

---

# **CÁLCULO DE CARGAS PARA AERODESIGN**

Ms. Eng. Vinicio Lucas Vargas  
EMBRAER

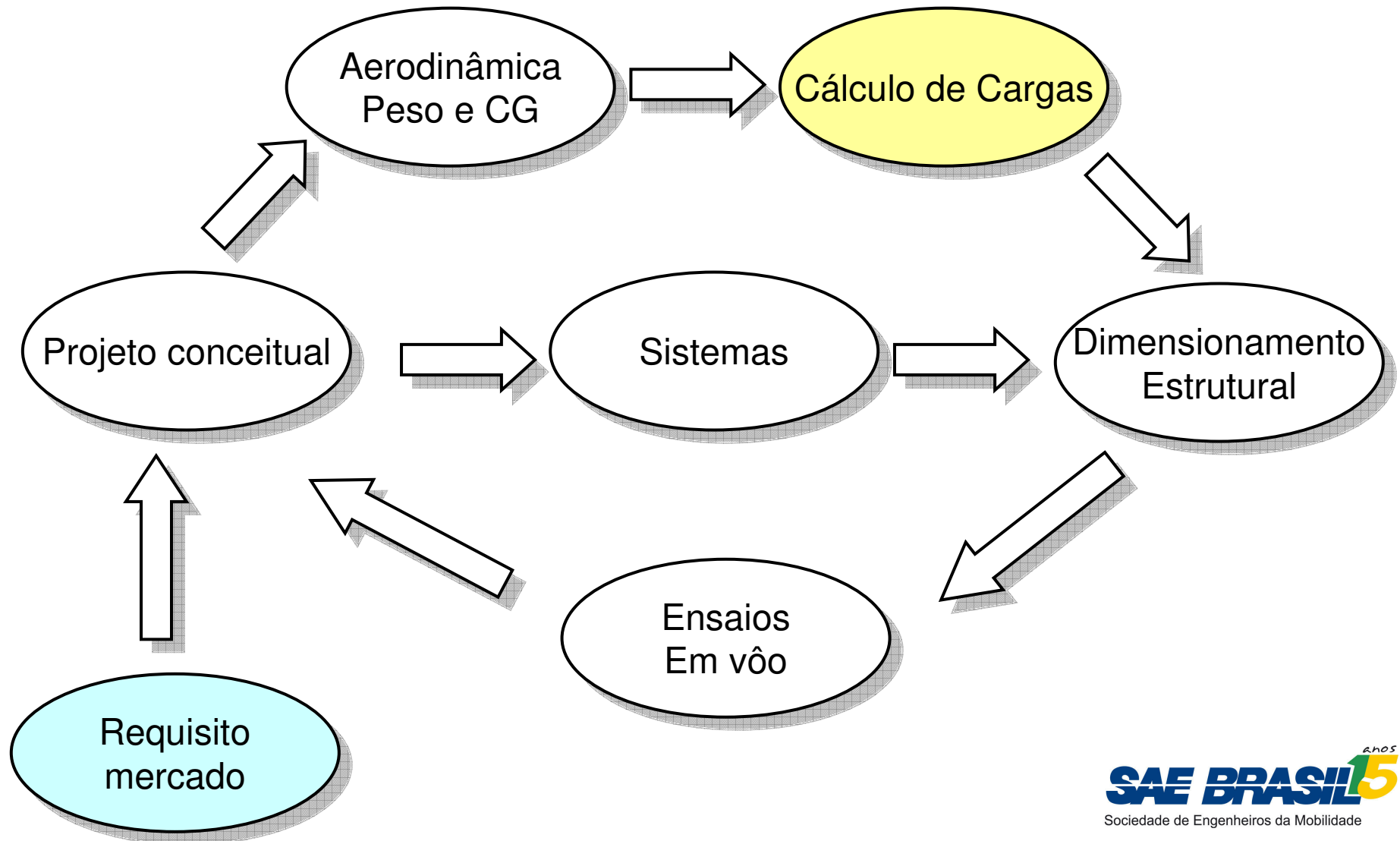
# CONTEÚDO

- Objetivo
- Contexto
- Requisitos
- Parâmetros importantes
- Condições para análise
- Envelopes de operação
- Modelos matemáticos
- Resultados
- Dicas

