

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES - STT

**Composição de Peso e
Desempenho em Cruzeiro de Aviões**

Prof. Manoel Henrique Alba Sória

2006

1 COMPONENTES DO PESO BRUTO

O peso bruto de uma aeronave em qualquer situação é composto de apenas três parcelas, a saber:

$$\text{Peso bruto} = \text{peso básico operacional} + \text{combustível} + \text{carga paga}$$

Esses pesos são assim definidos:

1. **Peso básico operacional:** é o peso do avião pronto para operar, excluindo-se a carga paga e o combustível utilizável. O peso básico operacional inclui estruturas, assentos, equipamentos diversos, tripulação, copas, enfim, tudo que não seja combustível utilizável e carga paga. Não é exatamente constante para as aeronaves do mesmo modelo, mas sim depende de sua configuração particular.
2. **Carga paga:** toda a carga transportada que produz receita. Compõe-se de passageiros, bagagem, correio e carga.
3. **Combustível total:** compreende o combustível de bloco mais as reservas. O combustível de bloco é o queimado desde que o avião deixa a posição na rampa, no aeroporto de origem, até que vem a parar em sua posição no aeroporto de destino.

O combustível de reserva inclui:

- i. 10 % do combustível a se consumir na viagem, para cobrir eventuais diferenças de consumo durante o voo;
- ii. Combustível para voo até o aeroporto alternativa;
- iii. Combustível para espera, para pelo menos 30 minutos de voo sobre o aeroporto a 450 m de altitude ou de acordo com outro regulamento aplicável.

A Tabela 1 apresenta valores típicos das parcelas que compõem o peso bruto de um avião no momento da decolagem.

Tabela 1. Composições de peso típicas de aviões de transporte.

	Porcentagem do Peso de Decolagem			
	Peso Operacional Vazio	Carga Paga	Combustível Viagem	Combustível Reserva
Etapas Curtas	63	26	7	4
Etapas Médias	55	22	19	4
Etapas Longas	47	14	33	6

2 LIMITES DE PESOS E VOLUMES

Para a operação das aeronaves e conseqüentemente para o projeto de aeroportos são definidos alguns limites de pesos e volumes, impostos por razões estruturais e operacionais.

a) Limites estruturais

Peso máximo de zero combustível: é o peso máximo que pode ter uma aeronave carregada, porém sem combustível.

Ou seja, é o peso básico operacional mais a carga paga. Acima desse limite o avião só poderá ser carregado com combustível, que vai nos tanques localizados nas asas, de modo que o momento fletor na raiz das asas mantenha-se dentro dos limites admissíveis. Ressalta-se que a carga paga vai na fuselagem e contribui para o momento fletor, enquanto que o combustível, salvo raras exceções, vai nas asas, pouco contribuindo para esse momento. A Figura 1 representa esquematicamente a distribuição de esforços verticais nas asas.

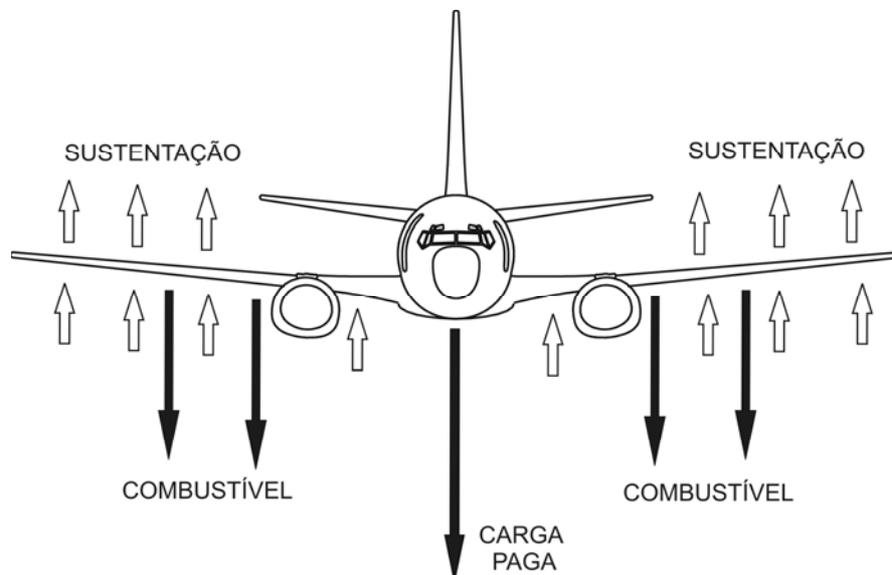


Figura 1. Esquema de distribuição das forças de sustentação, carga paga e combustível no avião em voo.

Carga paga máxima estrutural: é o máximo peso que pode ter a carga paga, seja ela passageiro, carga, correio ou combinação desses itens. Teoricamente a carga paga máxima estrutural é a diferença entre o peso zero combustível e o peso básico operacional. Na realidade a carga máxima que se leva pode ser menor que o máximo estrutural por razões de espaço, especialmente nos aviões de passageiros onde os assentos e outros itens ocupam espaço considerável.

Peso máximo estrutural de decolagem: é o peso máximo com o qual a aeronave pode decolar (supondo-se que não exista limitante operacional). Esse limite existe, evidentemente, por razões estruturais.

