

INTRODUÇÃO AO DESEMPENHO DE AERONAVES PARTE 07



Introdução ao Desempenho de Aeronaves - Prof. Dr. Rogério F. F. Coimbra

VÔO EM CURVA

No mvto curvilíneo o vetor velocidade da anv mantém seu módulo cte mas a direção e o sentido são alteradas

Assim, a anv está sujeita à aceleração centrípeta, cujo vetor é perpendicular a DV e sempre direcionado para o centro da curva

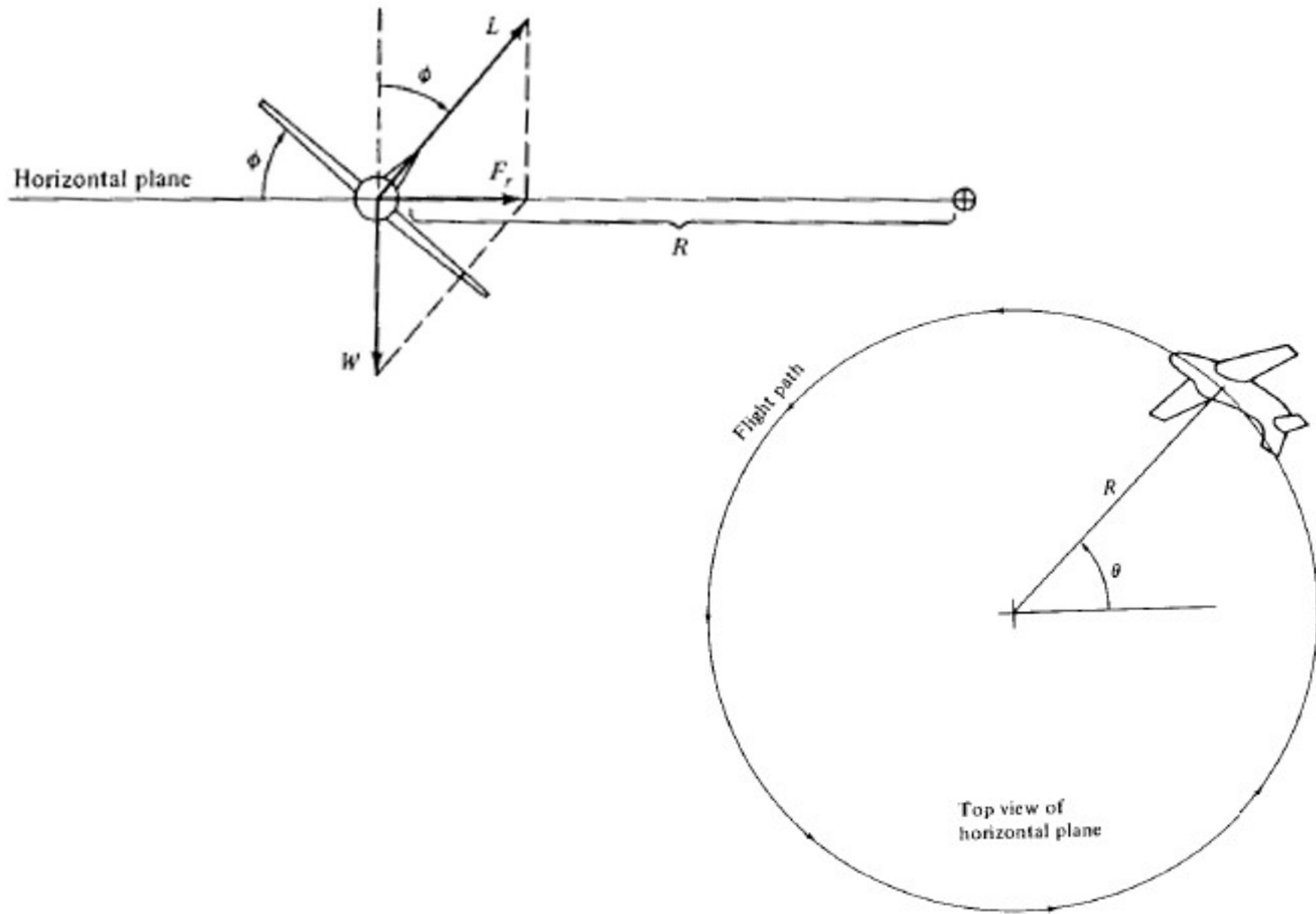
No vôo em curva, a anv é inclinada lateralmente (*bank angle* - Φ)

