Descolagem e Aterragem

Mecânica de Voo I – 7631
2º Ano da Licenciatura em Engenharia Aeronáutica

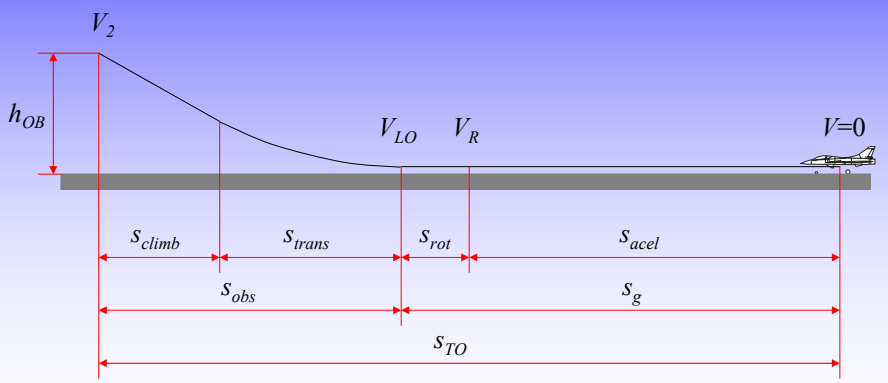
1. Descolagem (1)

A descolagem, para efeitos de análise, pode ser dividida em quatro fases:

- Aceleração no solo desde o repouso;
- Rotação para a atitude de descolagem;
- Transição desde a saida do solo até atingir o ângulo de subida;
- Subida inicial e passagem sobre a altura obstáculo.

Nas duas primeiras fases a aeronave encontra-se no solo enquanto que nas duas últimas ela já se encontra em voo.

1. Descolagem (2)



1. Descolagem (3)

Durante a aceleração a aeronave parte do repouso e acelera com uma atitude constante até atingir uma velocidade que é denominada de velocidade de rotação, V_R.

Ao atingir a velocidade de rotação, a aeronave tira a roda do nariz do chão de modo a tomar uma atitude com um ângulo de ataque que lhe permite ter um C_L suficiente para a sustentação ser maior que o peso e, consequentemente, elevar a aeronave no ar. Durante esta fase a aeronave acelera da velocidade de rotação para a velocidade de descolagem, V_{LO}. É uma fase muito rápida e, numa análise inicial, pode considerar-se que a velocidade de rotação e a velocidade de descolagem têm o mesmo valor.

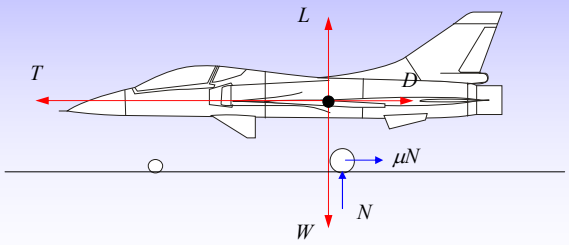
Já em voo, na fase de transição, a aeronave descreve um arco que lhe permite mudar da trajectória paralela à pista para uma trajectória de subida de modo a ultrapassar um obstáculo pré-determinado.

1. Descolagem (4)

A fase de subida para ultrapassar a altura obstáculo, cujo valor é de 35pés para as aeronaves comerciais FAR 25/JAR 25 e de 50pés para as aeronaves militares e aeronaves civis FAR 23/JAR 23, é a fase que se segue à fase de transição e é composta por um voo com trajectória rectilínea.

1.1. Fase de Aceleração (1)

Nesta fase da descolagem a aeronave parte do repouso e acelera até à velocidade de rotação. A velocidade de rotação é, neste estudo, considerada igual à velocidade de descolagem ("lift-off"). A distância percorrida para a aeronave atingir V_R é chamada distância de aceleração, s_{acel}. O tempo decorrido nesta fase é t_{acel}. Por forma a determinar a distância de aceleração faz-se um estudo das forças que actuam sobro o avião no solo.



1.1. Fase de Aceleração (2)

Essas forças são a tracção dos motores, T, a força de arrasto, D, a força de resistência de rolamento, μN, na direcção da velocidade e a sustentação, L, o peso, W, e a reacção do solo, N, na direcção perpendicular à velocidade do avião.