Peso máximo estrutural de pouso: é o peso máximo com o qual a aeronave pode pousar (supondo-se que não exista limitante operacional). Normalmente o trem principal e outras estruturas são dimensionadas para um peso de pouso menor que o máximo de decolagem, uma

vez que o avião chega no aeroporto de destino, onde irá pousar, aliviado do peso do combustível que queimou durante a viagem. Se a viagem for longa, esse peso pode de ser considerável. Como no caso de um Boeing 747, que em um vôo de 5500 milhas náuticas (Rio-Frankfurt, por exemplo), consome cerca de 100 toneladas de combustível. Não seria portanto justificável que se projetassem as estruturas para pousar com o peso máximo estrutural de decolagem, uma vez que muito raramente o avião é obrigado a pousar logo após ter decolado. Se por alguma razão for necessário pousar logo após a decolagem, o piloto deve alijar o combustível em uma área reservada para isso, e assim, aliviado desse peso, poderá pousar.

No caso de aviões destinados aos vôos de curta distância, que entre a decolagem e o pouso consomem pouco combustível, o trem de pouso principal é previsto para suportar no pouso, um peso próximo do máximo de decolagem. No Boeing 737, por exemplo, a diferença entre o peso máximo estrutural de decolagem e o de pouso é da ordem de 10.000 lb, ou seja, 4.500 kgf. Um avião do mesmo porte do 737 para longas distâncias, como da ordem de 4.500 milhas náuticas, teria uma diferença entre peso máximo estrutural de decolagem e de pouso da ordem de 50.000 lb = 23.000 kgf. Nos aviões mais leves e destinados a etapas curtas, para 20 a 40 passageiros, como o Bandeirante, Brasília e Fokker F-27, o peso máximo estrutural de pouso é muito próximo ao de decolagem.

Peso máximo estrutural de rampa ou de táxi: é o máximo peso com o qual a aeronave poderá iniciar o táxi, ou seja, sair dos calços para dirigir-se até a cabeceira da pista. É sempre ligeiramente maior que o máximo estrutural de decolagem. A diferença corresponde ao peso de combustível que é queimado até o avião atingir a cabeceira da pista, situação em que deverá ter no máximo o peso máximo estrutural de decolagem.

Capacidade máxima dos tanques: é o máximo volume de combustível que o avião admite. O próprio fabricante pode oferecer possibilidade de instalação de tanques opcionais que aumentem a capacidade total.

b) Limites operacionais

Peso máximo de decolagem: sempre menor ou igual ao máximo estrutural de decolagem, é um limite operacional imposto por pelo menos uma das seguintes condições: comprimento e declividade de pista disponível, temperatura, pressão, vento na pista, pneus, condições de subida, condições de frenagem e outras que serão analisadas no item relativo ao desempenho na decolagem.

Peso máximo de pouso: Analogamente, o peso máximo de pouso é sempre menor ou igual ao máximo estrutural de pouso. É um limite operacional imposto pelas condições reinantes na ocasião do pouso, principalmente o comprimento, a declividade longitudinal e o estado da superfície da pista.

Todos os pesos máximos estruturais são fixados pelo fabricante que projetou, construiu e ensaiou a aeronave de modo a suportar os esforços a que são submetidas as estruturas, dentro de determinados padrões de segurança impostos pelas entidades regulamentadoras. Analogamente, o desempenho da aeronave é objeto de projeto e é medido em ensaios em vôos, segundo regulamentos emitidos pelas entidades regulamentadoras. As aeronaves são portanto homologadas para operar dentro dos limites fixados.

A seguir são apresentadas as definições dos "pesos" conforme aparecem nos manuais do tipo "Airport Planning" das aeronaves, vertidos para o português.

Peso Máximo de Táxi (PMT)

Máximo peso para manobras no solo, limitado pela resistência da aeronave (inclui combustível de rampa).

Peso Máximo de Pouso (PMP)

Máximo peso para o pouso, limitado pela resistência da aeronave e requisitos de aeronavegabilidade.

Peso Máximo de Decolagem (PMD)

Máximo peso para a decolagem, limitado pela resistência da aeronave e condições de aeronavegabilidade (esse é o maior peso que pode ter a aeronave ao iniciar a corrida de decolagem).

Peso de Operação Vazio (POV) ou Peso Básico Operacional (PBO)

Peso da estrutura, grupos motopropulsores, mobiliário, combustível não usável e outros agentes de propulsão não usáveis, e outros itens do equipamento que são considerados parte integral de uma determinada configuração de um avião. Também estão incluídos certos itens "standards", pessoal, equipamento e mantimentos necessários para operações sem restrições, excluindo combustível usável e a carga paga.

Peso Máximo de Zero Combustível (PMZC)

Máximo peso permitido, acima do qual só se deve carregar o avião com combustível usável, em seções especificadas da aeronave, conforme limitação estrutural e de aeronavegabilidade.

Carga Paga Máxima

Peso Máximo Zero Combustível menos Peso de Operação Vazio.

Capacidade Máxima de Assentos

O número máximo de passageiros, - especificamente homologado ou previsto para homologação.

Volume Máximo de Carga

O espaço máximo disponível para a carga.

Combustível Usável

Combustível disponível para a propulsão da aeronave.

As definições dos limites de peso são diretas e simples, mas há um ponto que deve ser destacado, que é uma característica peculiar do avião como veículo de transporte:

$$(\text{PBO} + \text{CP máx} + \text{Combustível máx}) > \text{PMD} \quad (1)$$

O avião não pode decolar porque excede o peso limite para a operação de decolagem.

Ou seja, o avião tem limitação no peso de decolagem e tem volume de tanques tão grande que se encher os tanques não poderá levar a Carga Paga máxima. De maneira similar, se colocar a Carga Paga máxima, não poderá encher os tanques.