Portanto, o vetor sustentação (L) tb é inclinado em um ângulo Φ em relação a vertical

Assim, para que a anv efetue uma curva mantendo a altitude, tem-se

$$L \cdot \cos\Phi = W$$

VÔO EM CURVA



VÔO EM CURVA

No vôo em curva, a anv sofre a ação das forças L e W

A soma vetorial destas forças produz a resultante F_R , direcionado para o centro da curva e sentido horizontal, cujo módulo é

$$F_r = \sqrt{L^2 - W^2}$$

Onde F_R é a força centrípeta

Definindo fator de carga (n) como $n = L / W$

O fator de carga (n) é normalmente expresso em termos de “g’s”. Logo

$$F_r = W\sqrt{n^2 - 1}$$

VÔO EM CURVA

A avião percorre um círculo com vel. V_∞

Aplicando a acel. centrípeta (a_c) na 2ª Lei de Newton

$$F_R = m \cdot a_c \qquad a_c = V_\infty^2 / R$$

$$F_r = m \frac{V_\infty^2}{R} = \frac{W}{g} \frac{V_\infty^2}{R}$$

Combinando as eqs e resolvendo para R

$$R = \frac{V_\infty^2}{g \sqrt{n^2 - 1}}$$

Se $\omega = d\theta / dt = V_\infty / R$

$$\rightarrow \omega = \frac{g \sqrt{n^2 - 1}}{V_\infty}$$

VÔO EM CURVA

Para que uma anv apresente um ótimo desempenho em curva é necessário

- **curvar no menor raio (R) possível**
- **a vel. angular (ω) deve ser a maior possível**

Para que isso ocorra a anv deve manobrar

- **no maior fator de carga (n) possível**
- **na menor velocidade de vôo (V_{∞})**

Portanto, uma anv muito manobrável deve apresentar

- **alta rigidez estrutural**
- **elevado coeficiente de sustentação máximo ($C_{L\ MAX}$)**

PULL UP MANOEUVRE

A manobra “*pull up*” é o princípio de uma curva no plano vertical

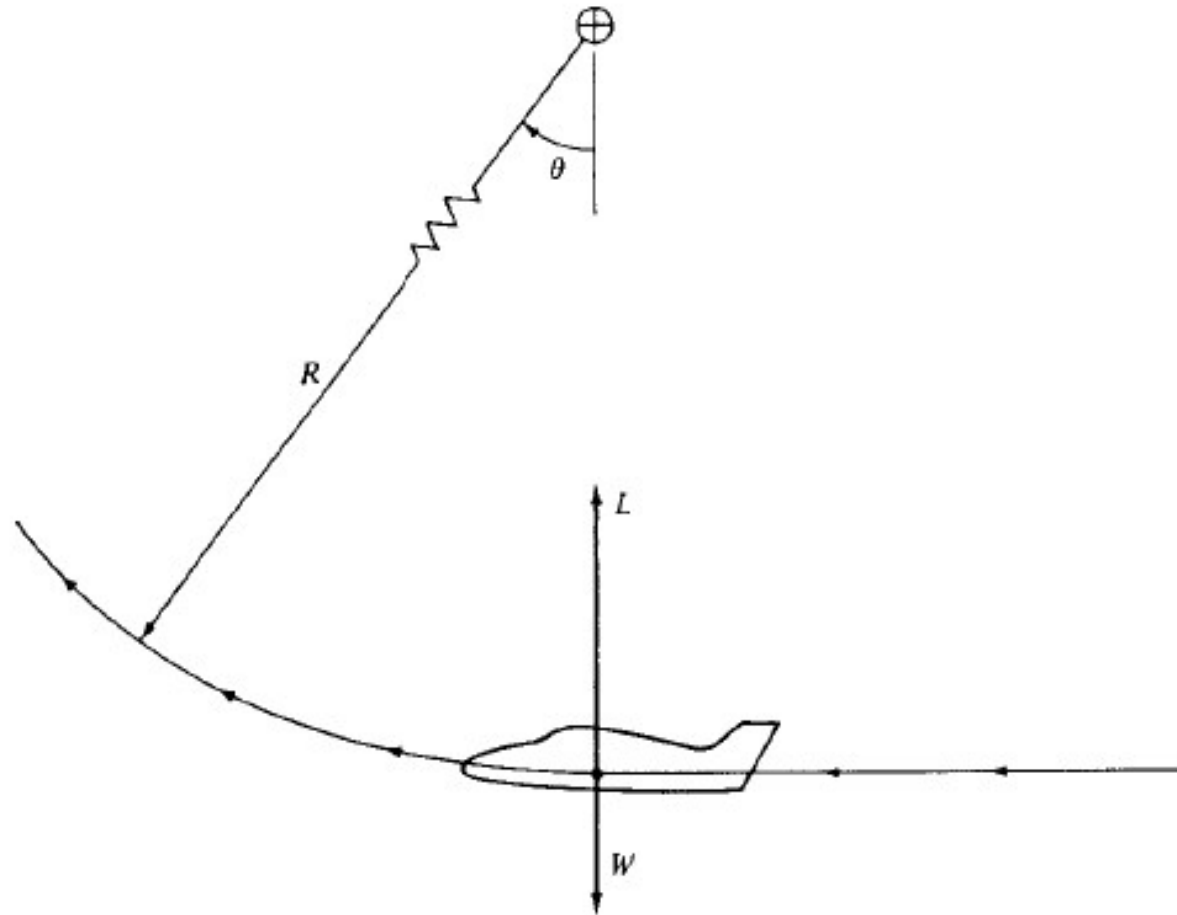
É muito utilizada em manobras de alto desempenho, em combate aéreo e em ensaios em vôo

