F_T_S_T1(:,2);
fx_T_S_T1=F_T_S_T1(:,3);
mz_T_S_T1=F_T_S_T1(:,4);

cx_F_C_S_T1=F_C_S_T1(:,1);
cy_F_C_S_T1=F_C_S_T1(:,2);
fx_C_S_T1=F_C_S_T1(:,3);
mz_C_S_T1=F_C_S_T1(:,4);

Q_T_S_T1(i,j)=sum(fx_T_S_T1);
M_T_S_T1(i,j)=sum(mz_T_S_T1);

Q_C_S_T1(i,j)=sum(fx_C_S_T1);
M_C_S_T1(i,j)=sum(mz_C_S_T1);

end

```

```

end

%% VARIACIÓN CON EL VALOR DE LA TRACCIÓN-COMPRESIÓN (SIGMA) A 650°C (1200°F)

F=[800,900,1000];
S=(100:50:600);
Alpha=(1.35:0.025:1.6);
E=163405.75;
nu=0.283;

f=length(F);
s=length(S);
Ux_G_T_S_T2=zeros(f,s); Uy_G_T_S_T2=zeros(f,s);
Ux_G_C_S_T2=zeros(f,s); Uy_G_C_S_T2=zeros(f,s);
Theta_T_S_T2=zeros(f,s); Theta_C_S_T2=zeros(f,s);
delta1_T_S_T2=zeros(f,s); delta1_C_S_T2=zeros(f,s);
delta2_T_S_T2=zeros(f,s); delta2_C_S_T2=zeros(f,s);
Q_T_S_T2=zeros(f,s); M_T_S_T2=zeros(f,s);
Q_C_S_T2=zeros(f,s); M_C_S_T2=zeros(f,s);

for i=1:f
    N=F(i);

    for j=1:s
        sigma=S(j);
        alpha=Alpha(j);

        fileID=fopen('Parametros_S.txt','w');

        fprintf(fileID,'finish\n');
        fprintf(fileID,'/clear\n');
        fprintf(fileID,'/title, Fretting\n');
        fprintf(fileID,'/prep7\n');

        fprintf(fileID,'E=%1.2f\n',E);
        fprintf(fileID,'nu=%1.3f\n',nu);
        fprintf(fileID,'sigma=%1.0f\n',sigma);
        fprintf(fileID,'N=%1.0f\n',N);
        fprintf(fileID,'alpha=%1.2f\n',alpha);

        system('copy Parametros_S.txt+Fretting_Matlab.txt fichero_ansys.mac')
        system('SET KMP_STACKSIZE=4096k & "C:\Program Files\ANSYS
Inc\v150\ansys\bin\winx64\ANSYS150.exe" -b -i ansys -i "fichero_ansys.mac" -o
"feaoutt.txt" ')

    % ESTUDIO DE LA ROTACIÓN DE LA PATA

    TG_T_S_T2=dlmread('Tabla_Giro_T.dat');
    TG_C_S_T2=dlmread('Tabla_Giro_C.dat');

    G_T_S_T2=sortrows(TG_T_S_T2,2,'ascend');
    G_C_S_T2=sortrows(TG_C_S_T2,2,'ascend');

    cx_G_T_S_T2=G_T_S_T2(:,1);
    cy_G_T_S_T2=G_T_S_T2(:,2);
    ux_G_T_S_T2=G_T_S_T2(:,3);
    uy_G_T_S_T2=G_T_S_T2(:,4);

```

```

cx_G_C_S_T2=G_C_S_T2(:,1);
cy_G_C_S_T2=G_C_S_T2(:,2);
ux_G_C_S_T2=G_C_S_T2(:,3);
uy_G_C_S_T2=G_C_S_T2(:,4);

n1=length(cy_G_T_S_T2);
dx_G_T_S_T2=zeros(n1,1); dy_G_T_S_T2=zeros(n1,1);
theta_T_S_T2=zeros(n1-1,1);
dx_G_C_S_T2=zeros(n1,1); dy_G_C_S_T2=zeros(n1,1);
theta_C_S_T2=zeros(n1-1,1);

for k=1:n1-1

    dx_G_T_S_T2(k)=ux_G_T_S_T2(k)-ux_G_T_S_T2(k+1);
    dy_G_T_S_T2(k)=(cy_G_T_S_T2(k)+uy_G_T_S_T2(k))-
(cy_G_T_S_T2(k+1)+uy_G_T_S_T2(k+1));
    theta_T_S_T2(k)=atan(dx_G_T_S_T2(k)/dy_G_T_S_T2(k));

    dx_G_C_S_T2(k)=ux_G_C_S_T2(k)-ux_G_C_S_T2(k+1);
    dy_G_C_S_T2(k)=(cy_G_C_S_T2(k)+uy_G_C_S_T2(k))-
(cy_G_C_S_T2(k+1)+uy_G_C_S_T2(k+1));
    theta_C_S_T2(k)=atan(dx_G_C_S_T2(k)/dy_G_C_S_T2(k));

end

Theta_T_S_T2(i,j)=180/pi*mean(theta_T_S_T2);
Theta_C_S_T2(i,j)=180/pi*mean(theta_C_S_T2);