Aplicando a segunda lei de Newton tem-se:

Na direcção perpendicular ao movimento

$$0 = N + L - W \quad \Leftrightarrow \quad N = W - L$$

e na direcção do movimento

$$m\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = T - D - \mu N$$

Combinando estas duas equações tem-se

$$m\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = T - D - \mu(W - L)$$

1.1. Fase de Aceleração (3)

Notando que $m=W/g$ e que

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = V\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}s} = \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}V^2}{\mathrm{d}s}$$

obtém-se

$$\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}V^2}{\mathrm{d}s} = \frac{g[T - D - \mu(W - L)]}{W}$$

E, finalmente,

$$\mathrm{d}s = \frac{W\mathrm{d}V^2}{2g[T - D - \mu(W - L)]}$$

1.1.1. Distância de Aceleração (1)

A integração desta última equação, desde V=0 até V=V_{LO} , permite a obtenção da distância de aceleração. Considerando que o peso se mantém constante, a força F=[T-D-μ(W-L)], no entanto, varia continuamente durante a corrida devido à dependência de D e L na velocidade.
Numa análise preliminar pode considerar-se a força F como aproximadamente constante, calculando-a com o valor da velocidade a meio da distância de aceleração, o que correspnde a 0,707V_{LO}.
Assim,

$$\mathrm{d}s = \frac{W}{2g\overline{F}}\mathrm{d}V^2$$

E a distânica de aceleração fica

$$s_{acel} = \frac{W}{2g\overline{F}}\int_0^{V_{LO}^2}\mathrm{d}V^2 = \frac{WV_{LO}^2}{2g\overline{F}}$$

Tendo em conta que $\overline{F}$ é calculada em V=0,707V_{LO}.

1.1.1. Distância de Aceleração (2)

Do mesmo modo

$$s_{mid} = \frac{s_{acel}}{2} = \frac{W}{2g\overline{F}}\int_0^{V_{av}^2}\mathrm{d}V^2 = \frac{WV_{av}^2}{2g\overline{F}}$$

Destas duas relações tira-se que

$$V_{av} = \frac{V_{LO}}{\sqrt{2}}$$

Logo,

$$\overline{F} = \left[T - D - \mu(W - L)\right]_{0,707V_{LO}}$$

e

$$s_{acel} = \frac{WV_{LO}^2}{2g\left[T - D - \mu(W - L)\right]_{0,707V_{LO}}}$$

1.1.1. Distância de Aceleração (3)

O valor de V_{LO} é fixado em função da velocidade de perda e varia entre $1{,}1V_S$ e $1{,}3V_S$. No presente estudo assume-se que toma o valor de $1{,}2V_S$. Portanto,

$$V_{LO} = 1{,}2V_S = 1{,}2\sqrt{\frac{2W/S}{\rho C_{L\max}}}$$

O valor de C_{Lmax} corresponde à configuração da aeronave para a descolagem. O arrasto pode ser obtido através de

$$D = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{V_{LO}}{\sqrt{2}}\right)^2 S\left(C_{D0} + \Phi K C_L^2\right)$$

Convém notar que a velocidade para o cáclulo de D é a velocidade da aeronave a meio da distância de aceleração.

Departamento de Ciências Aeroespaciais - Universidade da Beira Interior
Mecânica de Voo I
Descolagem e Aterragem

1.1.1. Distância de Desaceleração (4)

O coeficiente de sustentação durante a corrida no solo é um valor que corresponde à atitude do avião na pista e que varia entre 0,3 e 0,8. O parâmetro Φ compensa a diminuição do arrasto induzido devido à proximidade entre a asa e o solo e é dado por

$$\Phi = \frac{(16h/b)^2}{1+(16h/b)^2}$$

onde h é a distância da asa ao solo e b é a envergadura da aeronave. Quando Φ for desconhecido deve usar-se o valor unitário para o mesmo, o que resulta numa distância de aceleração um pouco maior.
Tanto C_{D0} quanto K devem ser considerados com os flaps na configuração de descolagem e com o trem de aterragem em baixo.
O valor de L é obtido com

$$L = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{V_{LO}}{\sqrt{2}}\right)^2 S C_L$$

1.1.1. Distância de Aceleração (5)

com as mesmas observações sobre a velocidade e o valor do coeficiente de sustentação feitas para a corrida de aceleração na descolagem.
O valor de μ, na descolagem, varia conforme o tipo de solo como se pode ver na tabela abaixo.

superfície	μ sem travões	μ com travões
betão/asfalto (seco)	0,03-0,05	0,30-0,50
betão/asfalto (molhado)	0,05	0,15-0,30
betão/asfalto (com gelo)	0,02	0,06-0,10
turfa compacta	0,05	0,40
turfa batida	0,04	0,30
turfa macia	0,07	0,20
relva molhada	0,08	0,20

