



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



DISEÑO DE ANILLO DE UNIÓN DE TANQUES ESTRUCTURALES PARA VEHÍCULO LANZADOR

J. Paladini^{ab}, D. Britez^a, A. Patanella^a

^aCTA – Centro Tecnológico Aeroespacial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata Calle 116 e/47 y 48 (1900) La Plata, Argentina. <http://www.cta.ing.unlp.edu.ar>

^bCIC Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Calle 526 entre 10 y 11 (1900) La Plata, Argentina. <http://www.cic.gba.gov.ar>

Palabras claves: Tanque Estructural, Anillo, Intertanque, Vehículo Lanzador

Resumen

El objetivo del presente trabajo es el diseño de la unión entre un tanque estructural y el resto del vehículo lanzador. Para ello es necesario diseñar el anillo y así como la unión entre la parte cilíndrica del tanque y el casquete del mismo. Se realizan análisis estructurales utilizando métodos analíticos y de elementos finitos para verificar el estado tensional del tanque y el anillo con los estados de cargas requeridos. Los resultados se muestran en forma de tablas y mapas de tensiones.

Se especifican en este trabajo la metodología a utilizar para vincular el elemento de unión del tanque al resto del vehículo, como también el análisis de dicha junta. Se muestra también el diseño del vínculo a utilizar en el intertanque, o la parte del fuselaje adyacente al tanque en estudio.

1. INTRODUCCIÓN

La zona de unión de los tanques estructurales de un vehículo es una parte crítica del diseño de los mismos. En dicha zona se deben unir los casquetes del tanque a la parte cilíndrica del mismo, asegurando su estanqueidad; y a su vez vincularlo a un elemento de unión para ensamblarlo al resto del vehículo. Para tal fin se propone utilizar un anillo que se vincula por medio de cordones de soldadura al tanque y mediante bulones al resto de la estructura del fuselaje.

Utilizar un anillo con una rigidez muy alta significa un incremento de tensiones en el tanque, en zonas cercanas a este, al someterlo a presión interna. Si en cambio el anillo tiene una rigidez demasiado baja, éste no actuará como vínculo de unión para el tanque, por lo que es probable que a su vez no resista el estado de cargas externas requerido o no pueda transmitirle las cargas de manera uniforme al tanque. En el diseño de este componente es necesario llegar a un equilibrio de la relación de rigideces entre el tanque y el anillo de unión.

2. METODOLOGÍA

En primera instancia se determinó cuál debe ser la rigidez requerida en el anillo, para ello, es necesario tener concluido el diseño del tanque estructural. Luego se propuso en qué orden se ensamblarán los componentes del tanque (anillo, cilindro y casquete). Debido a que la confección del tanque será por medio de soldadura, se ubicaron los cordones de soldadura de manera tal que las zonas influenciadas por la temperatura durante el proceso de soldadura no se superpongan.

Paso siguiente se confeccionó un modelo de elementos finitos (FEM) en detalle de la unión para realizar el análisis estructural de la unión. En este modelo se incluye la porción del tanque afectada por la unión y los anillos que se encuentran en el tanque y el resto del fuselaje. Con el mismo se pretendió verificar tanto el tanque como los componentes estructurales de la unión.

Por último se determinó de manera analítica el tipo, cantidad y pretensado de los bulones a utilizar para unir ambos anillos. Los detalles de cargas, materiales, factores de seguridad y demás se encuentran disponibles en [1].

3. DESARROLLO

Se propuso una unión en la que el casquete del tanque tiene un labio cilíndrico que se ubica dentro del cilindro del tanque. El labio exterior del primero se encuentra en contacto con el cilindro y por último, externo a los elementos nombrados anteriormente se encuentra el anillo de unión. Se propone utilizar dos cordones de soldadura para vincular el cilindro al casquete para tener una mayor seguridad ante la estanqueidad y unir mediante dos cordones de soldadura también el anillo al tanque. De esta manera a su vez se disminuye la flexión a la que se encuentran sometidos los cordones de soldadura circunferenciales. En la siguiente imagen puede observarse la unión diseñada, se muestra a su vez el anillo que se debe ubicar en el intertanque o porción de fuselaje adyacente.