Ux_G_T_S_T2(i,j)=mean(ux_G_T_S_T2);
Uy_G_T_S_T2(i,j)=mean(uy_G_T_S_T2);
Ux_G_C_S_T2(i,j)=mean(ux_G_C_S_T2);
Uy_G_C_S_T2(i,j)=mean(uy_G_C_S_T2);

% ESTUDIO DE LA RODADURA

TR_F_S_T2=dlmread('Tabla_Rod_F.dat');
TR_T_S_T2=dlmread('Tabla_Rod_T.dat');
TR_C_S_T2=dlmread('Tabla_Rod_C.dat');

R_F_S_T2=sortrows(TR_F_S_T2);
R_T_S_T2=sortrows(TR_T_S_T2);
R_C_S_T2=sortrows(TR_C_S_T2);

cx_R_F_S_T2=R_F_S_T2(:,1);
cy_R_F_S_T2=R_F_S_T2(:,2);
st_R_F_S_T2=R_F_S_T2(:,3);

cx_R_T_S_T2=R_T_S_T2(:,1);
cy_R_T_S_T2=R_T_S_T2(:,2);
st_R_T_S_T2=R_T_S_T2(:,3);

cx_R_C_S_T2=R_C_S_T2(:,1);
cy_R_C_S_T2=R_C_S_T2(:,2);
st_R_C_S_T2=R_C_S_T2(:,3);

Cx_R_F_S_T2=zeros(sum(R_F_S_T2(:,3)>2),1);
Cx_R_T_S_T2=zeros(sum(R_T_S_T2(:,3)>2),1);
Cx_R_C_S_T2=zeros(sum(R_C_S_T2(:,3)>2),1);

```

```

n2=length(st_R_F_S_T2);
q=1; r=1; t=1;
for p=1:n2
    if st_R_F_S_T2(p)>1
        Cx_R_F_S_T2(q)=cx_R_F_S_T2(p);
        q=q+1;
    end

    if st_R_T_S_T2(p)>1
        Cx_R_T_S_T2(r)=cx_R_T_S_T2(p);
        r=r+1;
    end

    if st_R_C_S_T2(p)>1
        Cx_R_C_S_T2(t)=cx_R_C_S_T2(p);
        t=t+1;
    end
end

m1=length(Cx_R_F_S_T2); m2=length(Cx_R_T_S_T2);
m3=length(Cx_R_C_S_T2);

delta1_T_S_T2(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T2(1)-Cx_R_T_S_T2(1));
delta1_C_S_T2(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T2(1)-Cx_R_C_S_T2(1));

delta2_T_S_T2(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T2(m1)-Cx_R_T_S_T2(m2));
delta2_C_S_T2(i,j)=abs(Cx_R_F_S_T2(m1)-Cx_R_C_S_T2(m3));

% ESTUDIO DE LAS REACCIONES

TF_T_S_T2=dlmread('Tabla_Reaccion_T.dat');
TF_C_S_T2=dlmread('Tabla_Reaccion_C.dat');

F_T_S_T2=sortrows(TF_T_S_T2,2,'ascend');
F_C_S_T2=sortrows(TF_C_S_T2,2,'ascend');

cx_F_T_S_T2=F_T_S_T2(:,1);
cy_F_T_S_T2=F_T_S_T2(:,2);
fx_T_S_T2=F_T_S_T2(:,3);
mz_T_S_T2=F_T_S_T2(:,4);

cx_F_C_S_T2=F_C_S_T2(:,1);
cy_F_C_S_T2=F_C_S_T2(:,2);
fx_C_S_T2=F_C_S_T2(:,3);
mz_C_S_T2=F_C_S_T2(:,4);

Q_T_S_T2(i,j)=sum(fx_T_S_T2);
M_T_S_T2(i,j)=sum(mz_T_S_T2);