1.1.1. Distância de Aceleração (6)

O peso, W, é assumido constante.
A força propulsiva, T, deve ser representada de acordo com o tipo de motor:

- No turbojacto a tracção é considerada constante durante a aceleração, normalmente com o valor da tracção máxima;

- No motor a hélice a tracção varia com a velocidade de acordo com a relação $T=\eta_p P_e/V$ onde P_e é constante. A eficiência propulsiva deve assumir um valor que seja representativo do desempenho na velocidade de descolagem. Este aspecto é importante pois a eficiência da hélice varia com a velocidade quando esta assume valores baixos. Valores típicos são η_p=0,65 para 0<V_{LO}<30m/s, η_p=0,75 para 30m/s<V_{LO}<60m/s, η_p=0,80 a η_p=0,85 para 60m/s<V_{LO}. Para ter em conta algumas incertezas do sistema propulsivo a hélice é comum calcular a tracção para $V=V_{LO}$, logo

$$T = \frac{\eta_p P_e}{V_{LO}}$$

1.1.2. Tempo de Aceleração

Pode obter-se o tempo de desaceleração por meio da segunda lei de Newton

$$F = \frac{W}{g}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \quad \Leftrightarrow \quad \mathrm{d}t = \frac{W}{gF}\mathrm{d}V$$

Considerando F constante e com o mesmo valor da força usada na expressão da distância de aceleração, temos, após integração da equação diferencial

$$t_{acel} = \frac{W}{g\overline{F}}V_{LO} = \frac{2}{V_{LO}}\frac{WV_{LO}^2}{2g\overline{F}} = \frac{2}{V_{LO}}s_{acel}$$

o que resulta em

$$t_{acel} = \frac{2s_{acel}}{V_{LO}} = \frac{WV_{LO}}{g\left[T - D - \mu(W - L)\right]_{0,707V_{LO}}}$$

1.1.3. Cometário sobre a Aceleração (1)

Em resumo, a expressão para a distância de aceleração de um avião a jacto é representada por

$$s_{acel} = \frac{WV_{LO}^2}{2g\left[T - D - \mu(W - L)\right]_{0,707V_{LO}}}$$

Ou, após algumas substituições, na forma seguinte que mostra claramente a influência dos parâmetros W/S e T/W na distância de aceleração. Carga alar elevada, desejável para o voo de cruzeiro, é prejudicial para a distância de aceleração. Uma tracção por unidade de peso elevada é boa para reduzir s_{acel}. Outra observação importante diz respeito à altitude e à temperatura da pista, representada pela densidade do ar, ρ. A densidade influencia negativamente a distância de aceleração e a tracção.

$$s_{acel} = \frac{1{,}44W/S}{g\rho C_{L\max}\left\{T/W - \left[D/W + \mu\left(1 - L/W\right)\right]_{0,707V_{LO}}\right\}}$$

1.1.3. Cometário sobre a Aceleração (2)

De um modo aproximado, desprezando os termos do arrasto aerodinâmico e da força de fricção de rolamento, a distância de aceleração pode ainda ser expressa pela expressão aproximada como

$$s_{acel} \cong \frac{1{,}44\,W/S}{g\rho C_{L\max}(T/W)}$$

Esta aproximação dá um erro de 15% a 20% por defeito. O erro diminui à medida que o parâmetro T/W se torna maior.
Para uma avião a hélice, a expressão completa da distância de aceleração é

$$s_{acel} = \frac{1{,}44\,W/S}{g\rho C_{L\max}\left\{(\eta_p/V_{LO})P_e/W - [D/W + \mu(1-L/W)]_{0{,}707V_{LO}}\right\}}$$

ou numa forma aproximada

$$s_{acel} = \frac{\sqrt{2}(1{,}2)^3(W/S)^{1{,}5}}{g\sigma\eta_p(\rho C_{L\max})^{1{,}5}(P_e/W)}$$

1.1.3. Cometário sobre a Aceleração (3)

Nesta expressão pode notar-se o aumento da influência da carga alar e da altitude/temperatura na distância de aceleração de uma aeronave a hélice.