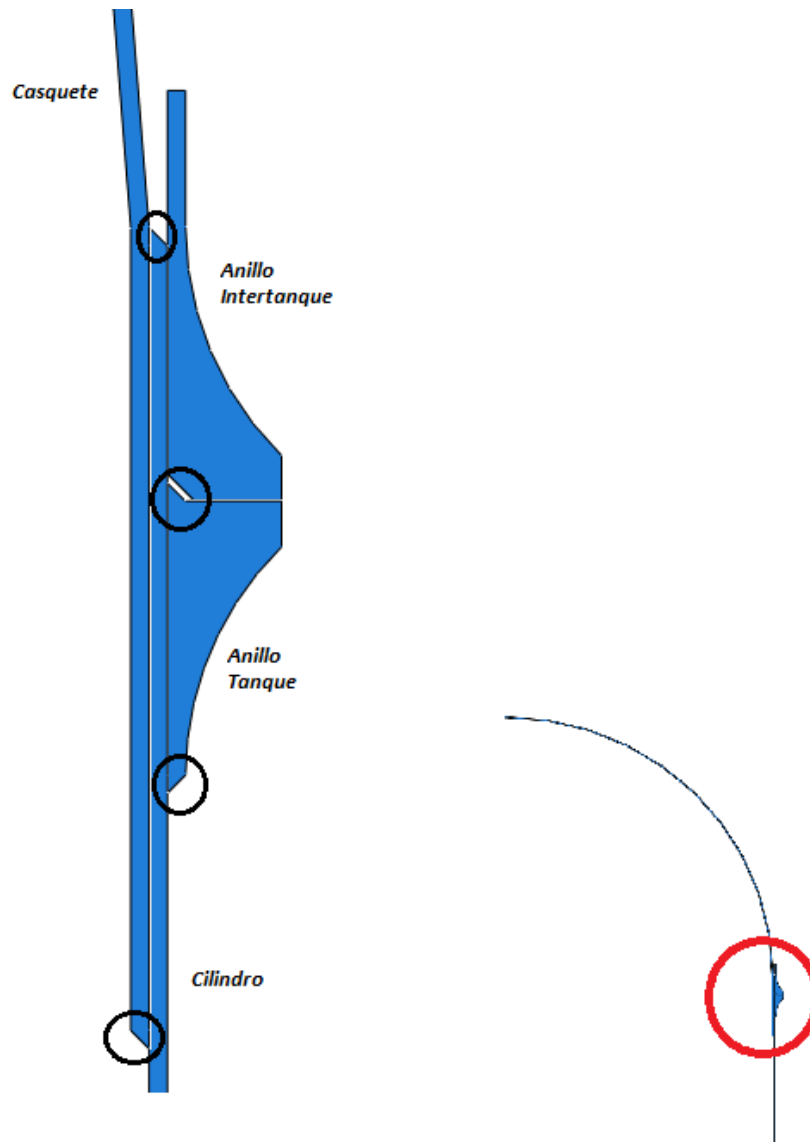


Figura 1: Geometría de Unión

El modelo confeccionado es del tipo axisimétrico, donde se modela el espesor de todas las partes como si fueran sólidos pero no se revoluciona la geometría, sino que se incluyen las condiciones de borde de simetría cilíndrica. La ventaja de realizar esta simplificación es que se puede tener un detalle mayor del mallado sin penalizar con un elevado costo computacional. En lugar de modelar el tanque completo, se modela el casquete y una porción del cilindro hasta donde ya se encuentran disipados los efectos del anillo y el casquete sobre este. Se tuvo en cuenta la geometría de los cordones de soldadura que son especificados en el diseño basándose en el manual NASA [2], en este se describe las dimensiones teóricas del material aportado.

La desventaja de realizar un modelo axisimétrico es que no se pueden aplicar cargas que no tengan dicha simetría, con lo que no se podría implementar un momento flector. Esto no es un inconveniente mayor, ya que puede estudiarse únicamente los puntos de mayor sollicitación de la unión, estos son los extremos del cilindro. Se aplica sobre los últimos las cargas puntuales que existen en ellos (los puntos 1 y 2 de la siguiente figura) provenientes del diagrama de esfuerzos característicos del vehículo completo.

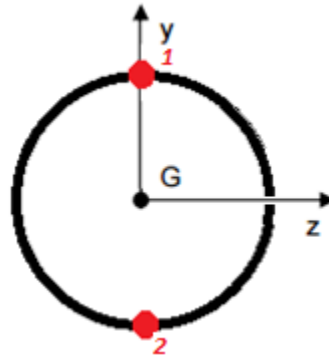


Figura 2: Puntos de análisis

3.1. Confección del modelo FEM

3.1.1. Cargas Actuantes

En ambos puntos de estudio (1 y 2) se aplicaron conjuntamente las cargas provenientes del esfuerzo axial y del momento flector. Dependiendo del punto en estudio las mismas colaboran entre sí para aumentar la carga o disminuirla. Se extrajo directamente la tensión σ_x a la que se encuentra sometido el cilindro en dichos puntos.