Q_C_S_T2(i,j)=sum(fx_C_S_T2);
M_C_S_T2(i,j)=sum(mz_C_S_T2);

end

end

```

```
%% GRÁFICAS A TEMPERATURA AMBIENTE - ROTACIÓN DE LA PATA
```

```
% Tracción
```

```
figure
plot(S,Theta_T_S_T1(1,:),S,Theta_T_S_T1(2,:),S,Theta_T_S_T1(3,:));
title('\theta_T-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta_T (°)');
legend({'N=800 N/mm', 'N=900 N/mm', 'N=1000 N/mm'});
```

```
% Compresión
```

```
figure
plot(S,Theta_C_S_T1(1,:),S,Theta_C_S_T1(2,:),S,Theta_C_S_T1(3,:));
title('\theta_C-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta_C (°)');
legend({'N=800 N/mm', 'N=900 N/mm', 'N=1000 N/mm'});
```

```
% Comparación tracción-compresión
```

```
figure
plot(S,abs(Theta_T_S_T1(1,:)), '-r', S,abs(Theta_C_S_T1(1,:)), '--r')
hold on
plot(S,abs(Theta_T_S_T1(2,:)), '-b', S,abs(Theta_C_S_T1(2,:)), '--b')
hold on
plot(S,abs(Theta_T_S_T1(3,:)), '-k', S,abs(Theta_C_S_T1(3,:)), '--k')
title('Comparación \theta-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta (°)');
```

```
%% GRÁFICAS A TEMPERATURA AMBIENTE - RODADURA DE LA PATA
```

```
% Tracción
```

```
figure
plot(S,delta1_T_S_T1(3,:),S,delta2_T_S_T1(3,:));
title('\delta_T-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_T (mm)');
legend({'\delta_i (lado izquierdo)', '\delta_d (lado derecho)'});
```

```
% Compresión
```

```
figure
plot(S,delta1_C_S_T1(3,:),S,delta2_C_S_T1(3,:));
title('\delta_C-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_C (mm)');
legend({'\delta_i (lado izquierdo)', '\delta_d (lado derecho)'});
```

```
% Comparación a tracción-compresión (lado izquierdo)
```

```
figure
plot(S,delta1_T_S_T1(3,:),S,delta1_C_S_T1(3,:));
title('\delta_i-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_i (mm)');
legend({'Tracción', 'Compresión'})
```

```
% Comparación a tracción-compresión (lado derecho)
```

```
figure
plot(S,delta2_T_S_T1(3,:),S,delta2_C_S_T1(3,:));
title('\delta_d-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_d (mm)');
legend({'Tracción', 'Compresión'})
```

```
%% GRÁFICAS A TEMPERATURA AMBIENTE - REACCIONES (Q)
```

```
% Tracción
```

```
figure
```

```

plot(S,Q_T_S_T1(1,:),S,Q_T_S_T1(2,:),S,Q_T_S_T1(3,:))
title('Q_T-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q_T (N/mm)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

% Compresión
figure
plot(S,Q_C_S_T1(1,:),S,Q_C_S_T1(2,:),S,Q_C_S_T1(3,:))
title('Q_C-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q_C (N/mm)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

% Comparación a tracción-compresión
figure
plot(S,abs(Q_T_S_T1(1,:)),'-r',S,abs(Q_C_S_T1(1,:)),'--r')
hold on
plot(S,abs(Q_T_S_T1(2,:)),'-b',S,abs(Q_C_S_T1(2,:)),'--b')
hold on
plot(S,abs(Q_T_S_T1(3,:)),'-k',S,abs(Q_C_S_T1(3,:)),'--k')
title('Comparación Q-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q (N/mm)');

%% GRÁFICAS A TEMPERATURA AMBIENTE - REACCIONES (M)

% Tracción
figure
plot(S,M_T_S_T1(1,:),S,M_T_S_T1(2,:),S,M_T_S_T1(3,:))
title('M_T-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M_T (N)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

% Compresión
figure
plot(S,M_C_S_T1(1,:),S,M_C_S_T1(2,:),S,M_C_S_T1(3,:))
title('M_C-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M_C (N)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

% Comparación a tracción-compresión
figure
plot(S,abs(M_T_S_T1(1,:)),'-r',S,abs(M_C_S_T1(1,:)),'--r')
hold on
plot(S,abs(M_T_S_T1(2,:)),'-b',S,abs(M_C_S_T1(2,:)),'--b')
hold on
plot(S,abs(M_T_S_T1(3,:)),'-k',S,abs(M_C_S_T1(3,:)),'--k')
title('Comparación M-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M (N)');

%% GRÁFICAS A T=650°C - ROTACIÓN DE LA PATA

% Tracción
figure
plot(S,Theta_T_S_T2(1,:),S,Theta_T_S_T2(2,:),S,Theta_T_S_T2(3,:));
title('\theta_T-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta_T (°)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

```

