



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FIN DE GRADO

FLAMEO DE UN PERFIL CON UN GRADO DE LIBERTAD

Diseño de experimento y análisis teórico

Autora: Henriette Merle Bolufer

Tutor: Mario Lázaro Navarro

Valencia, septiembre de 2018



ÍNDICE



- Introducción
- Antecedentes
- Objetivos
- Fase de prediseño
- Estudio experimental
- Trabajos futuros
- Conclusiones

INTRODUCCIÓN



FLAMEO

- Problema de inestabilidad dinámica → Fallo estructural del ala
- Estudio para poder evitar o controlar el fenómeno
- Velocidad crítica de flameo: coinciden la frecuencia natural del sistema y la frecuencia de excitación, provocando la resonancia de la estructura

ESTUDIO DEL FLAMEO DE UN PERFIL
DE UN GRADO DE LIBERTAD: EL GIRO



Figura 1. Colapso del puente de Tacoma.

ANTECEDENTES



■ ESTUDIO DE KIERGAN Y TOMAMICHEL, 1942

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA

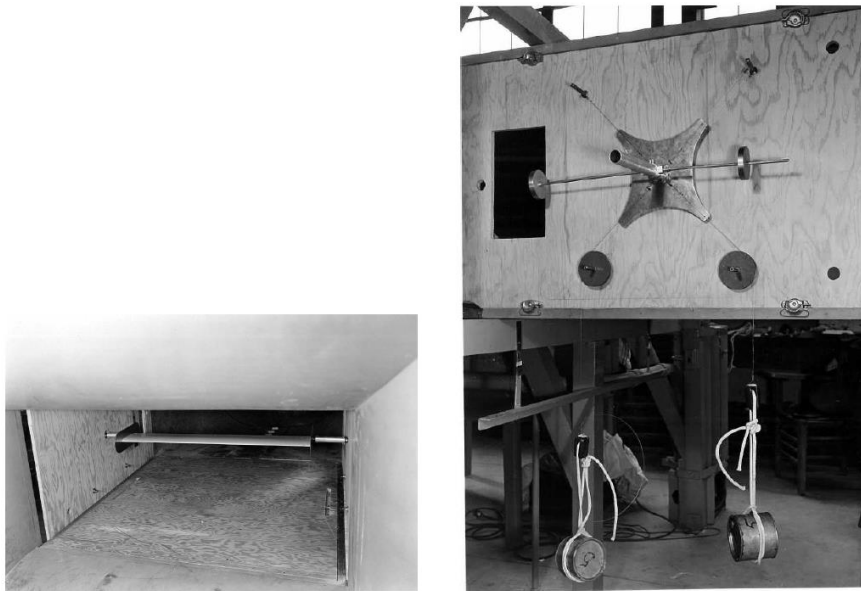


Figura 2. Experimento de Kiergan y Tomamichel.

■ ESTUDIO DE RUNYAN, 1952

LABORATORIO AERONÁUTICO DE LANGLEY

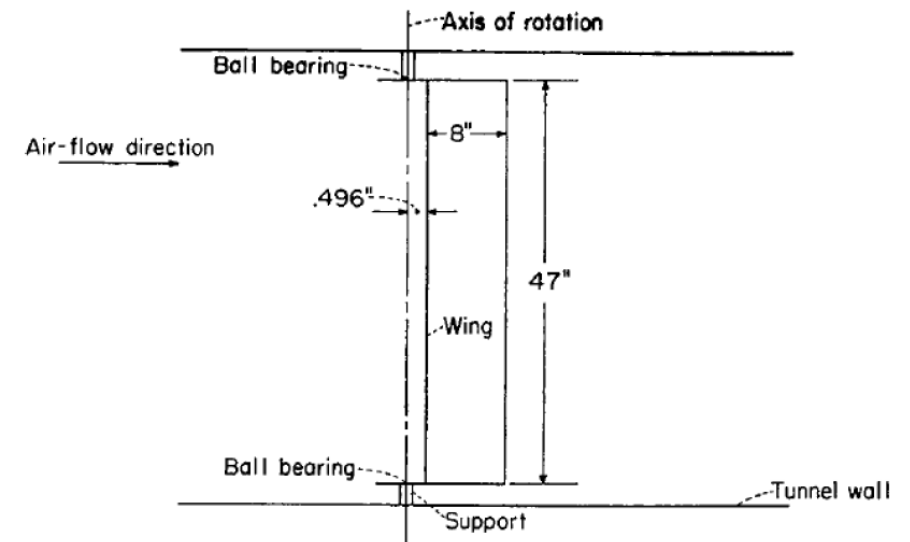


Figura 3. Experimento de Runyan.