1.2. Fase de Rotação

Quando a aeronave atinge a velocidade de rotação, V_R, que numa abordagem preliminar pode ser considerada igual à velocidade de descolagem, V_{LO}, a aeronave está ainda no solo pois, apesar de a sua velocidade ser maior do que a velocidade de perda, o coeficiente de sustentação é baixo devido à atitude do avião no chão. Por isso é necessário rodar o avião de modo a aumentar o ângulo de ataque, o que acontece muito rapidamente. É, normalmente, aceite para efeitos de análise que a rotação, para aeronaves grandes, se faz num tempo de 3s e considera-se, também, que a velocidade neste período permanece constante. Assim,

$$t_{rot} = 3s$$

e

$$s_{rot} = V_{LO} t_{rot}$$

1.3. Corrida no Solo

A corrida no solo compreende as duas primeiras fases da descolagem, a aceleração e a rotação. Desta forma, a distância no solo é dada por

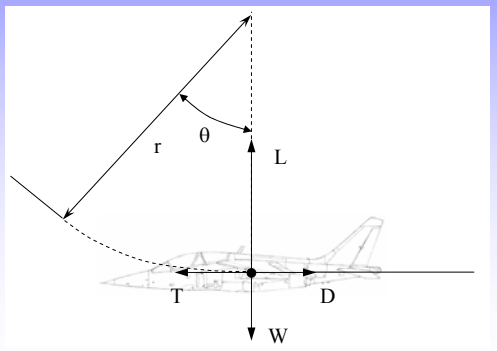
$$s_g = s_{acel} + s_{rot}$$

e o tempo correspondente é

$$t_g = t_{acel} + t_{rot}$$

1.4. Transição e Subida (1)

Como mencionado anteriormente, na fase de transição a aeronave já está em voo e irá descrever um arco de curva no plano vertical que lhe permite mudar da trajectória paralela à pista, que seguia durante a corrida no solo, para uma trajectória recta de subida que permitirá a ultrapassagem do obstáculo pré-determinado.



1.4. Transição e Subida (2)

A seguinte equação aplica-se, de forma aproximada, à curva

$$L - W = \frac{mV^2}{r} = \frac{WV^2}{gr}$$

Considerando a velocidade na trajectória curvilínea igual à velocidade de descolagem, embora a aeronave esteja em aceleração e a velocidade já seja um pouco mais elevada, e notando que $n=L/W$, a equação pode ser reescrita como

$$r = \frac{V_{LO}^2}{g(n-1)}$$

O valor de n adequado para esta fase do voo situa-se entre 1,15 e 1,2. A altura em que a curva é terminada depende do ângulo θ descrito durante a transição e é dada por

$$r - r\cos\theta = h$$

1.4. Transição e Subida (3)

As aeronaves mais modernas, devido à sua relação T/W elevada, ultrapassam a altura do obstáculo ainda na fase de transição o que, teoricamente, torna desnecessária a fase de subida em trajectória rectilínea. Quando na expressão da altura substituímos h pela altura do obstáculo fictício a ser ultrapassado na descolagem, h_{OB}, então

$$r - r\cos\theta_{OB} = h_{OB}$$

e

$$\theta_{OB} = \arccos\left(\frac{r - h_{OB}}{r}\right)$$

A altura do obstáculo é estabelecida de acordo com as normas. Para aeronaves militares e aeronaves civis que se regem pela FAR 23 ou JAR 23, a altura obstáculo é de 50pés e para aeronaves civis comerciais regidas pela FAR 25 ou JAR 25 a altura obstáculo é de 35pés.

1.4. Transição e Subida (4)

Se, para uma aeronave com motor turbojacto

$$\theta_{OB} \le 0{,}9\arcsin\left(\frac{T}{W} - \frac{1}{E_{LO}}\right)$$

ou, para uma aeronave com motor com hélice

$$\theta_{OB} \le 0{,}9\arcsin\left(\frac{\eta_p P_e}{W V_{LO}} - \frac{1}{E_{LO}}\right)$$

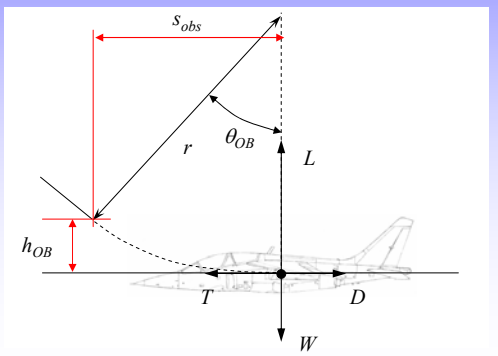
a fase de transição absorve a fase de subida para ultrapassar o obstáculo e a descolagem fica, assim, terminada. Neste caso, a fase de transição é igual à fase de subida na trajectória rectilínea e a projecção no solo da distância percorrida é dada por

$$s_{trans} = s_{obs} = r\sin\theta_{OB}$$

1.4. Transição e Subida (5)

Considerando a velocidade constante e igual a V_{LO}, o tempo no ar pode ser determinado por

$$t_{trans} = t_{obs} = \frac{\theta_{OB}}{\dot{\theta}} = \frac{r\theta_{OB}}{r\dot{\theta}} = \frac{r\theta_{OB}}{V_{LO}}$$