```

% Compresión
figure
plot(S,Theta_C_S_T2(1,:),S,Theta_C_S_T2(2,:),S,Theta_C_S_T2(3,:));
title('\theta_C-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta_C (°)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

% Comparación tracción-compresión
figure
plot(S,abs(Theta_T_S_T2(1,:)),'-r',S,abs(Theta_C_S_T2(1,:)),'--r')
hold on
plot(S,abs(Theta_T_S_T2(2,:)),'-b',S,abs(Theta_C_S_T2(2,:)),'--b')
hold on
plot(S,abs(Theta_T_S_T2(3,:)),'-k',S,abs(Theta_C_S_T2(3,:)),'--k')
title('Comparación \theta-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta (°)');

%% GRÁFICAS A T=650°C - RODADURA DE LA PATA

% Tracción
figure
plot(S,delta1_T_S_T2(3,:),S,delta2_T_S_T2(3,:));
title('\delta_T-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_T (mm)');
legend({'\delta_i (lado izquierdo)','\delta_d (lado derecho)'})

% Compresión
figure
plot(S,delta1_C_S_T2(3,:),S,delta2_C_S_T2(3,:));
title('\delta_C-\sigma (Temperatura ambiente)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_C (mm)');
legend({'\delta_i (lado izquierdo)','\delta_d (lado derecho)'})

% Comparación a tracción-compresión (lado izquierdo)
figure
plot(S,delta1_T_S_T2(3,:),S,delta1_C_S_T2(3,:));
title('\delta_i-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_i (mm)');
legend({'Tracción','Compresión'})

% Comparación a tracción-compresión (lado derecho)
figure
plot(S,delta2_T_S_T2(3,:),S,delta2_C_S_T2(3,:));
title('\delta_d-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_d (mm)');
legend({'Tracción','Compresión'})

%% GRÁFICAS A T=650°C - REACCIONES (Q)

% Tracción
figure
plot(S,Q_T_S_T2(1,:),S,Q_T_S_T2(2,:),S,Q_T_S_T2(3,:))
title('Q_T-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q_T (N/mm)');
legend({'N=800 N/mm','N=900 N/mm','N=1000 N/mm'});

% Compresión
figure
plot(S,Q_C_S_T2(1,:),S,Q_C_S_T2(2,:),S,Q_C_S_T2(3,:))
title('Q_C-\sigma (T=650°C)');

```

```

xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q_C (N/mm)');
legend({'N=800 N/mm', 'N=900 N/mm', 'N=1000 N/mm'});

% Comparación a tracción-compresión
figure
plot(S,abs(Q_T_S_T2(1,:)), '-r', S,abs(Q_C_S_T2(1,:)), '--r')
hold on
plot(S,abs(Q_T_S_T2(2,:)), '-b', S,abs(Q_C_S_T2(2,:)), '--b')
hold on
plot(S,abs(Q_T_S_T2(3,:)), '-k', S,abs(Q_C_S_T2(3,:)), '--k')
title('Comparación Q-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q (N/mm)');

%% GRÁFICAS A T=650°C - REACCIONES (M)

% Tracción
figure
plot(S,M_T_S_T2(1,:), S,M_T_S_T2(2,:), S,M_T_S_T2(3,:))
title('M_T-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M_T (N)');
legend({'N=800 N/mm', 'N=900 N/mm', 'N=1000 N/mm'});

% Compresión
figure
plot(S,M_C_S_T2(1,:), S,M_C_S_T2(2,:), S,M_C_S_T2(3,:))
title('M_C-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M_C (N)');
legend({'N=800 N/mm', 'N=900 N/mm', 'N=1000 N/mm'});

% Comparación a tracción-compresión
figure
plot(S,abs(M_T_S_T2(1,:)), '-r', S,abs(M_C_S_T2(1,:)), '--r')
hold on
plot(S,abs(M_T_S_T2(2,:)), '-b', S,abs(M_C_S_T2(2,:)), '--b')
hold on
plot(S,abs(M_T_S_T2(3,:)), '-k', S,abs(M_C_S_T2(3,:)), '--k')
title('Comparación M-\sigma (T=650°C)');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M (N)');

%% GRÁFICAS COMPARATIVAS A DIFERENTES TEMPERATURAS - ROTACIÓN DE LA PATA

% Tracción
figure
plot(S,Theta_T_S_T1(1,:), '-r', S,Theta_T_S_T2(1,:), '--r')
hold on
plot(S,Theta_T_S_T1(2,:), '-b', S,Theta_T_S_T2(2,:), '--b')
hold on
plot(S,Theta_T_S_T1(3,:), '-k', S,Theta_T_S_T2(3,:), '--k')
hold on
title('Comparación \theta_T-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta_T (°)');