OBJETIVOS

1. Estudio del fenómeno de flameo para el grado de libertad de giro
 - Hallar la velocidad crítica de flameo
2. Diseñar y construir un modelo capaz de representar este sistema
3. Comparar resultados teóricos y experimentales
 - identificar factores relevantes
 - analizar similitudes y discrepancias

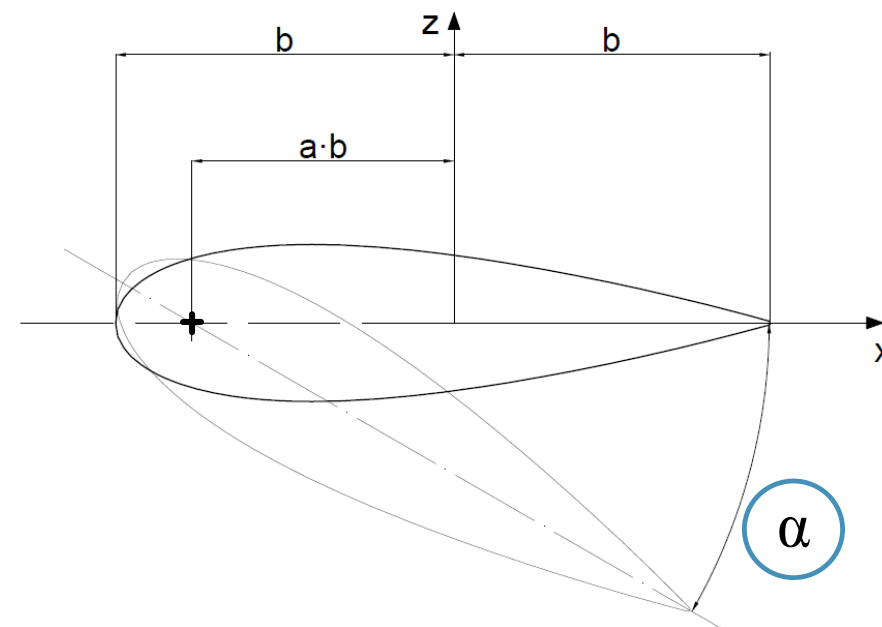


Figura 4. Perfil con un gdl: giro.



Es posible que no exista flameo cuando hay una rótula cerca del borde de ataque (recordar *Antecedentes*)



HIPÓTESIS ASUMIDAS

- Flujo incompresible y no viscoso
- Condiciones no-estacionarias
- Principio de pequeñas perturbaciones
- Condición de contorno de *Kutta*

FASE DE PREDISEÑO



■ SISTEMA DE FLAMEO DE UN PERFIL CON UN GRADO DE LIBERTAD

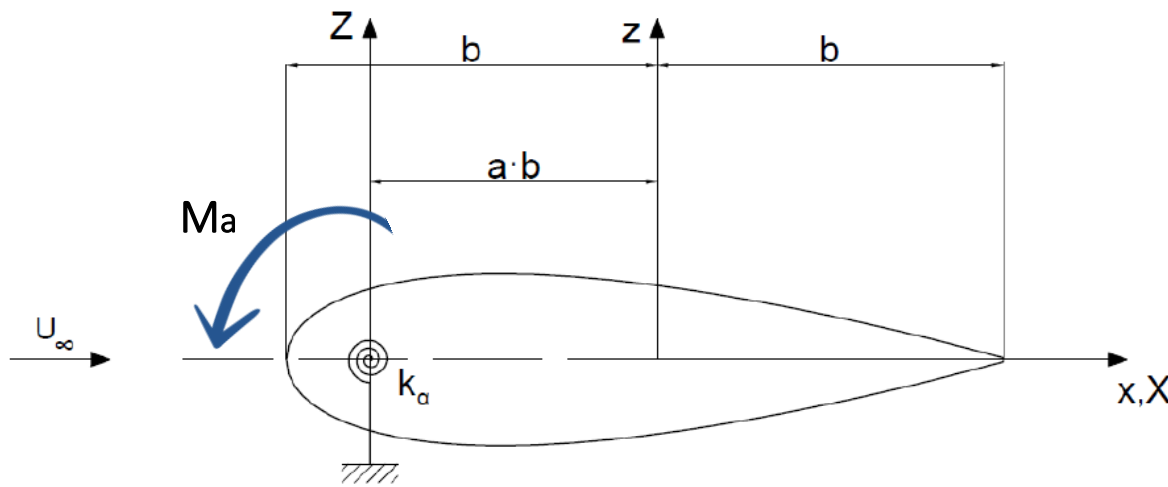


Figura 5. Sistema de un perfil con gdl el giro α .