La manera de solicitar al modelo con las cargas anteriormente descritas es aplicando una carga uniforme sobre la cara plana del anillo. Las unidades correspondientes a esta carga son de presión, por lo que se determinaron las mismas como la tensión σ_x anteriormente descrita, escalada por la relación entre el espesor del cilindro y el ancho del anillo.

$$P_{ext} = \sigma_x * \frac{t}{h}$$

A su vez se incluyó la presión interna del tanque proveniente de la presurización del mismo. En la siguiente imagen pueden observarse las cargas aplicadas sobre el modelo FEM.

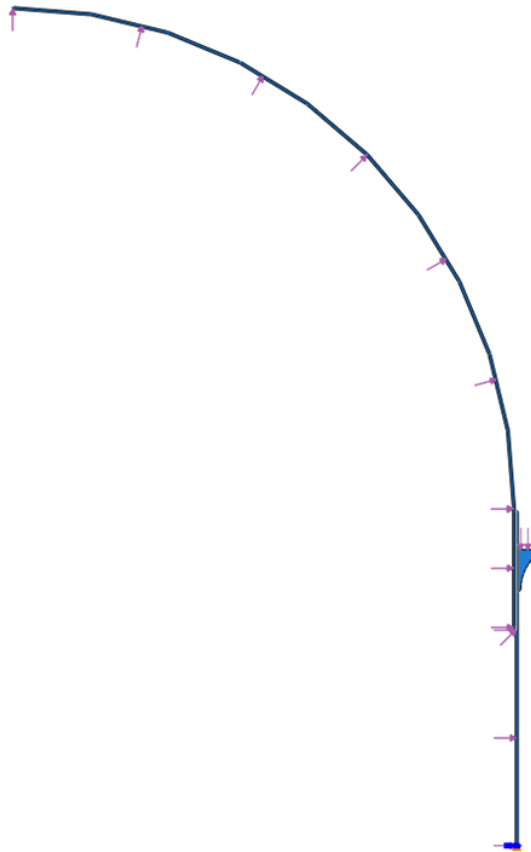


Figura 3: Cargas aplicadas en el modelo FEM

Se utilizaron factores de seguridad a la rotura (FOSU) y al límite elástico del material (FOSY). Estos factores se aplican sobre las cargas debido a que el análisis no es lineal por las características elastoplásticas del material, y tienen valores específicos de la misión dependiendo que la carga sea externa o interna de la estructura.

3.1.2. Interacciones y Restricciones

En el modelo confeccionado, el casquete, el anillo y el cilindro fueron modelados como partes distintas, por lo que fue necesario valerse de interacciones y restricciones para que las vinculen como ocurre en la realidad. En la siguiente imagen se muestran las restricciones del tipo *Tie* existentes para representar las soldaduras con una eficiencia de 1. Se encuentran remarcadas en rojo.

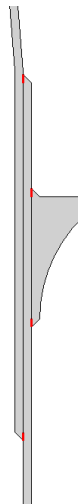


Figura 4: Restricciones del tipo *Tie*

También se utilizaron interacciones para simular el contacto existente en las superficies de los distintos componentes. Las mismas se pueden apreciar en la siguiente imagen.

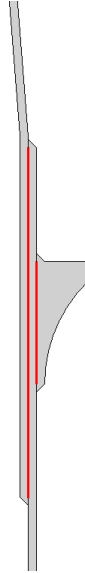


Figura 5: Contactos

3.1.3. Mallado del modelo

Se realizó un mallado global del modelo, en las zonas que se impusieron restricciones y contactos el mallado se hizo más refinado en especial en los nodos que trabajan como slave de las mismas. A continuación se muestra un detalle del mallado en dicha zona y se resume el mallado en total en una tabla.

