

Dimensionamiento de los Herrajes de Sujeción del Módulo de
Comando
Paracaídas Comandado Autónomo para Entrega de Cargas
Proyecto PIDDEF 038/14

17 de abril de 2018



Nombre del Proyecto: Paracaídas Comandado Autónomo para Entrega de Cargas
Nombre Abreviado: Proyecto PCA
Proyecto: PIDDEF 038/14

Informe Técnico: Dimensionamiento de los Herrajes de Sujeción del Módulo de Comando
Revisión: /
Entregable: VI

Autor: Andrés Liberatto
Departamento Mecánica Aeronáutica
Facultad de Ingeniería - IUA
aliberatto@iua.edu.ar

Revisó: Juan Jromei
Departamento Mecánica Aeronáutica
Facultad de Ingeniería - IUA
jjromei@iua.edu.ar

Resumen

Análisis mecánico y dimensionamiento de los 'herrajes de sujeción del módulo de comando' del Paracaídas Comandado Autónomo para Entrega de Cargas. El trabajo consiste en determinar las dimensiones mínimas de los herrajes de sujeción del módulo de comando, de modo que sean capaces de resistir y transferir las cargas producidas por maniobras y ráfagas esperables durante una misión 'típica'. Se determinan las cargas límite máximas, se establece un conjunto de requerimientos de diseño y criterios de cálculo, se dimensionan las piezas y los elementos de unión y se presenta un croquis con tres vistas acotadas.

Índice

1. Introducción	5
2. Objetivos	5
2.1. Objetivo General	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. Definiciones	5
4. Factores de Seguridad	7
5. Propiedades de Diseño de los Materiales	7
6. Criterios de Cálculo para los Herrajes, Uniones Desmontables y Uniones Permanentes (Checklist)	8
7. Hipótesis de Cargas	9
8. Dimensionamiento del Herraje - Lado Grilletes	10
8.1. Área Mínima del Cuerpo del Herraje en Tracción	10
8.2. Área Mínima Proyectada del Ojo de las Tomas en Aplastamiento	10
8.3. Área Mínima a Corte Simple del Ojo de las Tomas	11
8.4. Área Mínima de la Sección Neta del Herraje en Tracción	11
9. Dimensionamiento del Herraje y sus Componentes - Lado Gabinete	11
9.1. Área Mínima del Cuerpo del Herraje en Tracción	12
9.2. Área Mínima Proyectada de los Agujeros en Aplastamiento	12
9.3. Área Mínima a Corte Simple entre Agujeros	13
9.4. Área Mínima de la Sección Neta del Herraje en Tracción	13
9.5. Área Mínima a Corte Simple de los Elementos de Unión	13
9.6. Área Mínima a Flexión de los Elementos de Unión	14
10.Plano Tres Vistas de los Herrajes de Sujeción del Módulo de Control	14
11.Comentarios	17

Índice de figuras

1. Áreas mínimas permisibles del heraje de sugesión del módulo de comando. 14
2. Croquis - Dimensiones mínimas permisibles de los herajes de sugesión del módulo de comando. 16

Índice de cuadros

1.	Factores de Seguridad a utilizar en el análisis. (Márgenes de Seguridad mínimos deseables, según sea el caso.)	7
2.	Propiedades de Diseño de AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 301 (Ref.: [1]).	7
3.	Propiedades de Diseño de AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 301 (Ref.: [1]). (Valores en base 'S'.)	8
4.	Propiedades de Diseño de ACERO CALIDAD 12.9 (Elementos de Unión).	8
5.	Carga máxima esperable (Límite) durante el proceso apertura (Carga por herraje) - Resumen de datos para su estimación.	9
6.	Área mínima del cuerpo del herraje en tracción (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.	10
7.	Área mínima proyectada del ojo de las tomas en aplastamiento (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.	10
8.	Área mínima a corte simple del ojo de las tomas (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.	11
9.	Área mínima de la sección neta del herraje en tracción (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.	11
10.	Área mínima del cuerpo del herraje en tracción (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.	12
11.	Área mínima proyectada de los agujeros en aplastamiento (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.	12
12.	Área mínima a corte simple entre agujeros (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.	13
13.	Área mínima de la sección neta del herraje en tracción (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.	13
14.	Área mínima a corte simple de los elementos de unión (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.	13
15.	Área mínima en flexión de los elementos de unión (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.	14
16.	Comaración de las Áreas definidas por las dimensiones propuestas del herraje con los valores de las Áreas Mínimas calculadas en el análisis mecánico.	15

1. Introducción

El propósito general del proyecto PIDDEF 038/14 es desarrollar un sistema aéreo guiado y de precisión, mediante el empleo de un paracaídas comandado autónomo, para la entrega de cargas en ejercicios militares, situaciones de aislamiento producidas por inundaciones, lucha contra el fuego y ayuda humanitaria, entre otros. La propuesta es diseñar, construir y evaluar un demostrador de tecnología (prototipo de paracaídas comandado autónomo de pequeñas dimensiones), estudiar y definir un sistema de apertura confiable y flexible y proyectar un sistema aéreo similar, a mayor escala, capaz de entregar una carga útil de 100 kg.