1.4. Transição e Subida (6)

No entanto, se o valor do ângulo acima obtido não puder ser atingido pela aeronave devido ao seu desempenho, isto é:
Se, para uma aeronave com motor turbojacto

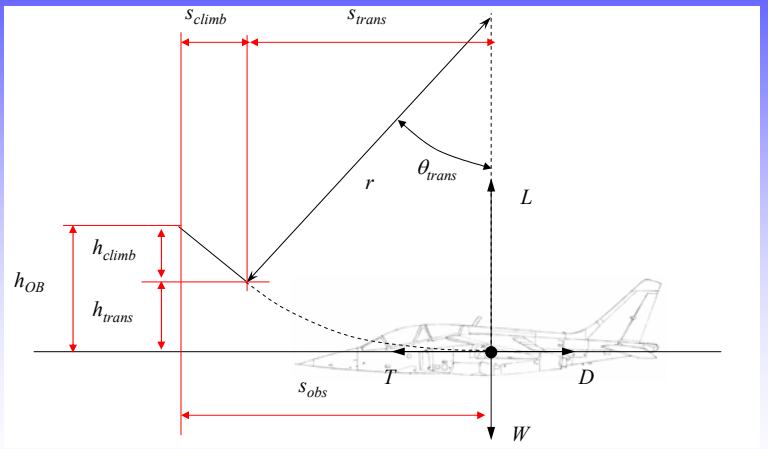
$$\theta_{OB} > 0{,}9 \arcsin\left(\frac{T}{W} - \frac{1}{E_{LO}}\right)$$

ou, para uma aeronave com motor com hélice

$$\theta_{OB} > 0{,}9 \arcsin\left(\frac{\eta_p P_e}{W V_{LO}} - \frac{1}{E_{LO}}\right)$$

a altura obstáculo não é atingida durante a fase de transição e há necessidade da existência da trajectória recta em subida, conforme mostrado na figura seguinte.

1.4. Transição e Subida (7)



1.4. Transição e Subida (8)

Neste caso, deve, então, usar-se:
Para uma aeronave com motor turbojacto

$$\theta_{trans} = 0{,}9 \arcsin\left(\frac{T}{W} - \frac{1}{E_{LO}}\right)$$

e para uma aeronave com motor com hélice

$$\theta_{trans} = 0{,}9 \arcsin\left(\frac{\eta_p P_e}{W V_{LO}} - \frac{1}{E_{LO}}\right)$$

A distância de transição é dada por

$$s_{trans} = r \sin\theta_{trans}$$

A distância da subida para ultrapassar o obstáculo é

$$s_{climb} = \frac{h_{obs} - h_{trans}}{\tan\theta_{trans}} = \frac{h_{obs} - r(1 - \cos\theta_{trans})}{\tan\theta_{trans}}$$

1.4. Transição e Subida (9)

Assim, a distância no solo da trajectória no ar é dada por

$$s_{obs} = s_{trans} + s_{c\lim b} = r\sin\theta_{trans} + \frac{h_{obs} - r(1-\cos\theta_{trans})}{\tan\theta_{trans}}$$

e o tempo respectivo, considerando a velocidade constante e igual a V_{LO}, é

$$t_{obs} = t_{trans} + t_{c\lim b} = \frac{r\theta_{trans}}{V_{LO}} + \frac{s_{c\lim b}}{V_{LO}\sin\theta_{trans}}$$

ou

$$t_{obs} = t_{trans} + t_{c\lim b} = \frac{r\theta_{trans}}{V_{LO}} + \frac{h_{obs} - r(1-\cos\theta_{trans})}{V_{LO}\sin\theta_{trans}}$$

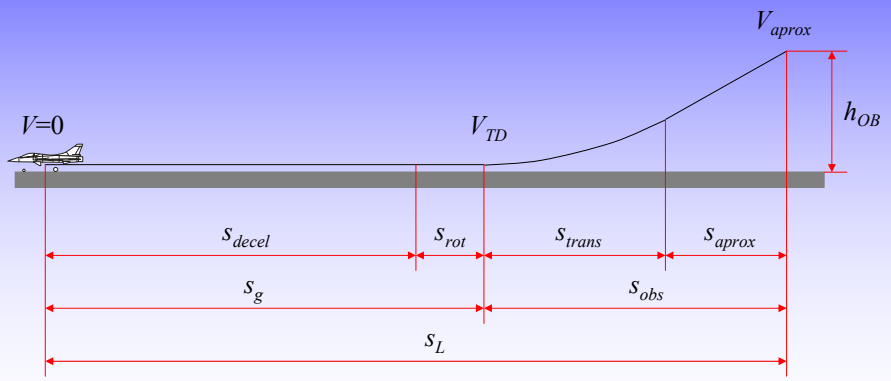
2. Aterragem (1)