Instancia	Elementos			Nodos
	Tipo	Cantidad	Total Instancia	
Casquete	CAX4R	26940	26940	29645
Cilindro	CAX4R	15168	15511	16594
	CAX3	343		
Anillo	CAX4R	900	925	997
	CAX3	25		
Total			43376	47236

Tabla 1: Resumen de mallado

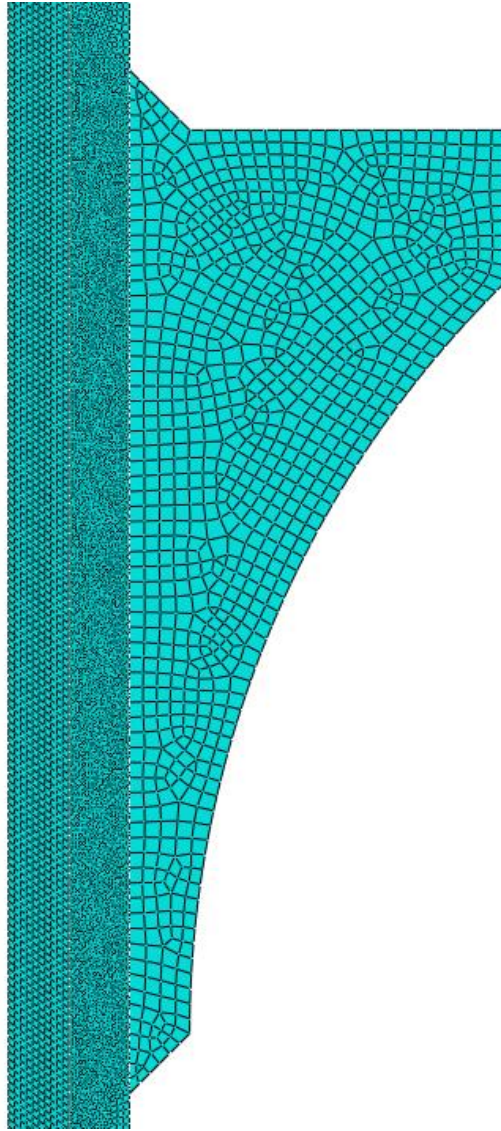


Figura 6: Detalle de mallado del modelo

Se incluyeron en el modelo las características del material utilizado tanto en el rango elástico como en el rango plástico del mismo. Este último rango fue discretizado con rectas como aproximación. Como se sabe, la zona afectada por la soldadura pena con una variación de sus propiedades, estas fueron extraídas de ASM Metals Handbook [3].

4. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de los análisis realizados en el formato de mapa de tensiones. Las tensiones se encuentran escaladas a la admisible para cada caso, o sea, a la tensión de fluencia para el caso en que se utiliza el FOSY y a la tensión de rotura para el FOSU. El límite admisible sería entonces el valor 1, un valor superior significa que el elemento falla y uno inferior que no hay falla en el elemento.

Los resultados mostrados corresponden a 2 estados de carga (el estado A y el estado B que pueden observarse de manera detallada en la referencia [1]) provenientes de los requisitos para el diseño tanto en el punto 1 como el punto 2. En las siguientes imágenes pueden apreciarse los mismos.