El desarrollo de las actividades prevé dos etapas:

- **Etapla #1 - Demostrador de tecnología:** Consiste en el diseño y construcción un prototipo de paracaídas comandado a escala reducida para su modelado matemático, estudio e implementación de las leyes de control y estrategias de guiado. Inicialmente el prototipo sería moto-propulsado para facilitar la realización de los ensayos en vuelo (ascensos y descensos reiterados), y luego de la definición e implementación del sistema de extracción y apertura, se realizarían lanzamientos desde una aeronave.
- **Etapla #2 - Proyección del dispositivo para la entrega de 100 kg de carga útil:** Consiste en, a partir de los resultados generados en la primera etapa, desarrollar un sistema de entrega de 100 kg de carga útil, lo que implica, además de realizar análisis relacionados con el área de control y guiado, llevar adelante estudios de ingeniería tales como la evaluación de performances, estimación de cargas, verificaciones estructurales, selección de equipos (con su evaluación de disponibilidad) y estudios de impacto en el aterrizaje, entre otros.

Este informe técnico corresponde a la Etapa #2 del proyecto y presenta los estudios realizados en el proceso de dimensionamiento de los herrajes de sujeción del módulo de comando del Paracaídas comandado Autónomo para Entrega de Cargas.

Entre los contenidos del documento se presenta una descripción de la función de dichos herrajes, se fijan datos técnicos y criterios de cálculo, se estiman cargas límite y últimas y se propone y dimensiona la geometría de tales piezas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar y dimensionar los herrajes y elementos de unión que componen los puntos fuertes de anclaje del paracaídas, del módulo de comando y de la carga.

2.2. Objetivos Específicos

- Definir los factores de seguridad a ser empleados en el cálculo.
- Conseguir y presentar las propiedades de diseño de los materiales empleados.
- Establecer un conjunto de requerimientos de diseño estructural.
- Proponer un primer diseño para los herrajes y sus componente.
- Estimar las Cargas Límite sobre los herrajes.
- Dimensionar los herrajes considerando: cuerpo, tomas y unión al gabinete.
- Trazar un plano con tres vistas acotadas a fin de liberar y comunicar el diseño para su modelado 3D y fabricación.

3. Definiciones

Cargas Límite & Cargas Últimas: Las Cargas Límite, son las 'cargas máximas' esperables en servicio, mientras que las Cargas Últimas, son las Cargas Límite multiplicadas por un factor de seguridad predefinido.

Cargas/Tensiones Actuantes: Son los esfuerzos que se producen sobre cada elemento estructural, como resultado de cada caso de carga considerando. Para el análisis mecánico/estructural, son estimados por métodos manuales o computacionales.

Cargas/Tensiones Admisibles: Representan los valores de los esfuerzos máximos admitidos por cada elemento estructural, según el tipo de sollicitación. Se encuentran directamente asociados a los resultados de ensayos de materiales y, frecuentemente son estimados según el tipo de mecanismo de falla al que sea propenso el elemento mecánico/estructural bajo estudio.

Factor de Seguridad: Se trata de un parámetro que describe la capacidad de un sistema estructural para resistir y transferir carga, más allá de los valores esperados o reales. En el cálculo de estructuras aeronáuticas, el factor de seguridad añade un exceso de carga, a una carga prevista. Las Regulaciones Aeronáuticas indican el empleo de un factor de seguridad 'general' igual a 1.5 y, dependiendo del caso, existen diversos factores especiales que modifican este valor.

Falla: Se dice que ocurre una 'falla' cuando un componente (o conjunto de componentes) deja de cumplir la función para la que fue concebido. Una estructura se diseña para realizar cierta tarea satisfactoriamente. Si algún elemento estructural sufre ciertos efectos que afectan negativamente a la función de la estructura, se puede considerar que el elemento ha fallado.

Margen de Seguridad: Representa el exceso o defecto de resistencia (fluencia, rotura, pandeo, etc.) de un elementos estructural con relación a la carga/tensión actuante (última, límite o % de las anteriores). Es una relación que compara las cargas/tensiones actuantes con las cargas/tensiones admisibles.

$$M.S. = \frac{F_{adm}}{f_{act}} - 1$$

Un M.S. cero o negativo, indica falla.

Un M.S. positivo, señala la 'no ocurrencia' de la falla considerada.

Un M.S. excesivamente grande, señala ineficiencia estructural (baja relación resistencia-peso).

Requerimientos/Criterios de Cálculo: Los requerimientos/criterios de cálculo, conforman un conjunto de criterios que deben ser satisfechos a fin de garantizar la integridad estructural (no falla) de cada componente considerado, bajo la acción de las condiciones de carga que correspondan. Adicionalmente, el listado de requerimientos constituye una guía/recordatorio para el estudio ordenado de un problema dado.

Fractura: Separación física del material como consecuencia de los elevados niveles de los esfuerzos actuantes (respuesta estática). La fractura se puede clasificar como dúctil o frágil, en función del grado de deformaciones permanentes que sufre el material previo a la separación física.

Tensión Equivalente de von Mises: Es el valor de tensión uniaxial que produce la misma cantidad de energía de deformación (componente desviadora del tensor de tensiones) que el estado de tensiones multiaxial considerado. Permite comparar los niveles de esfuerzo producidos por un estado general de tensiones, con los resultados de ensayos de tracción uniaxial.

Falla por Desgarramiento/Arrancamiento: Falla debida a corte en la que el pasador de una unión dada, arranca y arrastra consigo a parte del material de los elementos que vincula.