Em termos de inequações, há três que devem ser cumpridas:

NA DECOLAGEM:

$$\text{PBO} + \text{CP} + \text{Comb.} \leq \text{PMD} \quad (2)$$

$$\text{CP} \leq \text{PZC} - \text{PBO} \quad (3)$$

NO POUSO:

$$\text{PBO} + \text{CP} + \text{Comb. não gasto} \leq \text{PMP} \quad (4)$$

3 DESEMPENHO EM CRUZEIRO

Como já se mostrou, o peso bruto de um avião é composto de três parcelas distintas em natureza:

- a) Peso básico operacional;
- b) Carga paga;
- c) Combustível.

Na ocasião da decolagem, a soma dessas três parcelas deve ser menor ou igual ao máximo de decolagem. No pouso, menor ou igual ao máximo de pouso. Em qualquer situação, o peso básico operacional mais a carga paga não poderá exceder o peso zero combustível. O avião como veículo de transporte apresenta, portanto, do ponto de vista da análise da carga e etapa, as seguintes peculiaridades:

- a) O combustível pode representar parte substancial do peso bruto na ocasião de decolagem, principalmente nas etapas longas, quando chega a ser mais de duas ou três vezes o peso da carga. Veja a Tabela 1.
- b) Embora seja tecnicamente possível, não é hoje viável o reabastecimento de aviões comerciais em vôo. Para o reabastecimento em rota o avião deverá pousar (pouso técnico) num aeroporto convenientemente localizado.
- c) Deverá haver sempre uma reserva de combustível para vôo até o aeroporto alternativo (se o aeroporto de destino não estiver em operação), e mais espera em vôo.
- d) As limitações estruturais e de aeronavegabilidade, traduzidas em termos de pesos máximos, não podem ser excedidas porque impõem sérios riscos de acidentes com graves conseqüências.

Um avião é portanto um veículo adequado para operação técnica e econômica dentro de determinada faixa de etapa e carga paga. O desempenho da aeronave, em termos de carga que pode levar até determinada distância, pode ser dado por uma curva carga paga versus alcance, como a da Figura 2.

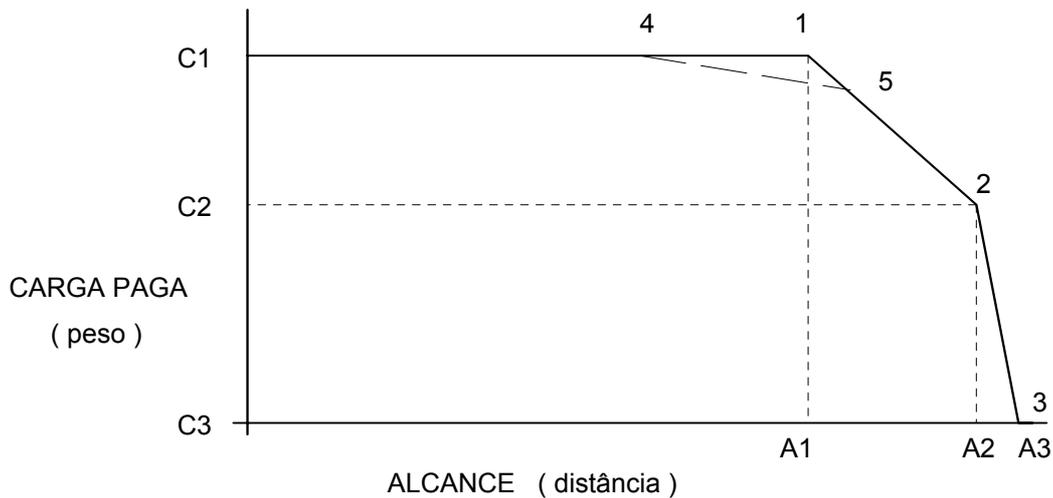


Figura 2. Curva Carga Paga *versus* Alcance.

A forma característica da curva deve-se aos seguintes fatos:

- 1) Existe um limite máximo para a carga paga, por razões estruturais. Teoricamente a carga paga máxima estrutural é dada pela diferença entre o peso zero combustível e o peso vazio de operação (ou peso básico operacional); LINHA C1-1. O avião decola com peso bruto menor que o máximo estrutural de decolagem.
- 2) A etapa mais longa que se pode fazer com carga máxima, ocorre quando se decola com peso máximo estrutural de decolagem; PONTO 1.
- 3) A partir do PONTO 1 não é possível aumentar o peso de decolagem, que já é o máximo estrutural. Para aumentar a etapa, de A1 a A2, deve-se ter mais combustível e por isso, menos carga. LINHA 1-2. Nesse caso troca-se carga por combustível, mantendo-se constante o peso de decolagem (máximo).
- 4) Se a aeronave fosse carregada com a carga máxima estrutural e com todo o combustível possível (capacidade máxima dos tanques) excederia o peso máximo estrutural de decolagem. Em outras palavras, com os tanques cheios, mesmo que se decole com peso máximo estrutural de decolagem, a carga paga será menor que a máxima; PONTO 2.
- 5) Decolando-se com os tanques cheios, a etapa será maior à medida que se diminuir a carga. LINHA 2-A3. Para decolagem com tanques cheios e sem carga, ter-se-á o máximo alcance vazio: PONTO A3.
- 6) Há aviões que têm ainda uma limitação de carga paga imposta pelo peso máximo de pouso que terá ao chegar ao aeroporto de origem. Isso principalmente nos aviões de carga, que tem sua estrutura reforçada de modo que o peso zero combustível é próximo do peso máximo de pouso. Ao chegar ao aeroporto de destino, a carga que pode estar levando deve ser tal que o peso zero combustível mais o combustível de reserva não ultrapassem o peso máximo estrutural do pouso. A LINHA 4-5 representa essa situação.