- Perfil bidimensional de cuerda $2b$
- Gdl el giro α
- Giro sobre el eje en $x = ab$
- Rigidez equivalente a torsión k_α
- Inercia I_α
- Momento aerodinámico M_α

FASE DE PREDISEÑO



■ ANÁLISIS TEÓRICO

Ecuación Lagrange:
 $I_\alpha \ddot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M_a(t)$



Dominio de Fourier:
 $-w^2 I_\alpha + k_\alpha = M_a(w)$

$$M_a(w) = M_R(w) + iM_I(w)$$



2 ecuaciones a resolver

→ Parte real
→ Parte imaginaria

$$k$$

$$V_f$$



$$U_f$$

CONCLUSIONES

- Inercia superior a la mínima necesaria
- Importancia localización eje de giro

FASE DE DISEÑO



ANÁLISIS TEÓRICO

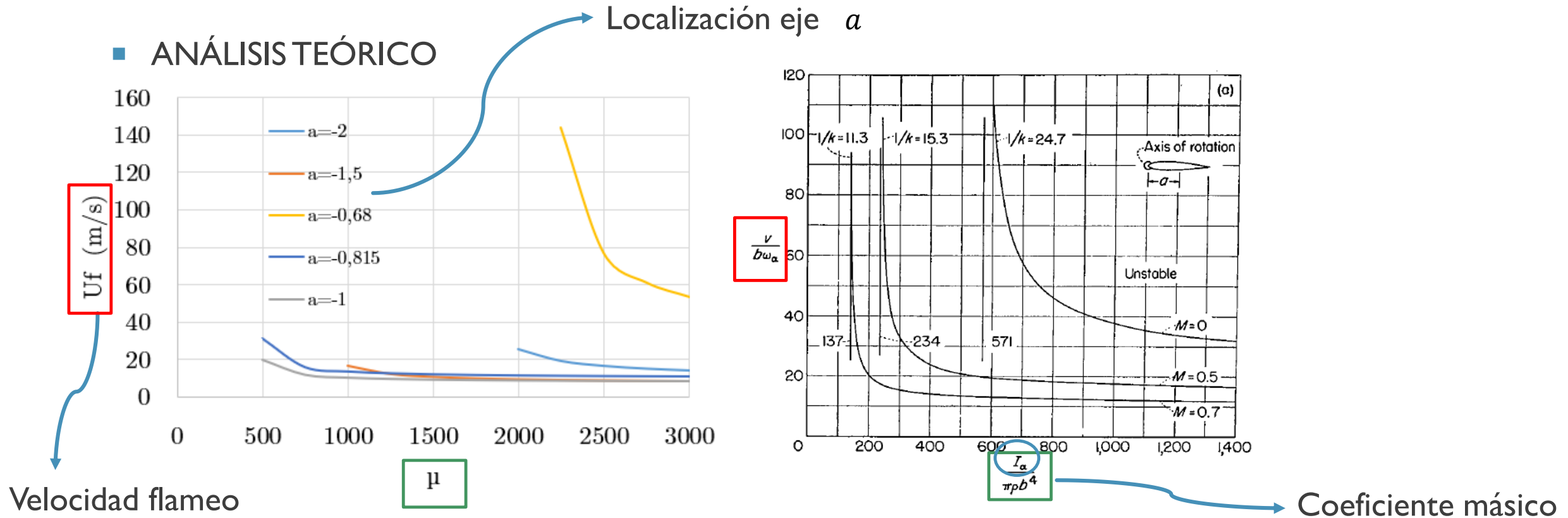


Figura 6. Comparación de la velocidad de flameo frente al coeficiente másico con el modelo de Runyan para $a = -1$.