Falla por Tracción de la Sección Neta: Separación física del material, debida a los elevados niveles de la tensión de tracción, en la vecindad de los orificios¹ de una unión dada. La alteración local de las tensiones producida por la presencia de los agujeros se toma en cuenta, a los fines prácticos, considerando un factor de concentración de tensiones $K = 3.0$.

Falla por Aplastamiento: Falla debida al aplastamiento de la superficie interna del ojo de una toma (u orificio que aloja a un elemento de unión tal como un bulón o remache) por parte del pasador (o del elemento de unión).

¹Orificios que alojan a los pasadores/elementos de unión del ensamble.

4. Factores de Seguridad

Se adoptan los siguientes factores de seguridad:

Material/Tipo	Factor de Seguridad	Special Factor	Obs.
Aceros (Calidad Aeronáutica)	1.5	-	M.S. > 0.0
Aleaciones de Aluminio (Calidad Aeronáutica)	1.5	-	M.S. > 0.0
Herrajes	1.8	1.2	M.S. > 0.15
Tomas en Rotación	3.0	2.0	M.S. > 0.15
Solicitaciones de Aplastamiento	6.67	4.45	M.S. > 0.15

Cuadro 1: Factores de Seguridad a utilizar en el análisis. (Márgenes de Seguridad mínimos deseables, según sea el caso.)

5. Propiedades de Diseño de los Materiales

Se ha consensado fabricar los herrajes de sujeción del módulo de control del paracaídas en acero inoxidable. El mercado local ofrece aceros inoxidables austeníticos para usos generales tales como el AISI 304, 304L, 316 o 316L, que se diferencian en los siguientes aspectos:

Acero	Empleo/Característica/Diferenciador
AISI 304	Usos generales.
AISI 304L	AISI 304 con menor % de carbono, mejorado en relación a la soldabilidad.
AISI 316	Agregado de molibdeno (Mo); mayor resistencia a corrosión y a creep.
AISI 316L	AISI 316 con menor % de carbono, mejorado en relación a la soldabilidad.

Cuadro 2: Propiedades de Diseño de AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 301 (Ref.: [1]).

El mecanizado de los aceros inoxidables austeníticos no es difícil si se toman medidas adecuadas para hacer frente a la tendencia a endurecer por trabajado que tienen estas aleaciones. El uso de máquinas pesadas, velocidades lentas, cortes profundos y herramientas de corte diseñadas adecuadamente produce los mejores resultados. El material trabajado en frío posee una maquinabilidad algo mejor que la del material recocido. (Ref.: [1])

Por otro lado, los aceros inoxidables austeníticos pueden soldarse con casi cualquier técnica habitual, excepto el arco de carbón, siempre que se tomen las medidas adecuadas para evitar la oxidación o la carburización de la soldadura. Los grados estabilizados son preferibles para piezas soldadas a ser utilizadas en condiciones corrosivas, mientras que los grados de mecanizado libre no se recomiendan para soldar.

Las varillas de aporte deben ser de la misma composición, o ligeramente más altas en contenido de aleación, que el material a soldar. Se deben emplear electrodos especialmente diseñados para el uso con aceros inoxidables, excepto en el caso de soldadura de gas inerte.

La soldadura por puntos y por laminación también se usa en gran medida para este material. (Ref.: [1])

A los fines de disponer propiedades de diseño para la verificación estructural de las piezas bajo estudio, se emplean los valores listados en el Cuadro 3, correspondientes al acero inoxidable austenítico AISI 301.

Tipo	Propiedad	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Física:					
	ρ	7916.5	Kg/m ³	Ref.: [1]	-
Elasticidad:					
	E	199948	MPa	Ref.: [1]	-
	ν	0.29	MPa	-	Obtenido a partir de G
	G	77221	MPa	Ref.: [1]	-
Resistencia:					
	F_{tu}	503	MPa	Ref.: [1]	-
	F_{ty}	179	MPa	Ref.: [1]	-
	F_{cy}	158	MPa	Ref.: [1]	-
	F_{su}	344	MPa	Ref.: [1]	-
	F_{bru}	1116	MPa	Ref.: [1]	-
	F_{brv}	379	MPa	Ref.: [1]	-

Cuadro 3: Propiedades de Diseño de AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 301 (Ref.: [1]). (Valores en base 'S').

En cuanto a los elementos de unión, el estudio considera dos tipos bien diferenciados: (i) grilletes/mosquetones para conectar las bandas del paracaídas y de la carga y (ii) bulones para vincular los herrajes al gabinete del módulo de control.

Los primeros no exigen definir las propiedades de diseño del material ya que se seleccionan desde un catálogo, a partir de los niveles de carga previstos. Sin embargo, los segundos, deben ser dimensionados y seleccionados por análisis. Se asume el empleo de bulones de acero calidad 12.9, con las siguientes propiedades de diseño:

Tipo	Propiedad	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Física:					
	ρ	7850	Kg/m ³	-	-
Elasticidad:					
	E	200000	MPa	-	-
	ν	0.3	MPa	-	-
	G	76923	MPa	-	-
Resistencia:					
	F_{tu}	1200	MPa	-	100 x entero de '12.9' (Calidad)
	F_{ty}	1080	MPa	-	$F_{tu} \times 0.9$, parte decimal de '12.9' (Calidad)
	F_{su}	684	MPa	-	$0.57 \times F_{tu}$ (von Mises)

Cuadro 4: Propiedades de Diseño de ACERO CALIDAD 12.9 (Elementos de Unión).