Corresponde ao princípio da manobra acrobática conhecida como “*looping*”

A manobra inicia com a anv voando reto e nivelado ($L = W$)

Na seqüência, a anv experimenta um acréscimo súbito na sustentação ($L > W$) e inicia uma curva ascendente

PULL UP MANOEUVRE



PULL UP MANOEUVRE

Assim, a força resultante F_R é

$$F_r = L - W = W(n - 1)$$

Aplicando-se a 2ª Lei de Newton tem-se

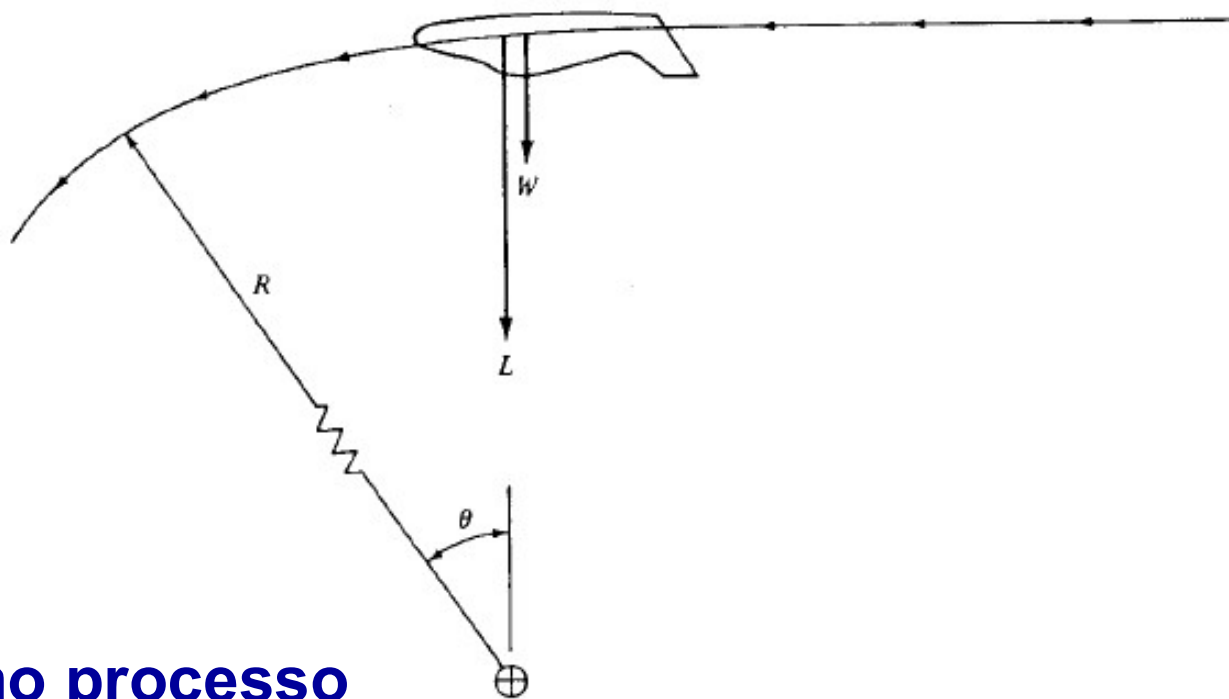
$$F_r = m \frac{V_\infty^2}{R} = \frac{W}{g} \frac{V_\infty^2}{R}$$