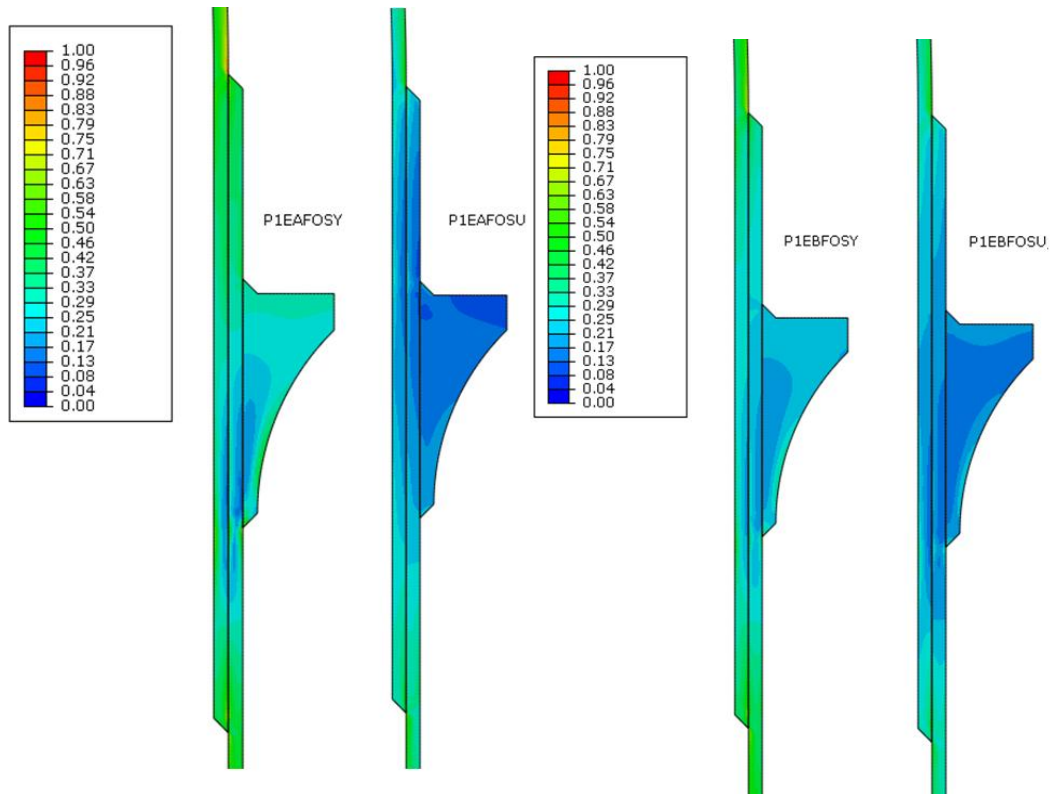


Figura 7: Mapa de tensiones en el punto 1

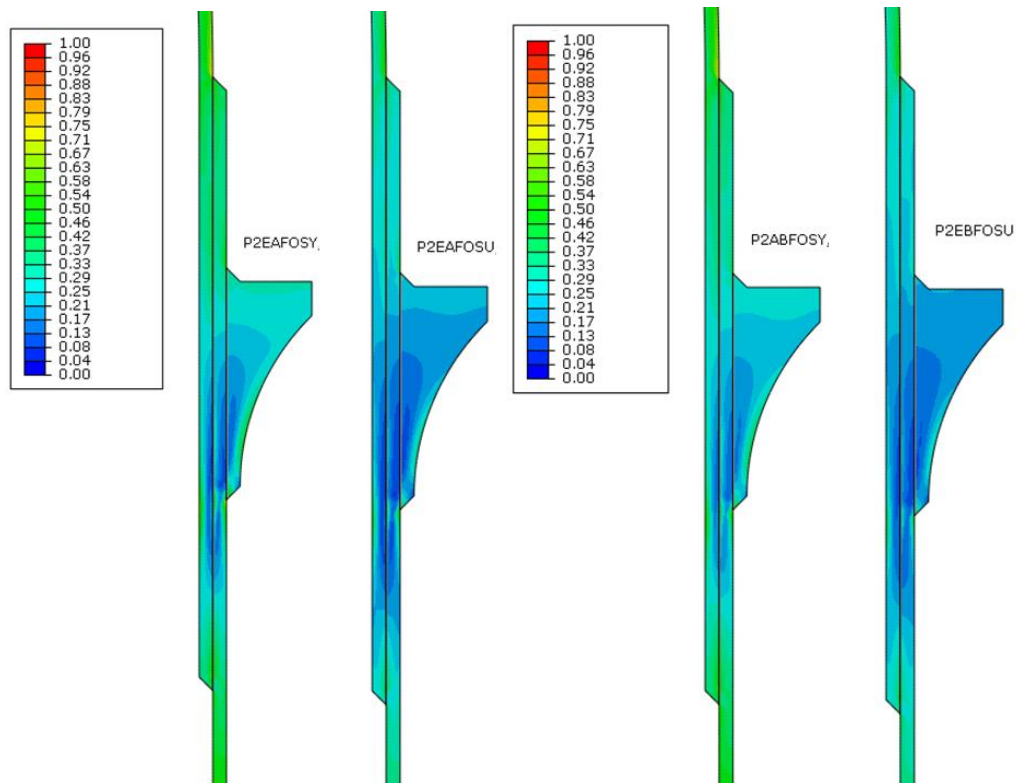


Figura 8: Mapa de tensiones en el punto 2

5. BULONES

Se propusieron en base al ancho del anillo utilizar bulones de Métrica 8 con un paso de 1,25 en calidad 12.9. Para determinar la cantidad de bulones a utilizar se tomaron las cargas externas en el plano de unión del tanque

del diagrama de esfuerzos característicos del vehículo y se incluyó un pretensado standard del 65% de la tensión de fluencia en los bulones.