6. Criterios de Cálculo para los Herrajes, Uniones Desmontables y Uniones Permanentes (Checklist)

- **Her-1** No se admite Falla Estática (según tensiones equivalentes de von Mises), hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última. (M.S. > 0.0)
- **Her-2** No se admiten Deformaciones Permanentes, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Límite. (Según el criterio de fluencia de von Mises) (M.S. > 0.0)
- **Her-3** No se admite Falla por Corte de los elementos de unión, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última. (M.S. > 0.15)
- **Her-4** No se admite Falla por Flexión de los elementos de unión, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última. (M.S. > 0.15)
- **Her-5** No se admite Falla por Tracción en la vecindad del orificio para un pasador/bulón/remache, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última. (M.S. > 0.15 o 0.25, según corresponda, conforme con la metodología de cálculo empleada.)

- **Her-6** No se admite Falla por Desgarramiento, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última. (M.S. > 0.15)
- **Her-7** No se admite Falla por Aplastamiento de los orificios para un pasador/bulón/remache, hasta un nivel de carga correspondiente a Carga Última. (M.S. > 0.15, 0.5, 1.0 o 1.5, según corresponda, conforme con la metodología de cálculo empleada.)
- **Her-8** No se admiten esfuerzos superiores a $0.4 \cdot FTU$ en partes metálicas (acero o aleaciones de aluminio), para un nivel de carga correspondiente a Carga Límite.

7. Hipótesis de Cargas

Aunque el proceso de selección del velamen que se utilizaría para lanzar la carga útil de 100 Kg no se encuentra aun completamente finalizado, todo indica que se emplearía un paracaídas comandado rectangular de 7 celdas a definir entre los modelos: MT1-XX, MC-4, MC-5 y AE-695000 'Águila XXIII'.

Cualesquiera de ellos, muy similares entre sí, dispone de varios modos de uso, siendo de particular interés en esta parte del trabajo los modos High Altitude High Opening (HAHO) y High Altitude Low Opening (HALO). En el primero de ellos (HAHO), la apertura puede ser realizada utilizando una línea estática vinculada mecánicamente al avión; aunque también es factible lanzar la carga, estabilizarla y realizar la apertura en caída libre, la consecuente pérdida de altitud podría ser un comportamiento deseado. En el modo HALO, sin embargo, no hay otra alternativa que lanzar la carga, dejarla caer a la velocidad final que le permita su configuración estabilizada y realizar la apertura a baja altitud y, como es evidente, a alta velocidad.

Mediciones realizadas durante ensayos en vuelo sobre el paracaídas AE-695000 'Águila XXIII', muestran que para una apertura realizada a velocidad final (alta velocidad), la desaceleración máxima alcanza aproximadamente 5 g (Ref.: [3]).

Por otro lado, la masa total del sistema, que incluye la carga útil con su packaging, el módulo de control y el paracaídas (velamen, encordados, bandas contenedores y herrajes), se estima en aproximadamente 150 Kg. Para el módulo de comando se estima una masa máxima aceptable de aproximadamente 20 Kg.

Adicionalmente, el gabinete del módulo de comando dispone de 4 puntos de anclaje para el paracaídas (por arriba) y para la carga (por abajo), de los cuales, a los fines del cálculo, se asume que solamente 3 de ellos son 100 % efectivos.

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Referencia	Obs.
Masa Total	m	150	[Kg]	-	~ 90 % de Ref.: [2]
Masa del Módulo de Comando	m_{mc}	20	[Kg]	-	-
Factor de Desaceleración Máximo	n	5	[-]	Ref.: [3]	-
Número de Puntos de Anclaje Efectivos	k	3	[-]	-	De un total de 4
Carga Máx. sobre los Herrajes (LÍMITE)	P_{zl}	2452.5	[N]	-	$P_{zl} = \frac{nmq}{k}$
Carga Máx. Unión Módulo-Gabinete (LÍMITE)	$P_{zl,mc}$	327	[N]	-	$P_{zl,mc} = \frac{nm_{mc}q}{k}$

Cuadro 5: Carga máxima esperable (Límite) durante el proceso apertura (Carga por herraje) - Resumen de datos para su estimación.

8. Dimensionamiento del Herraje - Lado Grilletes

8.1. Área Mínima del Cuerpo del Herraje en Tracción

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{zl}	2452.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{zu}	4414.5	[N]	-	-
Tensión de Fluencia en Tracción	F_{ty}	179	[MPa]	-	-
Tensión Última en Tracción	F_{tu}	503	[MPa]	-	-
Área Mínima a Carga Límite	$A_{min,l}$	13.7	[mm ²]	Her-2	$A_{min,l} = \frac{P_{zl}}{F_{ty}}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	8.8	[mm ²]	Her-1	$A_{min,u} = \frac{P_{zu}}{F_{tu}}$

Cuadro 6: Área mínima del cuerpo del herraje en tracción (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.

Conforme con los valores listados en el Cuadro 6, el cuerpo del herraje en tracción queda dimensionado a fluencia.

Se adopta un Área Mínima del Cuerpo del Herraje en Tracción de: $A_{min} = 15 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así los criterios de cálculo **Her-1** y **Her-2**.