FASE DE DISEÑO



PROPUESTA DE DISEÑO

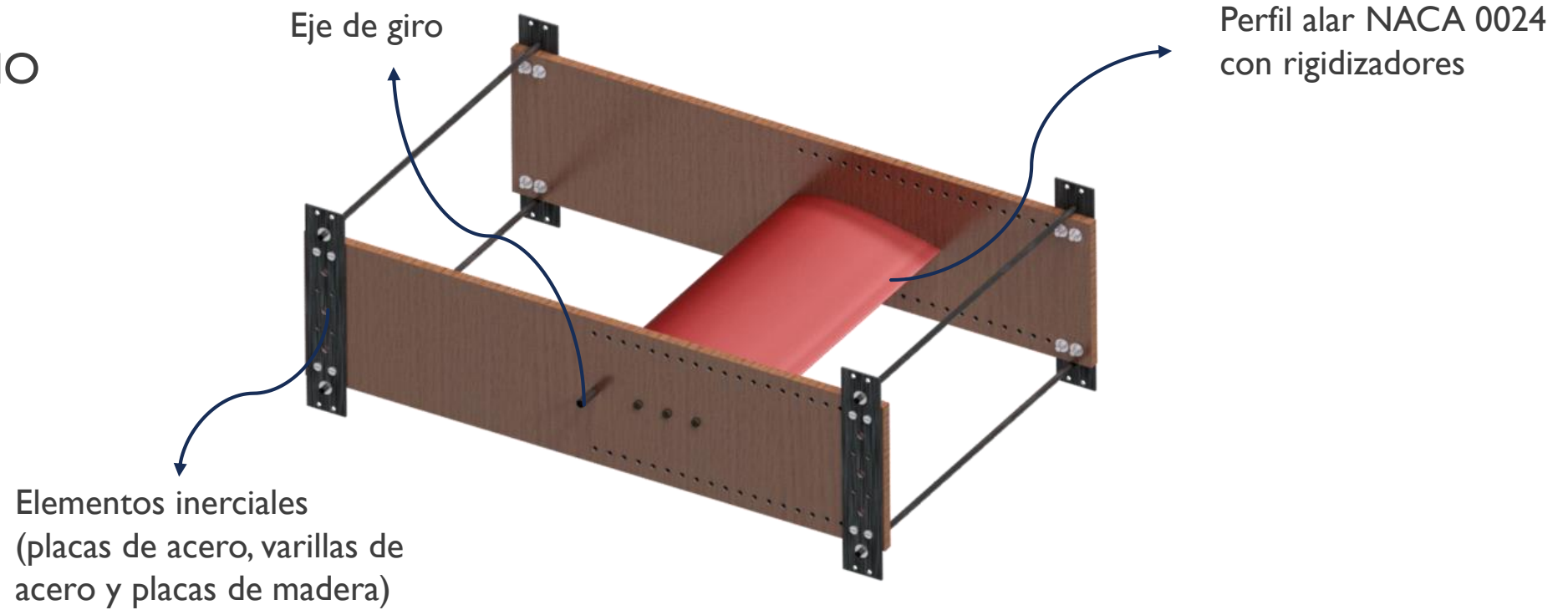


Perfil alar NACA 0024
con rigidizadores

FASE DE DISEÑO



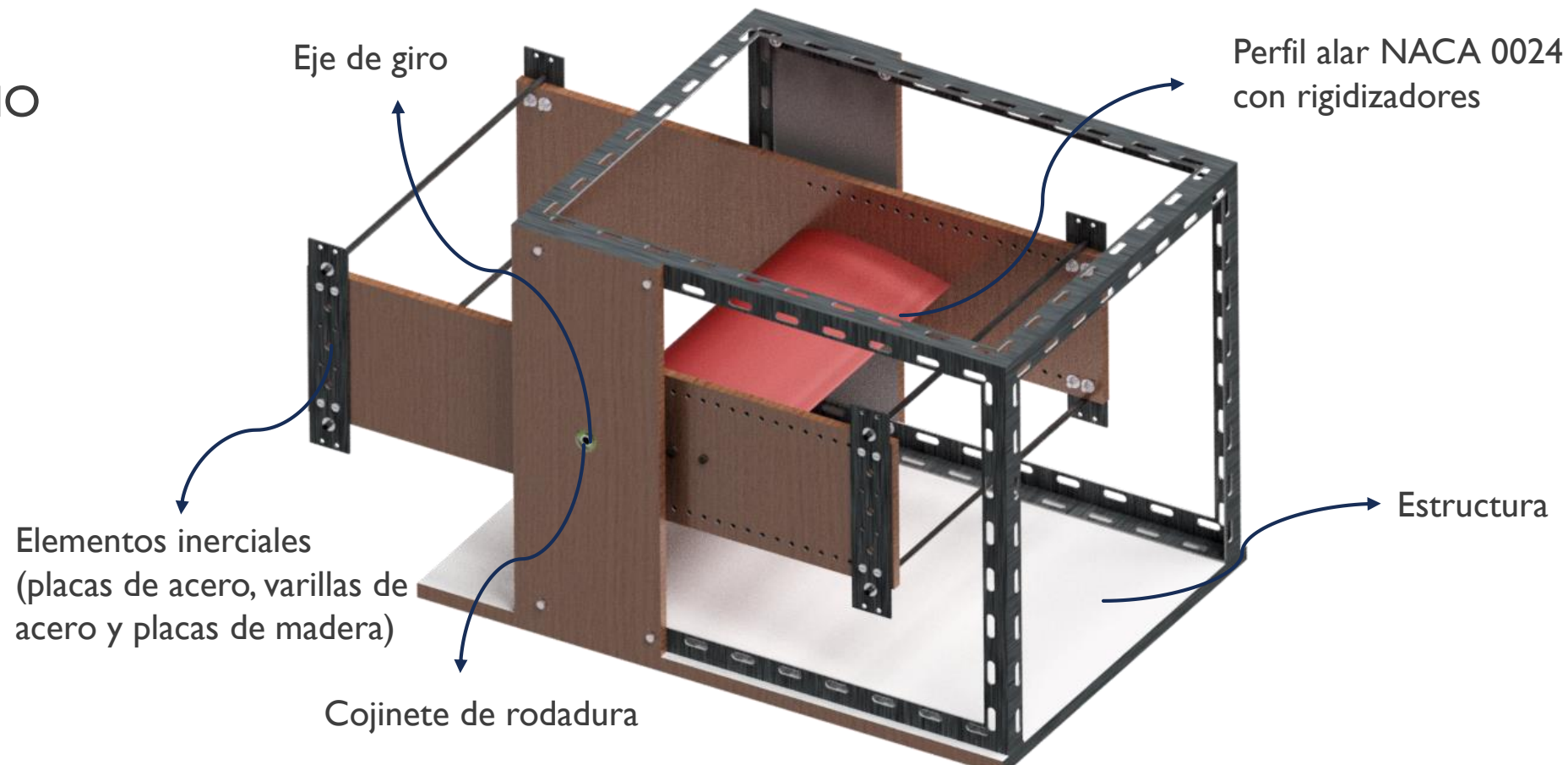
PROPUESTA DE DISEÑO



FASE DE DISEÑO



PROPUESTA DE DISEÑO