Combinando as duas eqs, lembrando que $\omega = V_\infty/R$ e resolvendo para R

$$R = \frac{V_\infty^2}{g(n - 1)} \qquad \omega = \frac{g(n - 1)}{V_\infty}$$

PULL DOWN MANOEUVRE

A avião em vôo invertido inicia uma curva descendente e, neste caso, L e W estão direcionados para baixo



Fazendo o mesmo processo

$$R = \frac{V_{\infty}^2}{g(n + 1)}$$

$$\omega = \frac{g(n + 1)}{V_{\infty}}$$

RAIO DE CURVATURA E RAZÃO DE CURVA

O raio de curvatura (R) e a razão de curva (ω) são muito importantes para o desempenho de anv de combate

Em um combate aéreo entre anv similares, as que curvarem no menor R e no maior ω vencerão o combate

Anv de combate são projetadas para operarem com elevado fator de carga (n), normalmente entre 3 e 10

Como 'n' é elevado

$$n + 1 \approx n$$

$$n - 1 \approx n$$

Portanto

$$R = \frac{V_{\infty}^2}{gn}$$

$$\omega = \frac{gn}{V_{\infty}}$$

RAIO DE CURVATURA E RAZÃO DE CURVA

Se

$$L = \frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S C_L$$
$$V_{\infty}^2 = \frac{2L}{\rho_{\infty} S C_L}$$

substituindo nas eqs anteriores

$$R = \frac{2L}{\rho_{\infty} S C_L g (L/W)} = \frac{2}{\rho_{\infty} C_L g} \frac{W}{S}$$

$$\omega = \frac{gn}{\sqrt{2L/\rho_{\infty} S C_L}}$$

$$= \frac{gn}{\sqrt{(2n/\rho_{\infty} C_L)(W/S)}} = g \sqrt{\frac{\rho_{\infty} C_L n}{2(W/S)}}$$

RAIO DE CURVATURA E RAZÃO DE CURVA

Para que uma anv possa curvar no menor raio possível (R_{MIN}) e na maior razão de curva (ω_{MAX}), esta deve apresentar

- ✓ os maiores n_{MAX} e $C_{L \text{ MAX}}$
- ✓ as menores carga alar (W/S_{MIN}) e altitude ($\rho_{\infty \text{ MAX}}$)

$$R_{\text{min}} = \frac{2}{\rho_{\infty} g C_{L, \text{max}}} \frac{W}{S}$$

$$\omega_{\text{max}} = g \sqrt{\frac{\rho_{\infty} C_{L, \text{max}} n_{\text{max}}}{2(W/S)}}$$

RAIO DE CURVATURA E RAZÃO DE CURVA

Em baixas velocidades $n_{\text{MAX}} = f(C_{L\text{ MAX}}, W/S, \rho_{\infty})$

Em altas velocidades n_{MAX} é limitado pelo próprio projeto estrutural da anv

Portanto

$$n = \frac{L}{W} = \frac{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2 SC_L}{W}$$

$$n_{\text{max}} = \frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2 \frac{C_{L,\text{max}}}{W/S}$$

DIAGRAMA V-n

O diagrama V-n representa a correlação entre o fator de carga (n), o $C_{L\text{ MAX}}$ e a velocidade de vôo (V_∞)