8.2. Área Mínima Proyectada del Ojo de las Tomas en Aplastamiento

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{zl}	2452.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	6.0	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{zu}	14715	[N]	-	-
Tensión de Fluencia en Aplastamiento	F_{bry}	379	[MPa]	-	-
Tensión Última en Aplastamiento	F_{bru}	1116	[MPa]	-	-
Área Mínima a Carga Límite	$A_{min,l}$	6.5	[mm ²]	Her-2	$A_{min,l} = \frac{P_{zl}}{F_{bry}}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	13.2	[mm ²]	Her-7	$A_{min,u} = \frac{P_{zu}}{F_{bru}}$

Cuadro 7: Área mínima proyectada del ojo de las tomas en aplastamiento (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.

Conforme con los valores listados en el Cuadro 7, el ojo de las tomas del herraje en aplastamiento, donde se anclan los grilletes del paracaídas y la carga, es dimensionado a rotura.

Se adopta un Área Mínima Proyectada del Ojo de las Tomas en Aplastamiento de: $A_{min} = 15 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así los criterios de cálculo **Her-2** y **Her-7**.

8.3. Área Mínima a Corte Simple del Ojo de las Tomas

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{zl}	2452.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{zu}	4414.5	[N]	-	-
Tensión Última de Corte	F_{su}	344	[MPa]	-	-
Número de Áreas en Corte	N_c	2	[-]	-	-
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	6.4	[mm ²]	Her-6	$A_{min,u} = \frac{P_{zu}}{F_{su}N_c}$

Cuadro 8: Área mínima a corte simple del ojo de las tomas (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.

Se adopta un Área Mínima a Corte Simple del Ojo de las Tomas de: $A_{min} = 7 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así el criterio de cálculo **Her-6**.

8.4. Área Mínima de la Sección Neta del Herraje en Tracción

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{zl}	2452.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{zu}	4414.5	[N]	-	-
Tensión de Fluencia en Tracción	F_{ty}	179	[MPa]	-	-
Tensión Última en Tracción	F_{tu}	503	[MPa]	-	-
Factor de Concentración de Tensiones	k_t	3	[-]	-	-
Número de Áreas en Tracción	N_t	2	[-]	-	-
Área Mínima a Carga Límite	$A_{min,l}$	20.6	[mm ²]	Her-2	$A_{min,l} = \frac{P_{zl}k_t}{F_{ty}N_t}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	13.2	[mm ²]	Her-5	$A_{min,u} = \frac{P_{zu}k_t}{F_{tu}N_t}$

Cuadro 9: Área mínima de la sección neta del herraje en tracción (Lado Grilletes) - Resumen de datos para su estimación.

Conforme con los valores listados en el Cuadro 9, la sección neta en tracción del cuerpo del herraje queda dimensionado a fluencia.

Se adopta un Área Mínima de la Sección Neta del Herraje en Tracción de: $A_{min} = 20 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así los criterios de cálculo **Her-2** y **Her-5**.

9. Dimensionamiento del Herraje y sus Componentes - Lado Gabinete

La unión de cada herraje sobre las paredes del gabinete del módulo de comando se propone mediante 3 bulones alineados en dirección vertical. Dado que esta configuración ofrece al herraje una condición de apoyo hiperestática, la carga absorbida y transmitida por cada elemento de unión resulta diferente. Una estimación precisa sobre la distribución de cargas en este caso requiere la solución de un problema de rigideces relativas sobre un sistema incompleto en su definición. Como una aproximación de trazo grueso, se asume que el elemento de unión del lado de la carga resiste y transmite el 50 % de ésta, el elemento central el 30 % y el tercer elemento tan solo el 20 %.

Así, la carga máxima esperable (LÍMITE) para cada elemento de unión y el orificio que lo aloja es de: $P_{bl} = 163.5 \text{ N}$.

9.1. Área Mínima del Cuerpo del Herraje en Tracción

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{bl}	163.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{bu}	294.3	[N]	-	-
Tensión de Fluencia en Tracción	F_{ty}	179	[MPa]	-	-
Tensión Última en Tracción	F_{tu}	503	[MPa]	-	-
Área Mínima a Carga Límite	$A_{min,l}$	0.9	[mm ²]	Her-2	$A_{min,l} = \frac{P_{bl}}{F_{ty}}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	0.6	[mm ²]	Her-1	$A_{min,u} = \frac{P_{bu}}{F_{tu}}$

Cuadro 10: Área mínima del cuerpo del herraje en tracción (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.

Conforme con los valores listados en el Cuadro 10, el cuerpo del herraje en tracción del lado del gabinete, también queda dimensionado a fluencia.

Se adopta un Área Mínima del Cuerpo del Herraje en Tracción de: $A_{min} = 1 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así los criterios de cálculo **Her-1** y **Her-2**.

9.2. Área Mínima Projectada de los Agujeros en Aplastamiento

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{bl}	163.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	6.0	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{bu}	921	[N]	-	-
Tensión de Fluencia en Aplastamiento	F_{brv}	379	[MPa]	-	-
Tensión Última en Aplastamiento	F_{brv}	1116	[MPa]	-	-
Área Mínima a Carga Límite	$A_{min,l}$	0.43	[mm ²]	Her-2	$A_{min,l} = \frac{P_{bl}}{F_{brv}}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	0.9	[mm ²]	Her-7	$A_{min,u} = \frac{P_{bu}}{F_{brv}}$

Cuadro 11: Área mínima proyectada de los agujeros en aplastamiento (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.