Os pontos notáveis caracterizam as seguintes condições:

- C1 = Carga paga máxima estrutural.
- A1 = Máxima distância que se pode voar levando-se a carga paga máxima; peso de decolagem máxima estrutural. Para distâncias menores que A1 não será necessário decolar com peso máximo de decolagem.
- C2 = Máxima carga que se pode levar, decolando com o peso máximo de decolagem e com os tanques cheios. Notar que $C2 < C1$. A diferença é o combustível para se voar um pouco mais longe, de A1 para A2.
- A2 = Máxima distância que se pode voar, decolando com os tanques cheios e peso máximo estrutural de decolagem.
- A3 = Máximo alcance vazio: máxima distância que se pode voar sem carga paga e tendo decolado com tanques cheios.

Um aspecto muito importante quanto à curva carga paga x alcance é que ela **não se restringe à linha da Figura 2 mas sim à área, contida pela linha,** onde qualquer combinação de carga e etapa representa uma operação possível. Qualquer ponto nessa área corresponderá a uma carga, uma etapa (alcance) e um peso de decolagem. Os pesos de decolagem são representados por paralelas (ou quase) à linha de peso máximo estrutural de decolagem, como mostra a Figura 3. Veja também as linhas de peso de decolagem nas Figura 5(b) e 6.

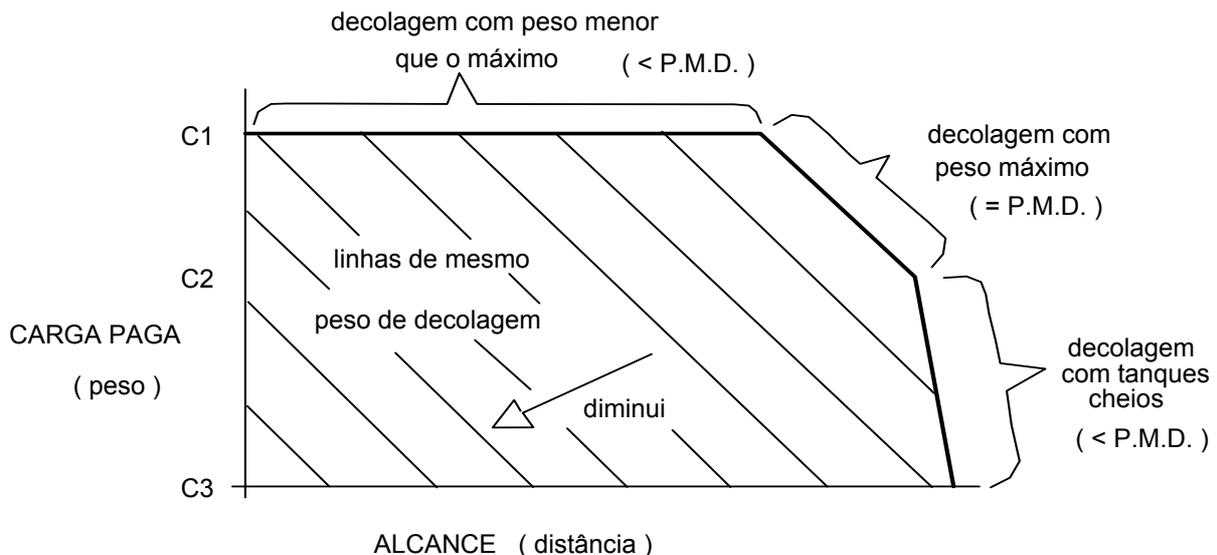


Figura 3. Regiões da curva Carga Paga x Alcance

Para se ter uma idéia de conjunto da vocação de cada aeronave em termos de carga e etapa, a Figura 4 mostra várias curvas para algumas aeronaves Boeing da família 7X7. A Figura 5 apresenta uma curva carga paga versus alcance (parte inferior) junto com a correspondente curva peso de decolagem x alcance (parte superior), admitindo-se por hipótese, que o avião decole com uma determinada carga paga, combustível suficiente para a etapa e mais reservas. A Figura 6 apresenta uma curva carga-etapa para o Boeing 747.

Deve-se ressaltar que as curvas carga versus alcance como as das Figuras 4, 5 e 6 são obtidas para determinadas condições padronizadas, como se vê nas notas das Figuras 5 e 6. Note-se também que, na Figura 6, em lugar de carga paga aparece o peso básico operacional mais carga paga. Subtraindo-se, portanto, o peso básico operacional (que tem valores diferentes para cada modelo da mesma aeronave), obtém-se a carga paga.