Do mesmo modo que a descolagem, a aterragem da aeronave, para efeitos de análise, pode ser dividida em quatro fases:

- Aproximação após passagem sobre o obstáculo;
- Transição;
- Toque no chão e rotação;
- Desaceleração até ao repouso.

Nas duas primeiras fases a aeronave encontra-se em voo, enquanto que nas duas últimas ela já se encontra no solo.

2. Aterragem (2)



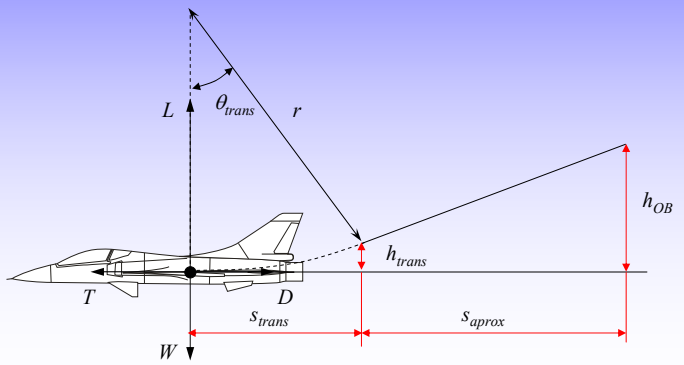
2. Aterragem (3)

A fase de aproximação, logo após a altura obstáculo cujo valor é de 50pés, é a fase em que a aeronave se aproxima do solo numa trajectória rectilínea e mantém uma velocidade designada de velocidade de aproximação, V_{aprox}, que tem um valor maior do que a velocidade de perda (normalmente $1{,}3V_S$).
Na fase de transição a aeronave percorre um arco de curva que lhe permite mudar da trajectória de aproximação para uma trajectória paralela à pista e, desse modo, encostar as rodas no solo ("touch down"). Normalmente, a aeronave diminui a sua velocidade na fase de transição e toca no solo com V=$1{,}15V_S$. Contudo, para efeitos de cálculo, será considerada como velocidade de toque o mesmo valor usado na aproximação, $1{,}3V_S$.
Ao tocar no solo a aeronave muda o ângulo de atitude de arfagem de forma a encostar a roda de nariz no chão. É uma fase muito rápida e, numa análise inicial, considera-se que a velocidade no final da rotação tem ainda o mesmo valor da velocidade de toque, V_{TD}.
A fase de desaceleração é aquela em que a aeronave diminui a sua velocidade até parar completamente.

2.1. Fase de Aproximação (1)

Na fase de aproximação para a aterragem, conforme a figura abaixo, a distância de aproximação é dada por

$$s_{aprox} = \frac{h_{OB} - h_{trans}}{\tan\theta_{trans}}$$



Departamento de Ciências Aeroespaciais - Universidade da Beira Interior

Mecânica de Voo I

Descolagem e Aterragem

2.1. Fase de Aproximação (2)

A altura de transição é obtida através da relação

$$h_{trans} = r(1-\cos\theta_{trans})$$

o que resulta para a distância de aproximação em

$$s_{aprox} = \frac{h_{OB} - h_{trans}}{\tan\theta_{trans}} = \frac{h_{OB} - r(1-\cos\theta_{trans})}{\tan\theta_{trans}}$$

A altura obstáculo, h_{OB}, é 50 pés e o ângulo de transição, θ_{trans}, é igual ao ângulo de aproximação e toma o valor típico de 3º. O raio de curvatura na fase de transição é dado por

$$r = \frac{V_{aprox}^2}{g(n-1)}$$

com o factor de carga normal, n, assumindo um valor entre 1,1 e 1,2.
O tempo da fase de aproximação fica

$$t_{aprox} = \frac{s_{aprox}}{V_{aprox}\sin\theta_{trans}}$$

Pedro V. Gamboa - 2008

2.2. Fase de Transição

A distância percorrida no solo na fase de transição é, a partir da figura anterior,

$$s_{trans} = r \sin \theta_{trans}$$

e o tempo gasto nesta fase é dado por

$$t_{trans} = \frac{r\theta_{trans}}{V_{aprox}}$$

não esquecendo que V_{aprox}=1,3V_S.