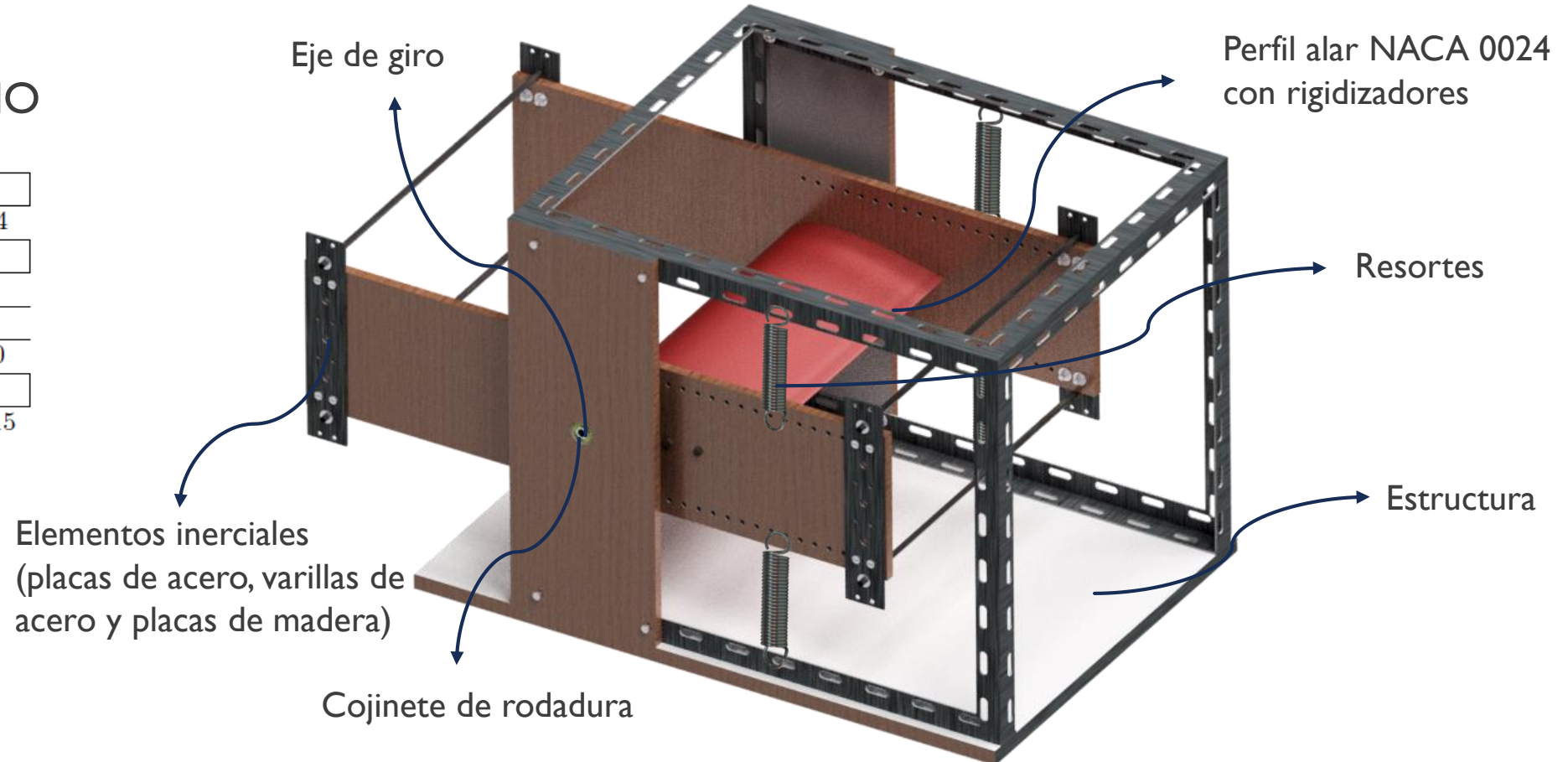
FASE DE DISEÑO



PROPUESTA DE DISEÑO

Datos inerciales	
Coefficiente másico μ	1424
Datos de rigidez	
Nº muelles n	4
Rigidez de un muelle k (N/m)	10
Distancia del muelle r (m)	0,20
Datos geométricos	
Localización del eje a	-0,815