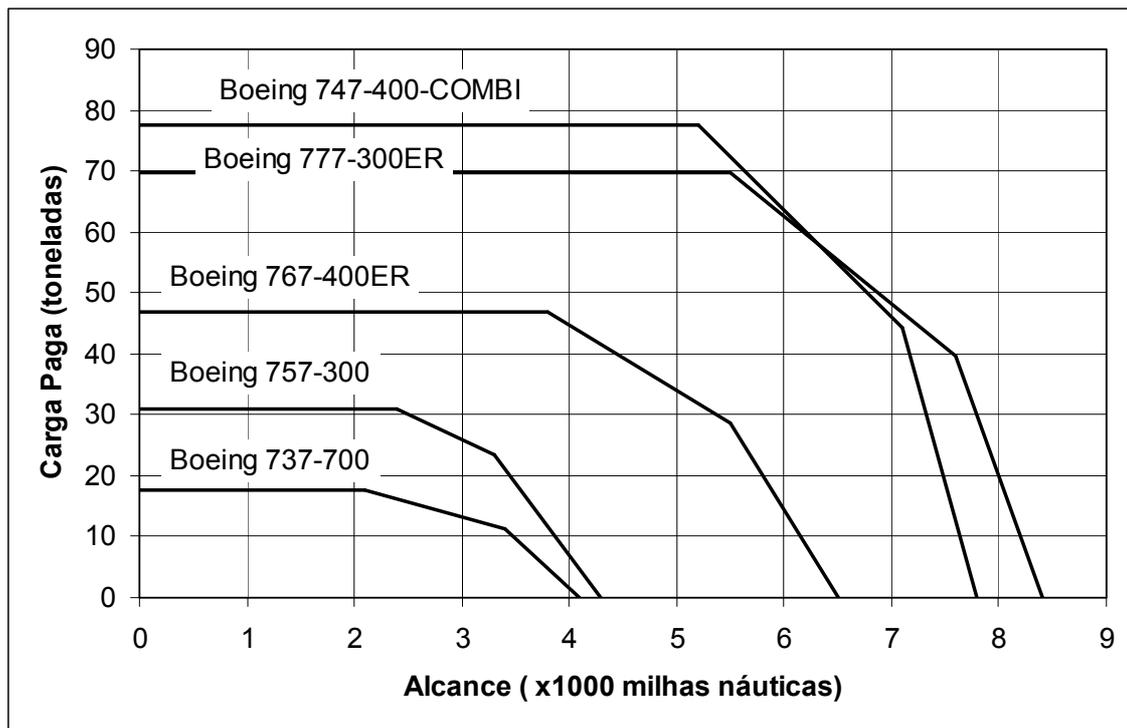


Figura 4. Curvas de carga paga *versus* alcance para algumas aeronaves Boeing

Consumo específico

O conceito de consumo específico aqui empregado difere do conceito usado pelos fabricantes de turbinas e motores. Lá o consumo é dado em razão da força de tração fornecida. Aqui o consumo é dado em razão da distância voada e da tonelada de peso bruto do avião. É calculado dividindo-se o volume de combustível queimado pela distância voada e pelo peso da aeronave.

$$\text{Consumo Específico} = \frac{\text{volume de combustível queimado}}{\text{peso médio da aeronave} * \text{distância alcançada}} = \frac{\text{litro}}{\text{tonelada} * \text{milha náutica}}$$

A distância voada é função do consumo específico e do peso bruto (além de outros fatores como velocidade). Mas como o peso bruto do avião varia durante o percurso, é necessário integrar as distâncias parciais para se obter a distância total voada.

$$\text{Distância} = \int_0^{\text{Comb}} \frac{dx}{ce(PD - x)} = \frac{1}{ce} \left[|\ln(PD)| - |\ln(PD - \text{comb})| \right] \quad (5)$$

ou ainda

$$\text{Distância} = \int_0^{\text{Comb}} \frac{dx}{ce(PBO + \text{carga paga} + \text{comb} - x)} = \frac{1}{ce} \left[|\ln(PBO + \text{carga paga} + \text{comb})| - |\ln(PBO + \text{carga paga})| \right] \quad (6)$$

Ou seja, a distância voada é dada em função de:

- Consumo específico (ce);
- Peso básico operacional (PBO);
- Peso de decolagem (PD);
- Carga paga e;
- Combustível.