2.3. Fase Aérea da Aterragem

A distância no solo correspondente à fase da aterragem que ocorre quando a aeronave se encontra em voo, entre o obstáculo e o toque na pista, é a soma das distâncias de aproximação e de transição

$$s_{obs} = s_{aprox} + s_{trans}$$

com o tempo correspondente

$$t_{obs} = t_{aprox} + t_{trans}$$

2.4. Fase de Rotação

Quando a aeronave toca no solo, é necessário baixar a roda do nariz para iniciar a travagem e a fase de desaceleração. Considera-se que o tempo necessário para fazer esta manobra seja de 3s, para os aviões maiores, e que a velocidade com que o avião tocou no solo permace constante. Desta forma

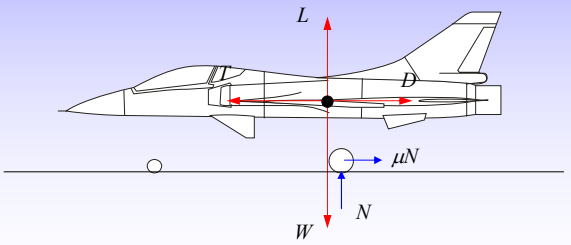
$$t_{rot} = 3s$$

e

$$s_{rot} = V_{TD} t_{rot}$$

2.5. Fase de Desaceleração (1)

A distância percorrida pela aeronave após a rotação até atingir o repouso é chamada distância de desaceleração e é representada por s_{decel}, e o tempo correspondente é representado por t_{decel}. De modo a determinar a distância de desaceleração faz-se a análise das forças que actuam sobre o avião no solo durante esta fase e procede-se de forma idêntica ao que foi feito no caso da corrida de aceleração da descolagem.



2.5. Fase de Desaceleração (2)

Essas forças são a tracção, T, com um valor muito reduzido, a força de arrasto, D, a força de resistência de rolamento, μN, na direcção da velocidade e a sustentação, L, o peso, W, e a reacção do solo, N, na direcção perpendicular à velocidade.
Aplicando a segunda lei de Newton tem-se:
Na direcção perpendicular ao movimento

$$0 = N + L - W \quad \Leftrightarrow \quad N = W - L$$

e na direcção do movimento

$$m\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = T - D - \mu N$$

Combinando estas duas equações tem-se

$$m\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = T - D - \mu(W - L)$$

2.5. Fase de Desaceleração (3)

Notando que $m=W/g$ e que $\mathrm{d}V/\mathrm{d}t=0{,}5\mathrm{d}V^2/\mathrm{d}s$, obtém-se

$$\mathrm{d}s = \frac{W\mathrm{d}V^2}{2g[T - D - \mu(W - L)]}$$

2.5.1. Distância de Desaceleração (1)

A integração desta última equação, desde $V=V_{TD}$ até $V=0$, permite a obtenção da distância de desaceleração. Considerando que o peso se mantém constante, a força $F=[T-D-\mu(W-L)]$, no entanto, varia continuamente durante a corrida devido à dependência de D e L na velocidade.
Numa análise preliminar pode considerar-se a força F como aproximadamente constante, calculando-a com o valor da velocidade do meio da distância de desaceleração, o que correspnde a $0{,}707V_{TD}$.
Assim,

$$\mathrm{d}s = \frac{W}{2g\overline{F}}\mathrm{d}V^2$$

E a distânica de desaceleração fica

$$s_{decel} = \frac{W}{2g\overline{F}}\int_{V_{TD}^2}^{0}\mathrm{d}V^2 = -\frac{WV_{TD}^2}{2g\overline{F}}$$

Tendo em conta que $\overline{F}$ é calculada em $V=0{,}707V_{TD}$.

2.5.1. Distância de Desaceleração (2)

Logo

$$s_{decel} = -\frac{WV_{TD}^2}{2g[T-D-\mu(W-L)]_{0,707V_{TD}}} = \frac{WV_{TD}^2}{2g[-T+D+\mu(W-L)]_{0,707V_{TD}}}$$

O valor de V_{TD}, como anteriormente referido, é fixado em função da velocidade de perda e no presente estudo assume-se que toma o valor de $1{,}3V_S$. Portanto,

$$V_{TD} = 1{,}3V_S = 1{,}3\sqrt{\frac{2W/S}{\rho C_{L\max}}}$$

O valor de C_{Lmax} corresponde à configuração da aeronave para a aterragem. O arrasto pode ser obtido através de

$$D = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{V_{TD}}{\sqrt{2}}\right)^2 S\left(C_{D0}+\Phi KC_L^2\right)$$

Convém notar que a velocidade para o cáclulo de D é a velocidade da aeronave a meio da distância de desaceleração.