V_f	32,47
U_r (m/s)	0,361
U_f (m/s)	11,72



ESTUDIO EXPERIMENTAL

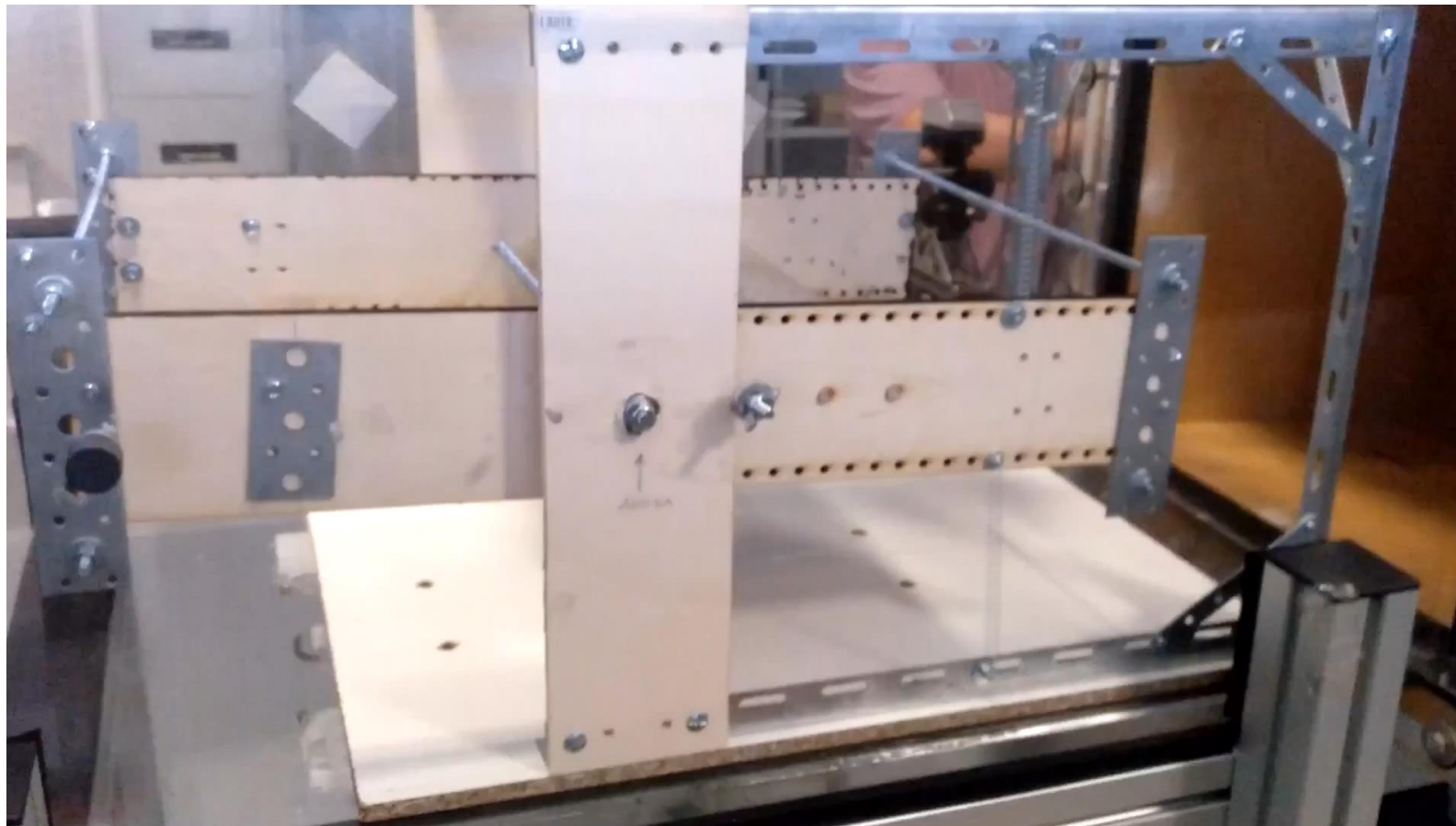


- TÚNEL DE VIENTO
 - Rango de velocidades entre 11 y 18 m/s (sin modelo en su interior). Con el modelo dentro hay que medir velocidades con tubo de Pitot.
 - Túnel de viento abierto del hangar de la UPV



Figura 9. Túnel de viento abierto del hangar de la UPV.

