

# Ángulo de Ataque (AoA) en parapente

Guía técnica — Parapente Lab (versión texto, sin imágenes)

Este documento define el Ángulo de Ataque (AoA) de un perfil alar como el ángulo entre la línea de cuerda y el viento relativo. Se describen sus implicaciones aerodinámicas, el concepto de ángulo crítico y la relación práctica con frenos y acelerador en parapente, incluyendo una nota específica sobre la susceptibilidad a colapsos frontales en alas inflables cuando se opera con AoA bajo en aire movido.

## 1. Perfil alar y referencias geométricas

Un perfil alar es la sección del ala observada en un plano perpendicular a la envergadura. Su geometría (curvatura/camber, espesor, radio del borde de ataque, etc.) determina, junto con las condiciones de flujo, los coeficientes aerodinámicos del ala. No obstante, la geometría por sí sola no “garantiza” el vuelo: el comportamiento aerodinámico depende de la interacción entre el perfil y el flujo de aire incidente.

La referencia geométrica fundamental para definir el AoA es la línea de cuerda: el segmento recto que une el borde de ataque con el borde de salida. En perfiles reales, la cuerda es una referencia conveniente y reproducible, aunque no coincida con la línea media aerodinámica ni con la dirección de fuerzas.

## 2. Viento relativo y definición formal de AoA

El viento relativo es el vector de velocidad del aire con respecto al ala (opuesto a la velocidad del ala respecto a la masa de aire). Si el ala se desplaza con velocidad  $V$  respecto al aire, el viento relativo tiene igual magnitud y dirección contraria, y define la orientación del flujo incidente sobre el perfil.

El Ángulo de Ataque (AoA) se define como el ángulo entre la línea de cuerda y la dirección del viento relativo. Es crítico distinguir esta definición de la inclinación respecto al horizonte: el AoA se mide con respecto al flujo, no con respecto a la gravedad ni al terreno. En planeo o en presencia de ascendencias/descendencias, la dirección del flujo relativo puede variar sin que el horizonte sea una referencia útil.

Definición operativa:  $AoA = \angle(\text{cuerda}, \text{viento relativo})$ .

## 3. AoA y régimen aerodinámico del perfil

En un rango operativo, el coeficiente de sustentación  $C_L$  aumenta con el AoA de forma aproximadamente lineal. De manera simultánea, el coeficiente de resistencia  $C_D$  también aumenta (no linealmente) debido al incremento de pérdidas por forma, fricción y, especialmente cerca del límite, por separación del flujo. La relación entre ambos coeficientes determina la eficiencia aerodinámica (habitualmente caracterizada por  $L/D$ ).

A medida que el AoA crece, el flujo sobre el extradós tiende a experimentar mayores gradientes adversos de presión. En un punto, la capa límite puede separarse, produciendo una degradación rápida de la sustentación y un aumento marcado de la resistencia. Este fenómeno define el régimen de pérdida (stall).

## 4. Ángulo crítico y pérdida (stall)

El ángulo crítico es el AoA a partir del cual el perfil no puede incrementar sustentación de manera estable porque se produce separación significativa del flujo. En muchos

perfiles, un valor típico está en el orden de 15–17°, pero debe entenderse como una referencia: el valor exacto depende del perfil, de la rugosidad, del número de Reynolds, de la carga y del estado del ala.

En términos prácticos, acercarse al ángulo crítico reduce el margen frente a la pérdida. La pérdida no es un evento binario; puede manifestarse como una degradación progresiva de control, aumento de hundimiento y, finalmente, colapso de la sustentación efectiva. En parapente, la pérdida puede ser parcial o asimétrica si el AoA no es uniforme a lo largo de la envergadura.

## **5. Control del AoA en parapente: frenos, trims y acelerador**

En parapente, el piloto modifica el AoA principalmente mediante la acción sobre los frenos (control de borde de fuga) y mediante el sistema de aceleración (speedbar), además de la configuración de trims en modelos que lo incorporen. Estas acciones cambian la actitud del perfil respecto al flujo relativo y, por tanto, el AoA efectivo.