Se tuvo en cuenta que en el punto más traccionado, las cargas sobre el bulón no hagan que este se corte ni exista separación de los anillos. Por otro lado, en el punto más comprimido se buscó que no se pierda la tensión en el bulón. A su vez, por una solicitud del Grupo de Configuración, se exigió que la distancia angular mínima entre bulones sea de 5°. Teniendo en cuenta estos criterios, se determinaron la cantidad de bulones necesaria en forma iterativa y con ayuda de herramientas informáticas.

Como resultado final se obtuvo que se necesitan 36 bulones de M8x1,25 de calidad 12.9 que se pretensarán al 65% de su tensión de fluencia. Los mismos cuentan con cabeza tipo Allen que ofrece un diámetro menor al que tendrían bulones de igual diámetro nominal con cabeza hexagonal. Estos bulnes se roscarán en el otro elemento de la junta, el cual es el extremo opuesto del anillo. En la siguiente figura puede apreciarse el detalle de la unión abulonada.

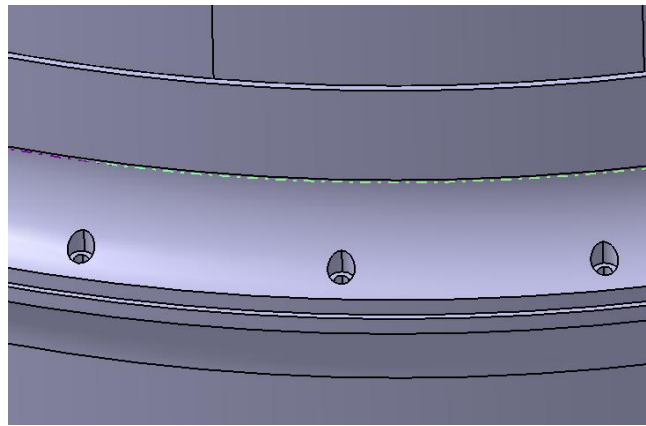


Figura 9: Detalle unión abulonada

5.1.1. Longitud Roscada

La longitud roscada se determinó en base al documento de NASA [4] de la siguiente manera.

$$Lr = \frac{DUL * P_{Bulón}}{F_{su} * 3 * \pi * \frac{D}{4}}$$

Donde DUL es el factor de seguridad a rotura correspondiente a las uniones roscadas, $P_{Bulón}$ es la carga de rotura del bulón, F_{su} la tensión de corte última del anillo y D el diámetro nominal del bulón. Se determina para este caso que la longitud roscada debe ser de 30mm. Además, se decide utilizar la carga de rotura del bulón en el diseño de la rosca para evitar la falla de la misma antes que ocurra la de un bulón. Esto se debe a que si se barre la rosca de uno de los orificios de la junta, se perdería una pieza mucho más costosa que un elemento de ferretería.

5.1.2. Análisis de la Junta

Según la bibliografía (NASA [4]), se asume una tensión de pretensado del 65% de la tensión de fluencia del bulón para comenzar el cálculo. La carga de pretensado del bulón es:

$$P_0 = 0.65 * P_{yB} * (1 \pm u)$$

Donde u representa un factor de seguridad asumido, ya que por más que se aplique el mismo torque a los bulones, no todos van a quedar traccionados con la misma tensión debido a factores externos como la lubricación de la rosca, el acabado de la misma y el operario entre otros. No se toman los mismos valores para cuando se suma que cuando se resta u . El valor positivo se asume de 0.25 y el negativo de 0.286. P_{yB} corresponde a la máxima carga a tracción del bulón dentro de su límite elástico.

De esta forma se obtienen dos valores límites para la tensión aplicada al bulón sobre los cuales se va a verificar la junta.

$$P_{0min} = 18000N$$

$$P_{0max} = 31400N$$

Luego se procede a determinar las rigideces (K) del bulón y la junta para poder obtener la proporción de la carga externa que toma cada una de estas partes.