ESTUDIO EXPERIMENTAL



ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS

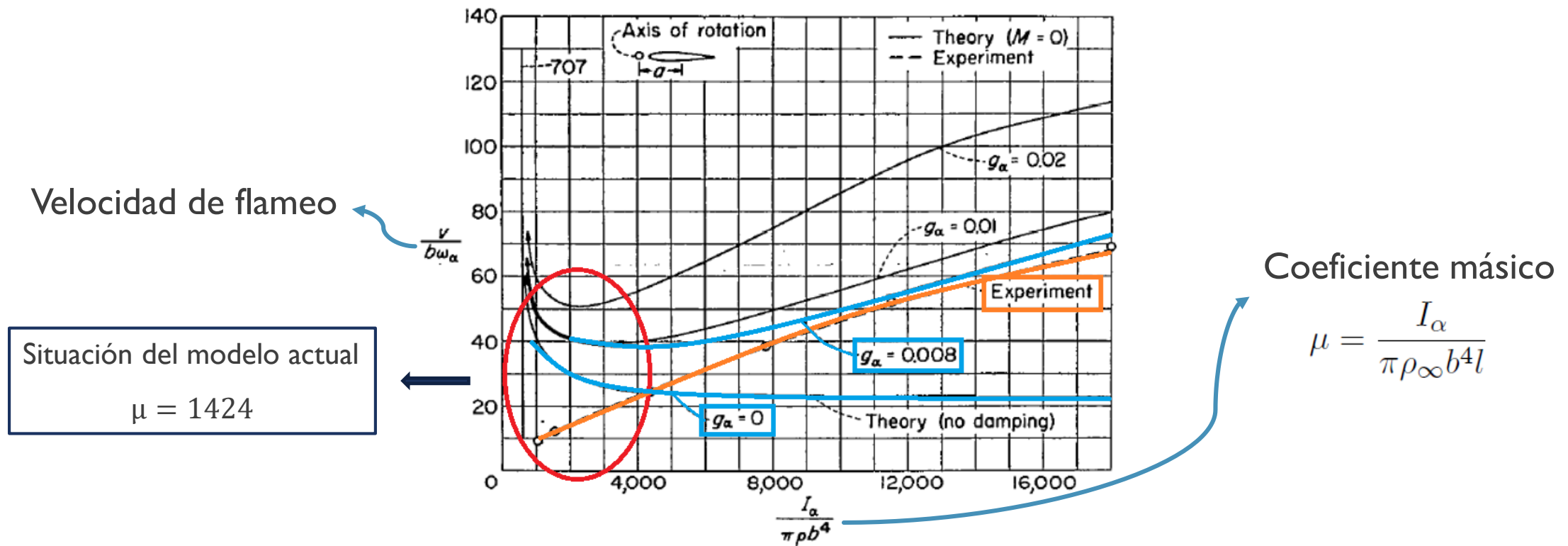


Figura 8. Comparación de la velocidad de flameo teórica y experimental en el estudio de Runyan.

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $a \geq 1$ y $a \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

ESTUDIO EXPERIMENTAL. TRABAJOS FUTUROS



- ENSAYO DEL PERFIL EN EL TÚNEL DE VIENTO → El perfil no flamea → ¿Por qué?

POSIBLES CAUSAS DE FALLO	POSIBLES SOLUCIONES. TRABAJOS FUTUROS
Perfil demasiado grueso (NACA 0024)	Utilizar otro perfil alar más fino (Kiergan NACA 0009)
Elementos estructurales e inerciales dentro del túnel de viento	Rediseñar con elementos estructurales fuera del túnel (Kiergan)
Alargamiento alar AR insuficiente ($AR = 2,19$)	Diseñar ala con alargamiento alar mayor (Runyan $AR = 5,87$)
Inercia insuficiente	Insertar más elementos inerciales (añadir placas, masas colgantes)
No se ha considerado amortiguamiento en los cálculos	Realizar nuevos cálculos con amortiguamiento estructural (bajo)
Expresión del momento aerodinámico no se aproxima a la realidad	Buscar más bibliografía sobre esta expresión
Paredes del túnel de viento demasiado cercanas al modelo	Probar en un túnel de viento más grande
Posición incorrecta del eje de giro	Probar con posición del eje de giro en $\alpha \geq 1$ y $\alpha \leq 1,5$
No hay ángulo de ataque inicial	Colocar perfil a ángulo de ataque máximo para incitar flameo (12°)

CONCLUSIONES



1 Estudio condicionado por gran incertidumbre

Pocos estudios similares que puedan aportar información para diseñar un modelo de flameo de 1 gdl

2 Objetivos: calcular la velocidad de flameo y comprobar experimentalmente ✗

identificar factores relevantes ✓

3 Cambios a realizar en el modelo para conseguir el flameo en el perfil

1. Mayor inercia
2. Elementos estructurales exteriores
3. Cálculos con amortiguamiento
4. Perfil aerodinámico más fino



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FIN DE GRADO

FLAMEO DE UN PERFIL CON UN GRADO DE LIBERTAD

Diseño de experimento y análisis teórico

Muchas gracias por su atención



FASE DE PREDISEÑO



ANÁLISIS TEÓRICO

Ecuación de Lagrange

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}} \right) + \frac{\partial D}{\partial \dot{u}} + \frac{\partial U}{\partial u} = Q(t)$$