Conforme con los valores listados en el Cuadro 11, los agujeros del herraje en aplastamiento, son dimensionados a rotura.

Se adopta un Área Mínima Projectada de los Agujeros en Aplastamiento de: $A_{min} = 1 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así los criterios de cálculo **Her-2** y **Her-7**.

9.3. Área Mínima a Corte Simple entre Agujeros

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{bl}	163.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{bu}	294.3	[N]	-	-
Tensión Última de Corte	F_{su}	344	[MPa]	-	-
Número de Áreas en Corte	N_c	2	[-]	-	-
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	0.43	[mm ²]	Her-6	$A_{min,u} = \frac{P_{bu}}{F_{su}N_c}$

Cuadro 12: Área mínima a corte simple entre agujeros (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.

Se adopta un Área Mínima a Corte Simple entre Agujeros de: $A_{min} = 0.5 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así el criterio de cálculo **Her-6**.

9.4. Área Mínima de la Sección Neta del Herraje en Tracción

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{bl}	163.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{bu}	294.3	[N]	-	-
Tensión de Fluencia en Tracción	F_{ty}	179	[MPa]	-	-
Tensión Última en Tracción	F_{tu}	503	[MPa]	-	-
Factor de Concentración de Tensiones	k_t	3	[-]	-	-
Número de Áreas en Tracción	N_t	2	[-]	-	-
Área Mínima a Carga Límite	$A_{min,l}$	1.37	[mm ²]	Her-2	$A_{min,l} = \frac{P_{bl}k_t}{F_{ty}N_t}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	0.9	[mm ²]	Her-5	$A_{min,u} = \frac{P_{bu}k_t}{F_{tu}N_t}$

Cuadro 13: Área mínima de la sección neta del herraje en tracción (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.

Conforme con los valores listados en el Cuadro 13, la sección neta en tracción del cuerpo del herraje del lado del gabinete, queda dimensionado a fluencia.

Se adopta un Área Mínima de la Sección Neta del Herraje en Tracción de: $A_{min} = 1.5 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así los criterios de cálculo **Her-2** y **Her-5**.

9.5. Área Mínima a Corte Simple de los Elementos de Unión

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{bl}	163.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{bu}	294.3	[N]	-	-
Tensión Última de Corte	F_{su}	684	[MPa]	-	Ref.: Cuadro 4
Número de Áreas en Corte	N_c	1	[-]	-	-
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	0.43	[mm ²]	Her-3	$A_{min,u} = \frac{P_{bu}}{F_{su}N_c}$

Cuadro 14: Área mínima a corte simple de los elementos de unión (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.

Se adopta un Área Mínima a Corte Simple de los Elementos de Unión que vinculan a los herrajes con en gabinete, de: $A_{min} = 0.5 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así el criterio de cálculo **Her-3**.

9.6. Área Mínima a Flexión de los Elementos de Unión

Variable	Símbolo	Valor	Unidad	Criterio	Obs.
Carga Límite en Tracción	P_{bl}	163.5	[N]	-	-
Factor de Seguridad	j	1.8	[-]	-	-
Carga Última en Tracción	P_{bu}	294.3	[N]	-	-
Tensión Última en Tracción	F_{tu}	1200	[MPa]	-	Ref.: Cuadro 4
Espesor del Herraje	$t_{herraje}$	4.8	[mm]	-	Perfil 'L' comercial
Distancia entre Cargas	d	3.2	[mm]	-	$\frac{2}{3}t_{herraje}$
Diámetro del Elemento de Unión	φ_{bolt}	4.0	[mm]	-	Propuesto (M4)
Radio del Elemento de Unión	$r_{min,u}$	2.0	[mm]	-	$r_{min,u} = \frac{\varphi_{bolt}}{2}$
Área*Radio a Carga Última	$A_{min,u}r_{min,u}$	3.1	[mm ³]	-	$A_{min,u}r_{min,u} = \frac{4P_{bu}d}{F_{tu}}$
Área Mínima a Carga Última	$A_{min,u}$	1.57	[mm ²]	Her-4	$A_{min,u} = \frac{A_{min,u}r_{min,u}}{r_{min,u}}$

Cuadro 15: Área mínima en flexión de los elementos de unión (Lado Gabinete) - Resumen de datos para su estimación.

Se adopta un Área Mínima en Flexión de los Elementos de Unión que vinculan a los herrajes con en gabinete, de: $A_{min} = 1.6 \text{ mm}^2$, satisfaciendo así el criterio de cálculo **Her-4**.