% Compresión
figure
plot(S,Theta_C_S_T1(1,:), '-r', S,Theta_C_S_T2(1,:), '--r')
hold on
plot(S,Theta_C_S_T1(2,:), '-b', S,Theta_C_S_T2(2,:), '--b')
hold on

```

```

plot(S,Theta_C_S_T1(3,:), '-k',S,Theta_C_S_T2(3,:), '--k')
hold on
title('Comparación \theta_C-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\theta_C (°)');

%% GRÁFICAS COMPARATIVAS A DIFERENTES TEMPERATURAS - RODADURA DE LA PATA

% Tracción (lado izquierdo)
figure
plot(S,delta1_T_S_T1(3,:),S,delta1_T_S_T2(3,:));
title('Comparación \delta_i_T-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_i_T (mm)');
legend({'Temp. Ambiente', 'T=650°C'});

% Tracción (lado derecho)
figure
plot(S,delta2_T_S_T1(3,:),S,delta2_T_S_T2(3,:));
title('Comparación \delta_d_T-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_d_T (mm)');
legend({'Temp. Ambiente', 'T=650°C'});

% Compresión (lado izquierdo)
figure
plot(S,delta1_C_S_T1(3,:),S,delta1_C_S_T2(3,:));
title('Comparación \delta_i_C-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_i_C (mm)');
legend({'Temp. Ambiente', 'T=650°C'});

% Compresión (lado derecho)
figure
plot(S,delta2_C_S_T1(3,:),S,delta2_C_S_T2(3,:));
title('Comparación \delta_d_C-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('\delta_d_C (mm)');
legend({'Temp. Ambiente', 'T=650°C'});

%% GRÁFICAS COMPARATIVAS A DIFERENTES TEMPERATURAS - REACCIONES (Q)

% Tracción
figure
plot(S,Q_T_S_T1(1,:), '-r',S,Q_T_S_T2(1,:), '--r')
hold on
plot(S,Q_T_S_T1(2,:), '-b',S,Q_T_S_T2(2,:), '--b')
hold on
plot(S,Q_T_S_T1(3,:), '-k',S,Q_T_S_T2(3,:), '--k')
hold on
title('Comparación Q_T-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q_T (N/mm)');

% Compresión
figure
plot(S,Q_C_S_T1(1,:), '-r',S,Q_C_S_T2(1,:), '--r')
hold on
plot(S,Q_C_S_T1(2,:), '-b',S,Q_C_S_T2(2,:), '--b')
hold on
plot(S,Q_C_S_T1(3,:), '-k',S,Q_C_S_T2(3,:), '--k')
hold on
title('Comparación Q_C-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('Q_C (N/mm)');

```

```
%% GRÁFICAS COMPARATIVAS A DIFERENTES TEMPERATURAS - REACCIONES (M)

% Tracción
figure
plot(S,M_T_S_T1(1,:), '-r', S,M_T_S_T2(1,:), '--r')
hold on
plot(S,M_T_S_T1(2,:), '-b', S,M_T_S_T2(2,:), '--b')
hold on
plot(S,M_T_S_T1(3,:), '-k', S,M_T_S_T2(3,:), '--k')
hold on
title('Comparación M_T-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M_T (N)');

% Compresión
figure
plot(S,M_C_S_T1(1,:), '-r', S,M_C_S_T2(1,:), '--r')
hold on
plot(S,M_C_S_T1(2,:), '-b', S,M_C_S_T2(2,:), '--b')
hold on
plot(S,M_C_S_T1(3,:), '-k', S,M_C_S_T2(3,:), '--k')
hold on
title('Comparación M_C-\sigma a diferentes temperaturas');
xlabel('\sigma (MPa)'); ylabel('M_C (N)');
```

# REFERENCIAS

---

- [1] J. Vázquez Valeo, *Efecto de las tensiones residuales en la fatiga por fretting*, 2009.
- [2] A. Gómez Soriano, *Diseño de un montaje para ensayos con puente de fretting*, 2020.
- [3] «Special Metals,» [En línea]. Available: [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com).
- [4] S. González Leva, *Análisis y simulación del desgaste en cables de acero sometidos a fatiga*, 2020.
- [5] D. Nowell y D. Hills, *Mechanics of Fretting Fatigue*, Springer.
- [6] C. Navarro Pintado, *Iniciación y crecimiento de grietas en fatiga por fretting*, 2005.