Fuerzas generalizadas

$$\delta W = \delta u^T Q \longrightarrow M_a = Q$$

Energía cinética. Matriz de masas

$$T = \frac{1}{2} \int \dot{z}^2 dm = \frac{1}{2} \dot{u}^T M \dot{u} = \frac{1}{2} I_\alpha \dot{\alpha}^2$$

↑
 $z = -\alpha x$

Energía potencial. Matriz de rigidez

$$U = \frac{1}{2} k_\alpha z_\alpha^2 = \frac{1}{2} u^T K u \quad k_\alpha = 4k_m x_m^2 = K$$

$$I_\alpha \ddot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M_a$$

Relaciones entre variables

$$w_n^2 = \frac{k_\alpha}{I_\alpha} \quad \mu = \frac{I_\alpha}{\pi \rho_\infty b^4 l}$$

$$w = \lambda w_n \quad k = \frac{wb}{U_\infty}$$

$$-1 + \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\mu} \frac{f(k, a)}{k^2}$$

Momento aerodinámico

$$M_a = \int_{x=-b}^{x=b} \Delta p(x, t) (x_a - x) dx =$$

$$- \pi \rho_\infty b^2 \left[U_\infty b \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\alpha} + b^2 \left(\frac{1}{8} + a^2 \right) \ddot{\alpha} \right] +$$

$$+ 2\pi \rho_\infty U_\infty b^2 \left(\frac{1}{2} + a \right) C(\kappa) \left[U_\infty \alpha + b \left(\frac{1}{2} - a \right) \dot{\alpha} \right] =$$

$$= M_{\alpha 0} \alpha + M_{\alpha 1} \dot{\alpha} + M_{\alpha 2} \ddot{\alpha}$$

$$M_a = \pi \rho_\infty U_\infty^2 b^2 f(k) l$$

FASE DE PREDISEÑO



■ ANÁLISIS TEÓRICO

Se resuelve la ecuación de Lagrange para la parte real e imaginaria

$$-1 + \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\mu} \frac{f(k, a)}{k^2} \longrightarrow f(k) = f_R(k) + i f_I(k)$$

Diagram showing the decomposition of the Lagrange equation into real and imaginary parts:

- From $f(k) = f_R(k) + i f_I(k)$, the imaginary part is set to zero: $f_I(k) = 0 \longrightarrow k_f$
- The real part is used to find the minimum: $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\mu k^2} f_R(k) + 1 \longrightarrow \lambda = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f_R(k)}{\mu k^2}}} \longrightarrow \mu_{min}$

The final expression for the minimum value of μ is: $\mu = \frac{I_\alpha}{\pi \rho_\infty b^4 l}$

Obtención de la velocidad de flameo

1 $V_f = \frac{\lambda_f}{k_f}$ 2 $k_\alpha = n \cdot k \cdot r^2 \longrightarrow w_n = \frac{k_\alpha}{I_\alpha}$ 3 $U_r = w_n \cdot b$ 4 $U_f = V_f \cdot U_r$

PRESUPUESTO



Modelo

Nº	Elemento	Precio (€/ud.)	Coste (€)
1	Caja tornillos, roscas y arandelas	30,00	30,00
1	Estructura (placas madera+metal)	50,00	50,00
1	Perfil alar	10,00	10,00
5	Varilla M6 y M8 metal	2,00	10,00
3	Varilla M8 madera	1,00	3,00
4	Caja de muelles	11,00	44,00
2	Cojinete de rodadura	8,00	16,00
TOTAL			163,00 €

Equipamiento

Tiempo (h)	Elemento	Precio (euro/h)	Coste (€)
30	Túnel de viento abierto	40,00	1.200,00
1	Túnel de viento cerrado	50,00	50,00
5	Taller+material	30,00	150,00
Cantidad	Elemento	Precio (€/h)	Coste (€)
1	Ordenador	800,00	800,00
1	Programas informáticos	2.942,00	2.942,00
TOTAL			5.142,00€

Equipamiento

Tiempo (h)	Elemento	Precio (€/h)	Coste (€)
400	Proyecto	40,00	16.000,00
10	Horas extra del proyecto	50,00	500,00
60	Trabajo del tutor	50,00	3.000,00
TOTAL			19.500,00€

PRESUPUESTO



Presupuesto	
Elemento	Coste (€)
Modelo	163,00
Equipamiento	5.142,00
Salarios	19.500,00
Subtotal	24.805,00
IVA (21 %)	5.209,05
TOTAL	30.014,05€