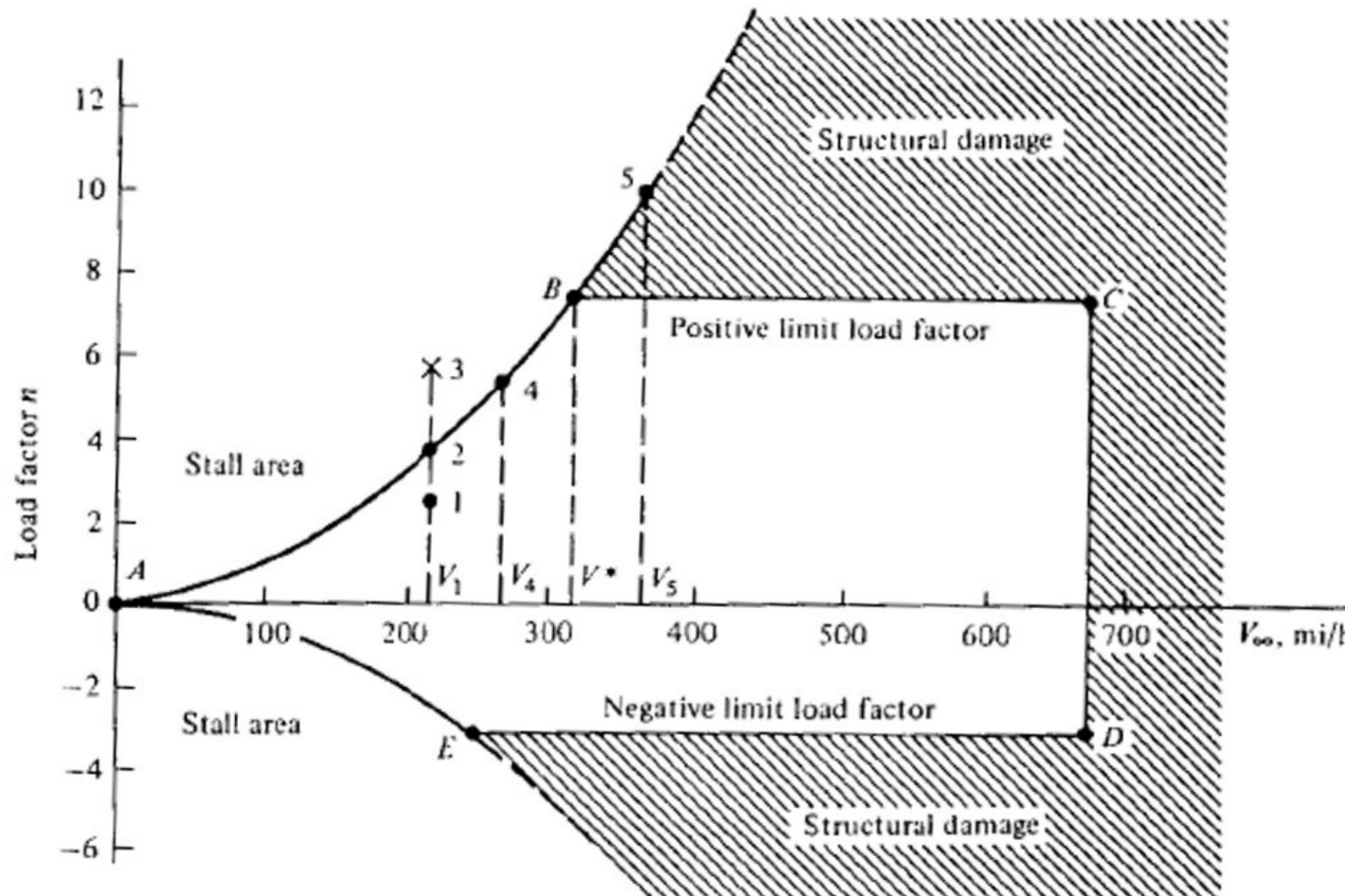


DIAGRAMA V-n

O diagrama V-n limita o envelope de vôo da anv, dividindo-o em três regiões distintas

- área limitada pelo estol ($C_{L \text{ MAX}}$)
- área limitada pelo fator de carga (n_{MAX})
- área limitada pela pressão dinâmica ($p_{D \text{ MAX}}$)

O ponto B é chamado '*ponto de manobra*'