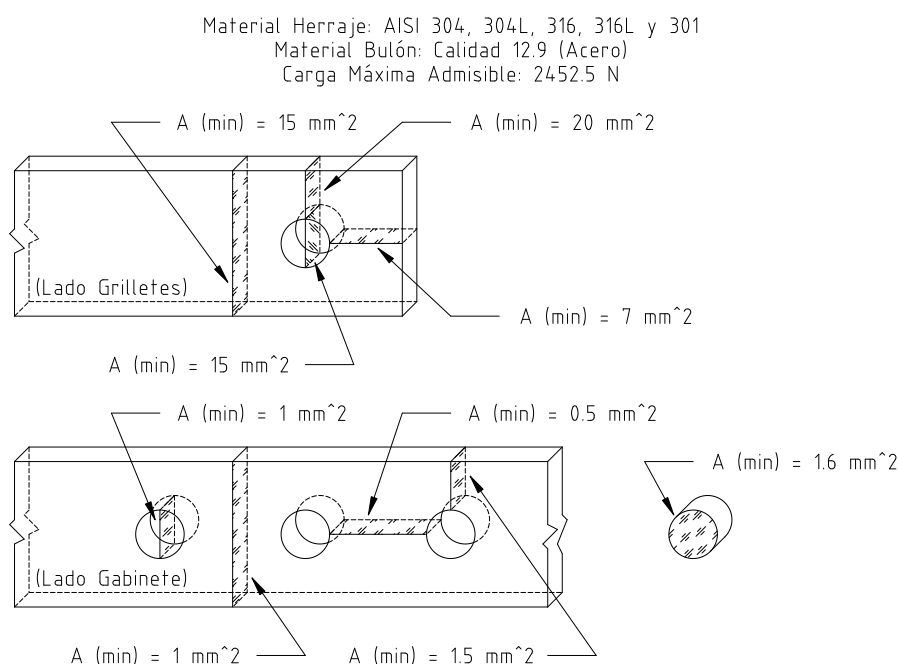


Figura 1: Áreas mínimas permisibles del heraje de sugeción del módulo de comando.

10. Plano Tres Vistas de los Herrajes de Sujeción del Módulo de Control

La carga límite máxima esperable en cada punto de anclaje es de aproximadamente 2452.5 N ($\sim 0.25 \text{ ton}$). Asumiendo el empleo de un factor de seguridad $j = 1.8$, la carga última resulta: 4414.5 N, es decir, aproximadamente 0.45 ton. Considerando este último valor (por seguridad) y las limitaciones que significan los

problemas de interferencias geométricas, se seleccionan grilletes estándar para cargas máximas de trabajo de 0.5 ton.

Un grillete estándar de este tipo presenta un pasador de 8 mm de diámetro y las 'tomas' de dicho pasador tienen un diámetro exterior de 16.5 mm.

Por otro lado, para el cuerpo de los herrajes, la propuesta es construirlos a partir de un perfil con sección transversal 'L' de acero inoxidable AISI 304, con dimensiones: 50.2x50.2x4.8 mm.

La longitud del cuerpo del herraje queda definida por la altura del gabinete del módulo de comando, cuyo valor es 164 mm. El ángulo del chafán de la tapa y la base del gabinete es de 28°.

Para la unión de los herrajes al gabinete se propone el empleo de tornillos de acero calidad 12.9 y rosca M4, con cabeza Allen plana del tipo 'lenteja'. La longitud deberá ser definida oportunamente.

Solicitud	Área Mínima [mm ²]	Área [mm ²]	M.S.	Criterio	Obs.
Tracción lado grilletes	15	>60	>3.0	Her-1 & Her-2	Cumple
Aplastamiento lado grilletes	15	>32	>1.1	Her-2 & Her-7	Cumple
Desgarramiento lado grilletes	7	>24	>2.4	Her-6	Cumple
Tracción A_{neta} lado grilletes	20	>24	>0.2	Her-2 & Her-5	Cumple
Tracción lado gabinete	1	>35	Amplio	Her-1 & Her-2	Cumple
Aplastamiento lado gabinete	1	>16	Amplio	Her-2 & Her-7	Cumple
Desgarramiento lado gabinete	0.5	>28	Amplio	Her-6	Cumple
Tracción A_{neta} lado gabinete	1.5	>28	Amplio	Her-2 & Her-5	Cumple
Corte Bulones	0.5	>12	Amplio	Her-3	Cumple
Flexión Bulones	1.6	>12	>7.5	Her-4	Cumple

Cuadro 16: Comparación de las Áreas definidas por las dimensiones propuestas del herraje con los valores de las Áreas Mínimas calculadas en el análisis mecánico.

En esta configuración, la solicitud que más exige al material del herraje es la tracción del área neta de las tomas a ojo que vinculan a los grilletes, en la vecindad de los agujeros que los alojan.

Considerando el valor de la carga límite $P_{zl} = 2452.5$ N, que el factor de concentración de tensiones adoptado es $k_t = 3.0$ y que el área total en tracción neta es $A_{neta,tot} = 48$ mm² ($N_t = 2$), se tiene que la tensión límite máxima esperable resulta en $\sigma_{lim} = 153.3$ MPa.

Como $0.4F_{tu} = 201.2$ MPa > 153 MPa = σ_{lim} , el diseño satisface además el requerimiento de cálculo **Her-8**.