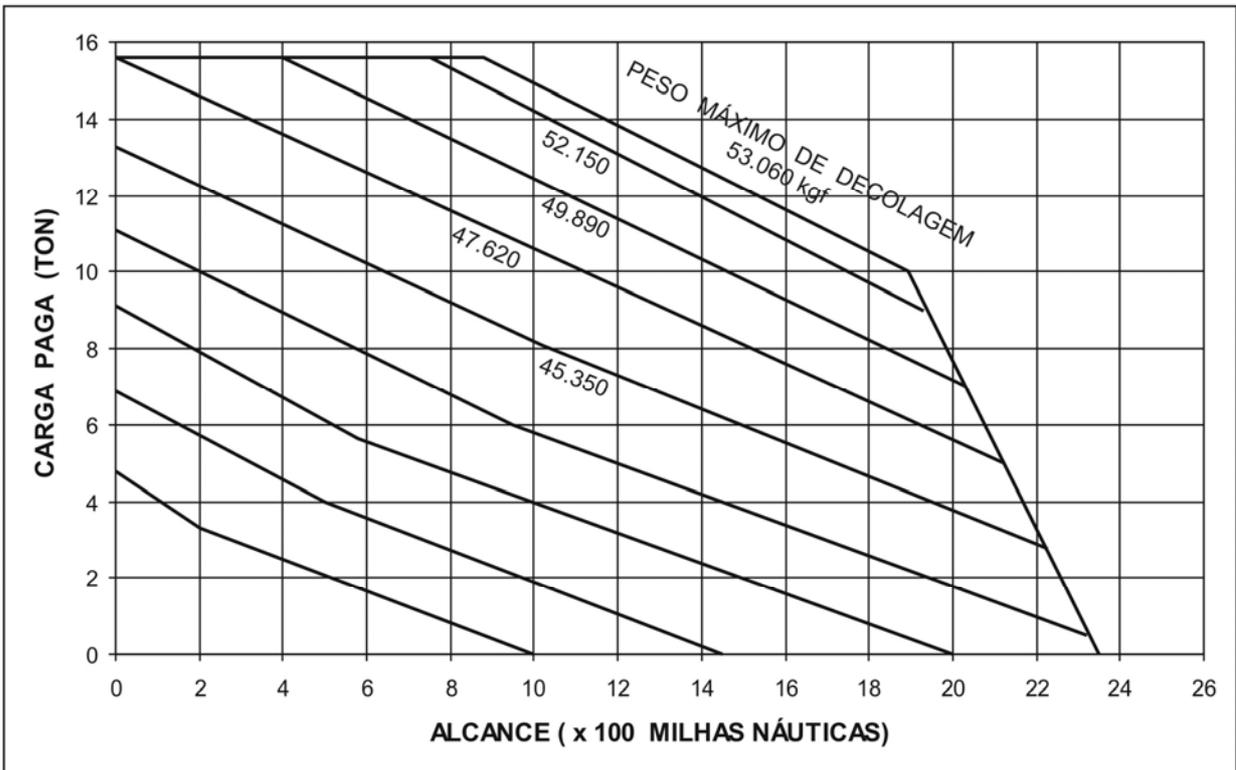
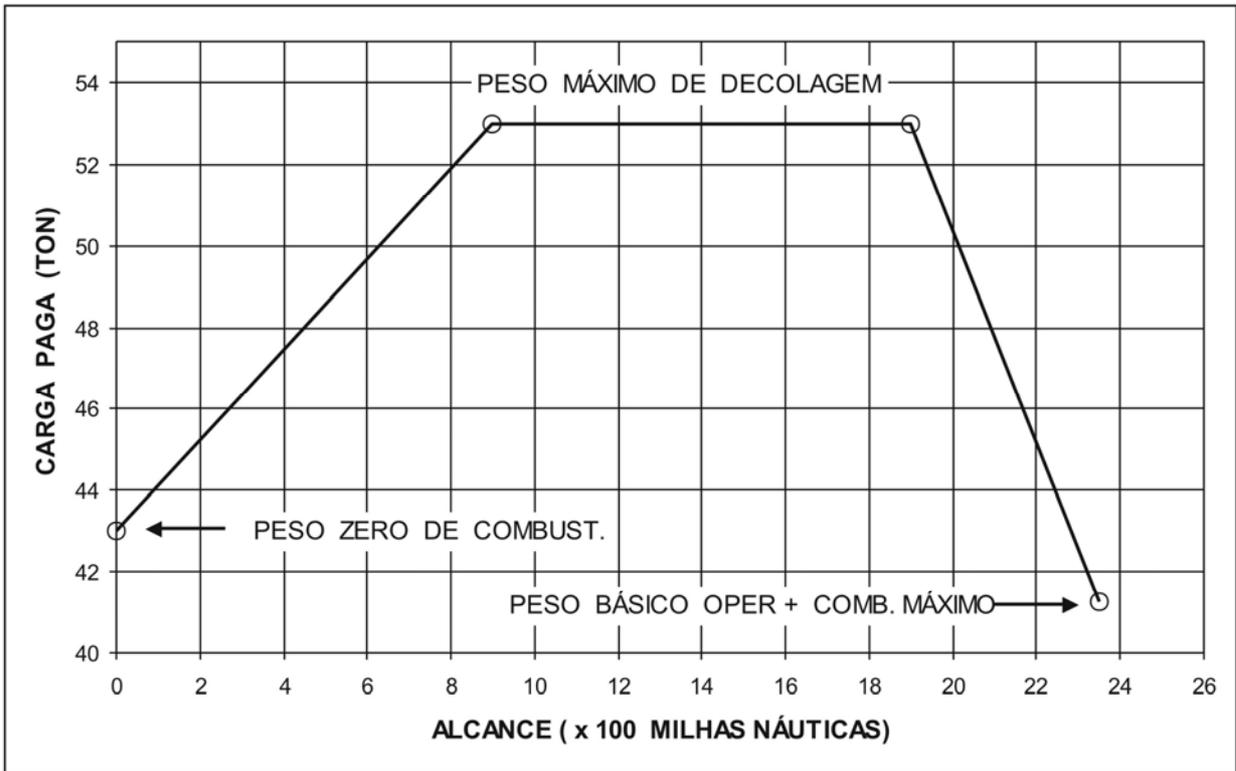


Figura 5. Diagrama carga paga x alcance e peso bruto na decolagem, Boeing 737-200
 Peso Básico Operacional, PBO: 27.800 kgf
 Turbinas JT8D-9/9A, Dia Padrão, Cruzeiro a 9.150 m
 Reservas para vôos domésticos
 Peso Zero de Combustível, PZC: 43.092 kgf
 Combustível máximo: 14.127kgf