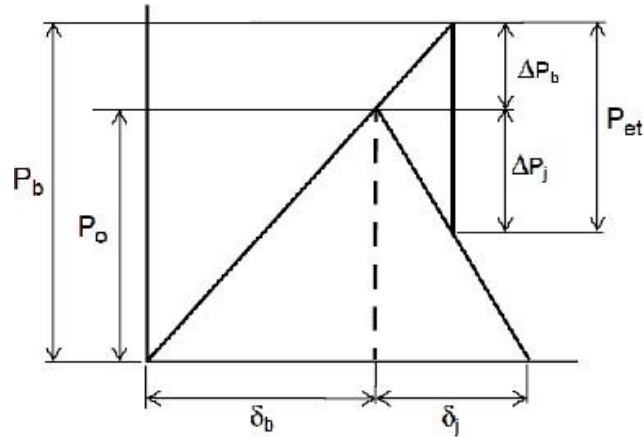


Figura 10: Funcionamiento de la junta

$$P_{et} = \Delta P_b + \Delta P_j$$

$$\Delta P_b = \frac{K_b}{K_b + K_j} * n * P_{et} * DUL$$

Donde K_b y K_j corresponden a las rigideces del bulón y la junta respectivamente. Estos parámetros se determinan de la siguiente manera.

$$K_b = \frac{A_b * E_b}{L}$$

$$K_j = \frac{\pi * E_j * D}{\ln\left(5 * \left(\frac{2 * L + 0.5 * D}{2 * L + 2.5 * D}\right)\right)}$$

En las ecuaciones anteriores el valor de E_b es el módulo de elasticidad del material del bulón (Acero), E_j el módulo de elasticidad del material de la junta (Aluminio), A_b el área transversal del bulón, D el diámetro nominal del mismo y L se determina como se muestra en la siguiente imagen.

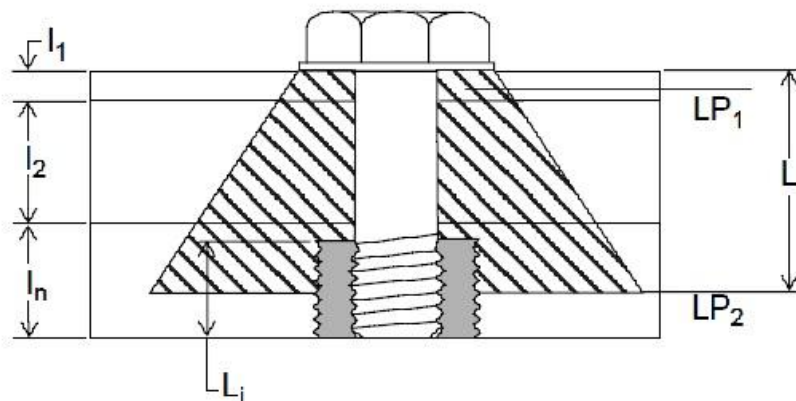


Figura 11: Distribución de carga sobre la Junta

$$L = l_1 + l_2 + \frac{l_r}{2}$$

$$n = \frac{\frac{l_1}{2} + l_2 + \frac{l_r}{2}}{l_1 + l_2 + l_3}$$

$$E_j = \frac{L}{\frac{l_1}{E_b} + \frac{l_2 + 0.5 * l_r}{E_j}}$$

La longitud l_1 corresponde a una arandela de acero de 4,5mm de espesor que se sitúa para que el aluminio no se rompa debido a la carga del bulón. La longitud l_2 corresponde al aluminio del anillo superior y la longitud de roscado coincide con l_n .

Con los datos anteriores se obtienen las siguientes propiedades de la junta:

$$L = 55,9mm$$

$$n = 0,76$$

$$E_j = 74 GPa$$

$$K_b = 128.000 N/mm$$

$$K_j = 1.256.600 N/mm$$

5.1.3. Análisis de Bulones

En primera instancia se determinó la carga externa que se sitúa en cada punto de vinculación entre el módulo intertanque con el anillo (ΔP_b). Esto se realiza fácilmente sabiendo el momento flector y la carga axial solicitante y utilizando un modelo FEM que tenga en cuenta la condición de contacto en la zona comprimida por dicho momento. Teniendo ΔP_b se calcula el índice de falla a tracción de cada bulón para cada estado de carga. En el caso de que la carga aplicada sea de tracción es

$$IF = \frac{P_{omax} + \Delta P_b}{P_{yB}}$$

Y cuando la carga es de compresión

$$IF = \frac{P_{omin} - \Delta P_b}{P_{yB}}$$

Se debe verificar que el IF no sea mayor a 1 para que no se rompa el bulón ni tome el valor de cero para que no se pierda la tensión en el mismo y se afloje. En la siguiente figura puede observarse el IF de cada bulón para el análisis realizado.