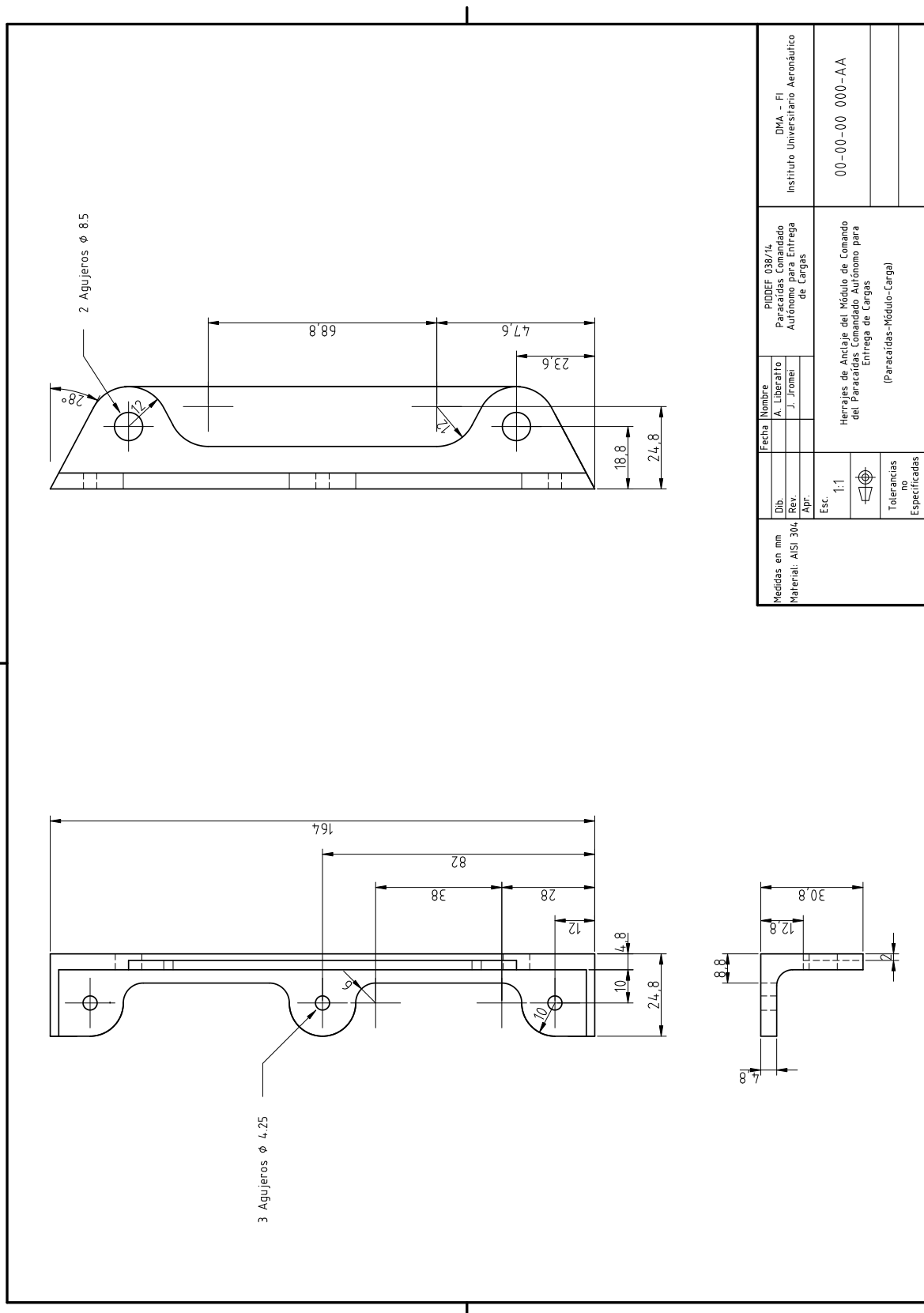


Figura 2: Croquis - Dimensiones mínimas permisibles de los herajes de sugesión del módulo de comando.

11. Comentarios

La configuración propuesta y las dimensiones sugeridas para los herrajes, grilletes y elementos de unión satisfacen los requerimientos de diseño y calculo estructural oportunamente planteados (**Her-1** a **Her-8**), para los factores de seguridad adoptados y las propiedades de diseño de los materiales establecidas.

Conforme con el estudio realizado, la sollicitación más crítica para el cuerpo del herraje es la tracción del área neta en la vecindad de los ojo de las tomas que alojan a los grilletes. Aún así, el valor alcanzado a carga límite ($\sigma_{lim} = 153.3$ MPa) no supera al 40 % de F_{tu} ($0.4F_{tu} = 201.2$ MPa), satisfaciendo así los requerimientos de durabilidad.

Las dimensiones de los herrajes se presentan en el croquis de la Figura 2. Respetar tales dimensiones garantiza el cumplimiento de los valores de las áreas mínimas estimadas en el análisis de tensiones.

Para la fabricación del cuerpo de los herrajes se propone mecanizar tramos de perfiles 'L' (de dimensiones: 50.2x50.2x4.8 mm) de acero inoxidable austenítico AISI 304.

Se seleccionaron grilletes estándar tipo 'lira' con pasador y tuerca de seguridad, capaces de soportar una carga máxima de trabajo de 0.5 ton.

También se seleccionaron elementos de unión estándar (bulones) de acero calidad 12.9 y rosca M4, con cabeza Allen plana, tipo 'lenteja'.

Referencias

- [1] Department of Defense, United States of America. *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures - Military Handbook (MIL-HDBK-5H)*, 1998.
- [2] Headquarters, Department of the Army. *MC-4 Ram Air Free-Fall Personnel Parachute System - Technical Manual*, 2003.
- [3] A. Liberatto and G. Jeandrevin. Análisis de los resultados de ensayos en vuelo del paracaídas ae-695000 'Águila xxiii'. Technical report, Instituto Universitario Aeronáutico - Facultad de Ingeniería - Departamento Mecánica Aeronáutica, 2015.