### **5.1 Frenos**

- Al aplicar freno (tracción hacia abajo del borde de fuga), el perfil incrementa su AoA efectivo respecto al flujo relativo.
- En un rango moderado, esto puede incrementar  $C_L$  y permitir volar a menor velocidad, a costa de incrementar resistencia.
- Una aplicación excesiva aproxima al sistema al ángulo crítico, reduciendo margen de seguridad y aumentando la probabilidad de pérdida.

### **5.2 Acelerador (speedbar)**

- El uso de acelerador reduce el AoA efectivo: el ala se presenta con menor incidencia al viento relativo.
- La reducción del AoA permite aumentar la velocidad (especialmente útil para penetración frente a viento), pero suele incrementar el hundimiento en aire calmo.
- Un AoA bajo aumenta sensibilidad en aire movido y reduce margen frente a ciertos eventos dinámicos; por ello la gestión de velocidad debe ser deliberada.

## **6. AoA cercano a 0°: interpretación correcta**

Un AoA cercano a 0° no implica sustentación nula. Un perfil con curvatura (camber) puede generar sustentación a  $\text{AoA} = 0^\circ$ , debido a la distribución de presiones asociada a su forma y a la circulación inducida alrededor del perfil. Sin embargo, operar con AoA muy bajo modifica el equilibrio de fuerzas y la respuesta del ala: el margen de control por freno disminuye y la tolerancia a perturbaciones puede ser menor.

## **7. Alas inflables y colapsos frontales a AoA bajo**

En el parapente, el perfil es inflable (ram-air): la forma del borde de ataque y del intradós/extradós se mantiene mediante una combinación de presión interna, tensión de líneas y cargas aerodinámicas. A diferencia de un ala rígida, la estructura del borde de ataque no impone una geometría fija ante perturbaciones rápidas del flujo. Por ello, ante determinadas condiciones, el ala puede experimentar un colapso frontal (front tuck), caracterizado por un plegado temporal del borde de ataque.

Operar con AoA reducido (p. ej., con acelerador) no hace que el colapso frontal sea inevitable, pero sí reduce el margen frente a variaciones súbitas del viento relativo (turbulencia, rotor, rachas). Una perturbación puede inducir transitoriamente una incidencia muy baja o incluso negativa en el borde de ataque en alguna zona del ala, disminuyendo la presión interna local y facilitando el plegado. En un ala rígida, el fenómeno equivalente suele manifestarse como pérdida de sustentación y/o buffet por separación del flujo, pero no como colapso estructural del borde de ataque.

Implicación práctica: el AoA bajo incrementa la sensibilidad del ala en aire movido; por tanto, el uso de acelerador debe ser deliberado y coherente con las condiciones (especialmente cerca de sotaventos/rotor), manteniendo márgenes operativos conservadores.

## 8. Errores conceptuales frecuentes

- Confundir AoA con la inclinación del ala respecto al horizonte.
- Asumir un único “ángulo crítico” fijo e invariable: el valor depende de condiciones y del estado del perfil.
- Interpretar AoA = 0° como “sin sustentación”.
- Ignorar que el viento relativo depende del movimiento del ala respecto a la masa de aire (no del viento meteorológico).
- Concluir que los colapsos frontales son inevitables: son más probables a AoA bajo en aire movido, pero dependen de condiciones y gestión.

## 9. Ejercicios de verificación (autoevaluación)

### Ejercicio 1 — Definición

Defina AoA en una frase usando únicamente los términos: línea de cuerda y viento relativo.

### Ejercicio 2 — Identificación de referencia

Explique por qué el horizonte no es una referencia válida para medir AoA durante el vuelo.

### Ejercicio 3 — Mandos

Describa el efecto cualitativo de frenar y de acelerar sobre el AoA (dirección del cambio) y sobre la velocidad.

### Ejercicio 4 — Frente a turbulencia

Enumere dos razones por las que un ala inflable puede ser más susceptible a colapsos frontales a AoA bajo en aire movido, comparada con un ala rígida.

## 10. Checklist de aprendizaje

- Definir AoA como el ángulo entre cuerda y viento relativo.
- Distinguir viento relativo de viento meteorológico.
- Identificar el concepto de ángulo crítico y su relación con la pérdida.
- Relacionar frenos y acelerador con el aumento/disminución del AoA.

- Entender por qué AoA bajo no implica sustentación nula en perfiles con curvatura.
- Explicar por qué las alas inflables pueden colapsar frontalmente y por qué el AoA bajo reduce margen en aire movido.