Neste ponto a anv está na condição de alcançar o maior $C_{L \text{ MAX}}$ e o maior fator de carga e, portanto, está na condição de curvar no menor raio possível (R_{MIN}) e na maior razão de curva (ω_{MAX})

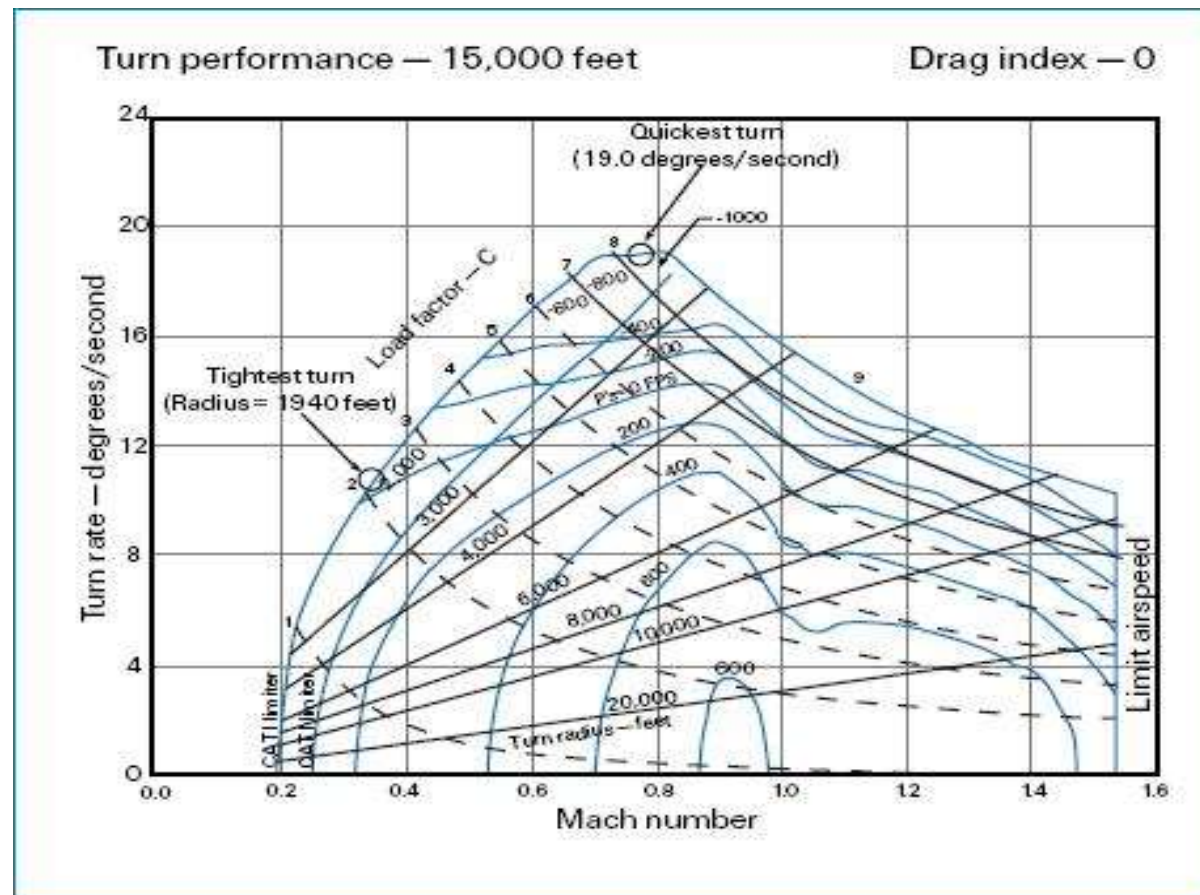
DIAGRAMA V-n

A velocidade do ponto B (V^*) é chamada “*corner speed*” e é a velocidade que todo o piloto de caça procura alcançar antes de engajar combate e a manter durante o combate

$$V^* = \sqrt{\frac{2n_{\max}}{\rho_{\infty}C_{L,\max}} \frac{W}{S}}$$

TURN PERFORMANCE

O desempenho em curva de uma avião de combate pode tb ser plotada em um gráfico específico que combina vel. angular (ω), n° de Mach (M) e fator de carga (n)



DÚVIDAS??



Introdução ao Desempenho de Aeronaves - Prof. Dr. Rogério F. F. Coimbra