2.5.1. Distância de Desaceleração (3)

O coeficiente de sustentação durante a corrida no solo, como na descolagem, é um valor que corresponde à atitude do avião na pista e que varia entre 0,3 e 1,0. O parâmetro Φ compensa a diminuição do arrasto induzido devido à proximidade entre a asa e o solo e, como já referido na descolagem, é dado por

$$\Phi = \frac{(16h/b)^2}{1+(16h/b)^2}$$

onde h é a distância da asa ao solo e b é a envergadura da aeronave. Quando Φ for desconhecido deve usar-se o valor unitário para o mesmo, o que resulta numa distância de desaceleração um pouco menor.
Tanto C_{D0} quanto K devem ser considerados com os flaps na configuração de aterragem e com o trem de aterragem em baixo.
O valor de L é obtido com

$$L = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{V_{TD}}{\sqrt{2}}\right)^2 SC_L$$

2.5.1. Distância de Desaceleração (4)

com as mesmas observações sobre a velocidade e o valor do coeficiente de sustentação feitas para a corrida de aceleração na descolagem.
O valor de μ, na aterragem, tem em consideração o uso de travões e varia conforme o tipo de solo como se pode ver na tabela abaixo.

superfície	μ sem travões	μ com travões
betão/asfalto (seco)	0,03-0,05	0,30-0,50
betão/asfalto (molhado)	0,05	0,15-0,30
betão/asfalto (com gelo)	0,02	0,06-0,10
turfa compacta	0,05	0,40
turfa batida	0,04	0,30
turfa macia	0,07	0,20
relva molhada	0,08	0,20

2.5.1. Distância de Desaceleração (5)

O peso, W, é assumido constante.
A força propulsiva, T, deve ser representada de acordo com o tipo de motor:

- No turbojacto a tracção é considerada constante durante a desaceleração, normalmente com um valor de 0,2 da tracção máxima. No entanto, alguns aviões têm reversão de tracção e, nesse caso, deve considerar-se tracção negativa na equação da desaceleração;

- No motor a hélice a tracção varia com a velocidade de acordo com a relação $T=\eta_p P_e/V$ onde P_e é constante. No entanto, devido ao efeito da hélice na aterragem é comum considerar $T=0$ mesmo que o motor esteja a funcionar em marcha lenta. Se a aeronave tiver condições para usar passo negativo, deve estimar-se o valor de reversão de tracção para usar na desaceleração.

2.5.2. Tempo de Desaceleração

Pode obter-se o tempo de desaceleração por meio da segunda lei de Newton

$$F = \frac{W}{g}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \quad \Leftrightarrow \quad \mathrm{d}t = \frac{W}{gF}\mathrm{d}V$$

Considerando F constante e com o mesmo valor da força usada na expressão da distância de desaceleração, temos, após integração da equação diferencial

$$t_{decel} = -\frac{W}{g\bar{F}}V_{TD} = -\frac{2}{V_{TD}}\frac{WV_{TD}^2}{2g\bar{F}} = \frac{2}{V_{TD}}s_{decel}$$

o que resulta em

$$t_{decel} = \frac{2s_{decel}}{V_{TD}} = \frac{WV_{TD}}{g\left[-T+D+\mu(W-L)\right]_{0,707V_{TD}}}$$

2.5.3. Cometário sobre a Desaceleração

Em resumo, a expressão para a distância de desaceleração é representada por

$$s_{decel} = \frac{WV_{TD}^2}{2g\left[-T + D + \mu(W - L)\right]_{0,707V_{TD}}}$$

Uma análise aproximada, tanto para o avião a jacto como para o avião a hélice, pode ser obtida se, em ambos os casos, a tracção e a sustentação forem consideradas nulas. Algumas asas usam spoilers para aumentar o arrasto e destruir a sustentação ajudando, desta forma, na desaceleração. Assim,

$$s_{decel} = \frac{WV_{TD}^2}{2g\left(D + \mu W\right)_{0,707V_{TD}}}$$

2.6. Corrida no Solo

A corrida no solo durante a aterragem abrange as fases de rotação e de desaceleração. Desta forma, pode calcular-se a distância no solo, s_g, por da seguinte forma

$$s_g = s_{decel} + s_{rot}$$

com o tempo correspondente

$$t_g = t_{decel} + t_{rot}$$