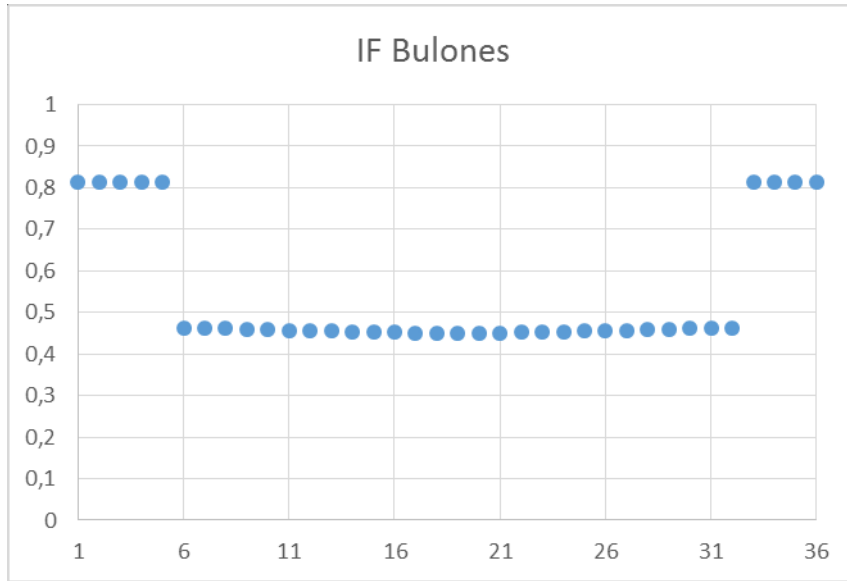


Figura 12: Índice de Falla de Bulones (Estado A)

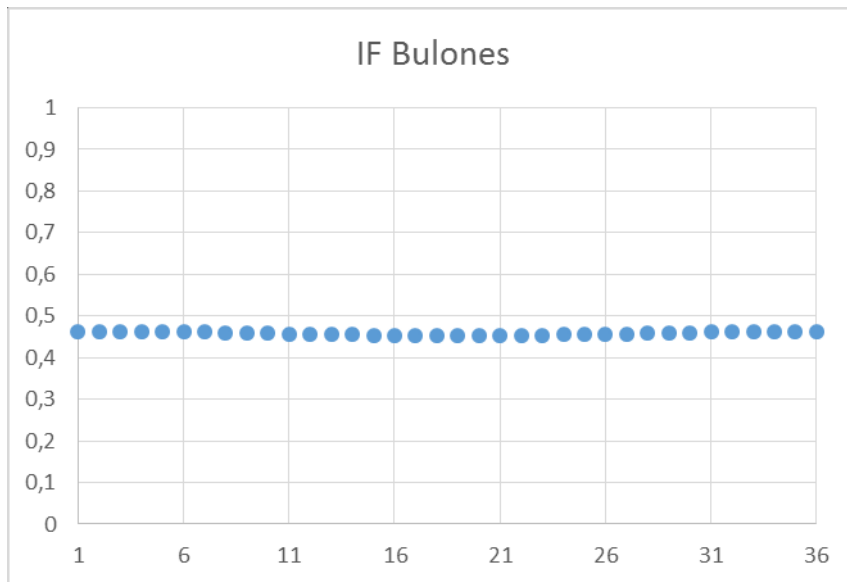


Figura 13: Índice de Falla de Bulones (Estado B)

6. CONCLUSIONES

Como puede observarse en los mapas de tensiones obtenidos del modelo FEM, el índice de falla en ningún momento es superior al valor de 1. En base a esto se puede decir que la estructura verifica el estado de cargas impuesto.

Se logró concluir el diseño de detalle de la unión entre el tanque y el resto de la estructura, así como se dio solución a la unión entre las partes del tanque. Este último no es un detalle menor, dada la complejidad de la unión y debido a las funciones que debe cumplir la misma, lo que la convierte en una parte crítica del diseño del lanzador. Por último cabe destacar que el diseño concluido tiene una alta factibilidad de fabricación, dado que ya se han realizado componentes de similar complejidad en otras etapas de experimentación.

REFERENCIAS

- [1] J. Paladini, Trabajo Final de Carrera Ingeniería Aeronáutica: "Diseño de Tanques Estructurales e Intertanque de Vehículo Lanzador", Argentina, 2016.
- [2] NASA, MSFC-SPEC-504C: "Welding Aluminum Alloys", 1993.
- [3] ASM, Metals Handbook Volumen 6, 1993.
- [4] NASA, TM 106943: "Preloaded Joint Analysis Methodology for Space Flight Systems", 1995.