3.2.1 PAYLOAD/RANGE FOR 0.85 MACH CRUISE
 MODEL 747-400, -400 COMBI (CF6-80C2B1F ENGINES)

D6-58326-1

DECEMBER 2002 55

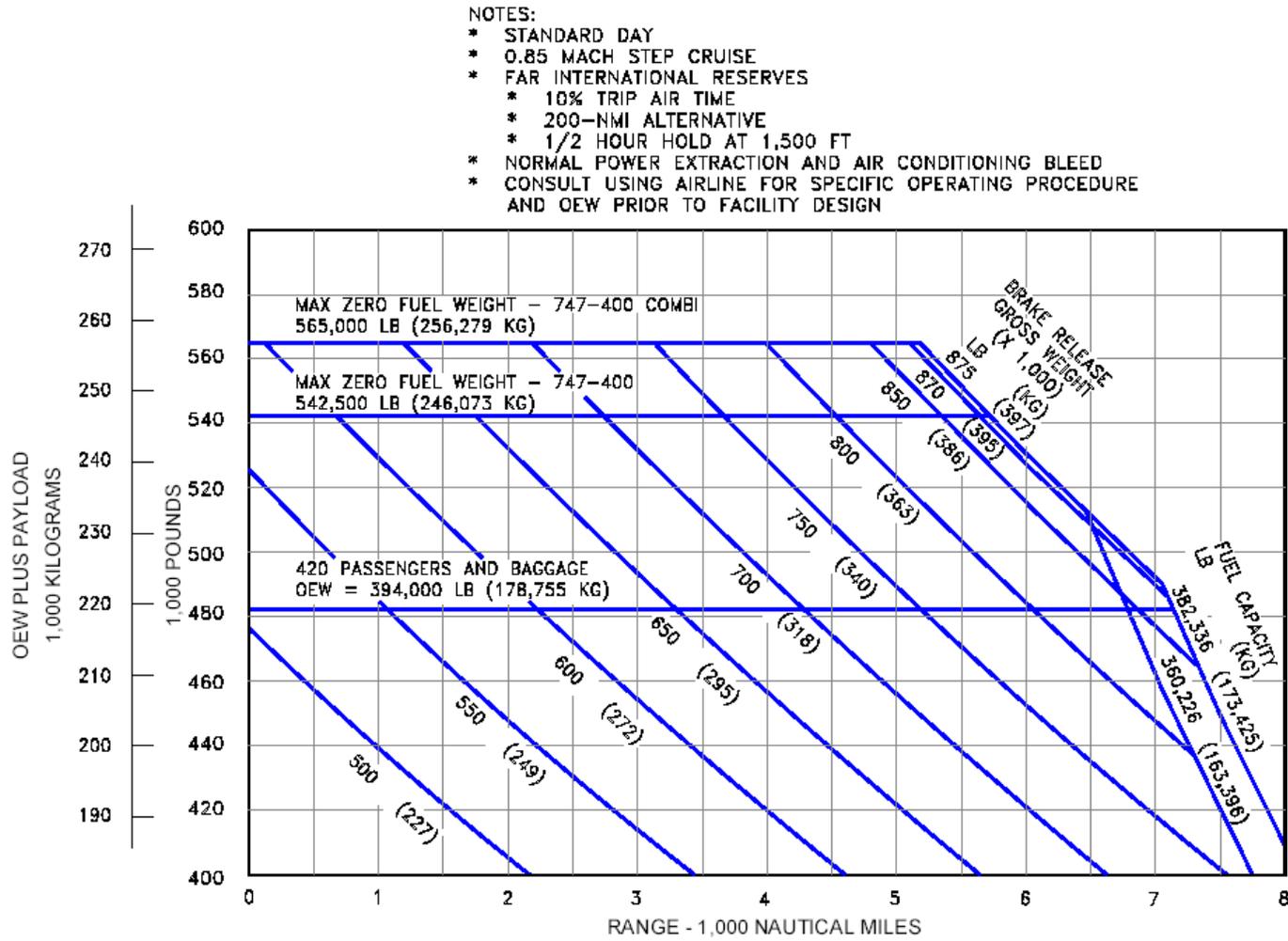


Figura 6. Curvas Carga Paga versus etapa para o Boeing 747 -400.
 Fonte: manual *Airport Planning* via Internet.

Na Figura 7 tem-se um panorama de como o consumo específico de combustível tem diminuído com o avanço da tecnologia das turbinas do tipo turbofan.

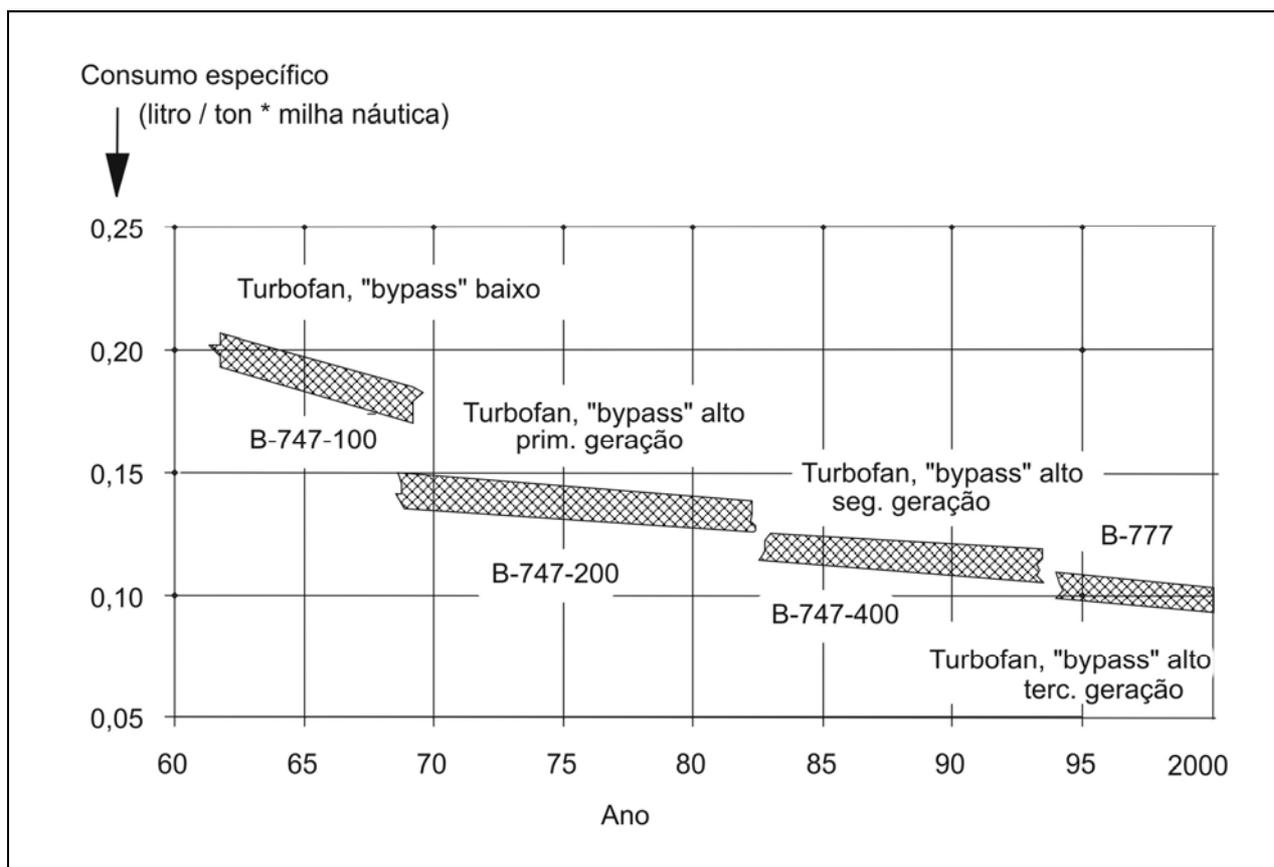


Figura 7. Tendências no consumo específico de turbojatos comerciais.

Na Figura 8 é apresentado um esquema ilustrativo de como variam as distâncias, pesos, velocidades e tempos num vôo comercial típico.

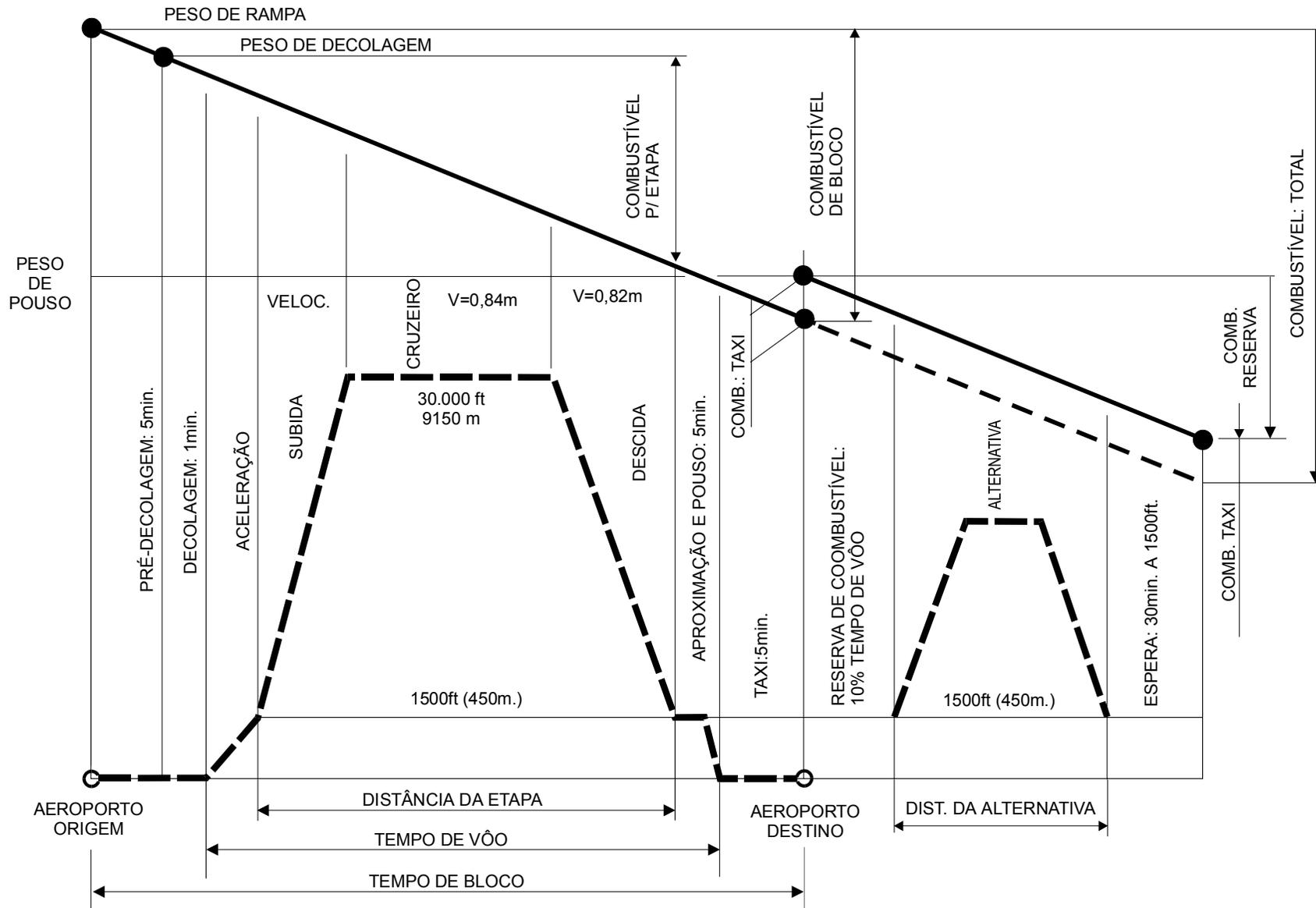


Figura 8. Esquema de distâncias, altitudes e tempo num voo comercial típico.