# OBJETIVO

- O cálculo de cargas tem como objetivo obter os carregamentos extremos que a estrutura da aeronave estará sujeita ao longo de sua operação.
- Baseia-se em envelopes de operação, que estabelecem limites para:
  - Velocidade;
  - Fator de carga;
  - Carga-paga;
  - Altitude de vôo;
  - Posição do centro de gravidade;
  - Etc...
- É necessário conhecer as características da aeronave (aerodinâmica, massa, CG, dimensões) para poder preparar um **modelo matemático** para descrever o que acontece com a estrutura durante a operação (manobras, rajadas, pouso).
- Busca-se os envelopes de cargas (cargas extremas, máximas e mínimas), que podem se apresentar como forças e momentos concentrados ou carregamentos distribuídos.

# CONTEXTO



# REQUISITOS



- Requisitos aeronáuticos garantem que a aeronave projetada será segura;
- Os requisitos variam com a categoria da aeronave (acrobática, de transporte, utilitário, ultraleves, asas rotativas, balões e dirigíveis);
- O regulamento fornece regras para os diversos aspectos do projeto (aerodinâmica e desempenho, projeto estrutural, projeto dos sistemas, etc).
- Quando uma aeronave se destina à comercialização, esta **deve ser submetida ao processo de homologação**, onde se verifica o cumprimento destes requisitos.
- Várias são as entidades de homologação ao redor do mundo, cada uma com sua área de atuação e seu grupo de regras: FAR, EASA (antigo JAR), RBHA.
- O regulamento é disponível para o público, através da internet.
- **Para o Aerodesign, não há requisitos formais, mas existe uma metodologia de avaliação de projeto que visa verificar se o modelo projetado é seguro.**

# REQUISITOS



- Requisitos de mercado indicam quais as características a aeronave deve apresentar para agradar o mercado.
- Entenda o “mercado” como sinônimo de “cliente”. No caso do Aerodesign, os clientes são os juízes, e os requisitos desejáveis são, por exemplo, a capacidade de carga do modelo sempre maior que no ano anterior...

# PARÂMETROS IMPORTANTES



- Os parâmetros de projeto que devem ser pesquisados quanto ao seu efeito no cálculo de cargas são, normalmente:
  - Massa e CG;
  - Características aerodinâmicas (flap, estol);
  - Características de desempenho (velocidade, altitude);
  - Características dos comandos (deflexão, esforço transmitido ao piloto ou servo comando);

# CONDIÇÕES PARA ANÁLISE



- As condições para o cálculo de cargas são dadas pelo requisito aeronáutico, na forma de manobras, rajadas e pouso.
- Pode-se dividir então as análises em dois grupos: condições de vôo e condições de solo.
- O primeiro, trata das condições de manobra e rajada, e o segundo, das condições de pouso e operação em solo.



# CONDIÇÕES PARA ANÁLISE: MANOBRAS



- As manobras são descritas nos requisitos aeronáuticos, na maneira que devem ser executados em vôo.
- A análise de cargas deve então simular o vôo da aeronave sob estas condições, e calcular os carregamentos que irão acontecer.
- Como um projeto aerodesign não visa o transporte de passageiros ou carga viva, o requisito não se aplica integralmente ao projeto. No entanto, vários aspectos devem ser seguidos, de forma a garantir que o modelo projetado seja seguro.

# CONDIÇÕES PARA ANÁLISE: MANOBRAS



- Para o projeto de uma aeronave para o Aerodesign, ao menos as seguintes manobras devem ser analisadas, e os seguintes componentes costumam encontrar carregamentos extremos para as manobras:

<b>Manobras</b>	<b>Componentes</b>
Pull-up	Asa, Fuselagem
Push-over	Asa, Fuselagem
Def. máx. comandos na VA (profundor, leme, aileron)	Emp. Horizontal e Vertical, ponta de asa, Fuselagem
Rudder Kick	Emp. Vertical
Rudder Return	Emp. Vertical
Falha de motor	Emp. Vertical
Rolamento 2/3 nz max	Ponta de Asa
Rolamento 0g	Ponta de Asa

# CONDIÇÕES PARA ANÁLISE: MANOBRAS



- Exemplo de manobra: PULL-UP

## **Sec. 25.331 - Symmetric maneuvering conditions.**

Condições a obedecer:

- A manobra inicia na condição de equilíbrio da aeronave;
- Duas condições devem ser analisadas, segundo este requisito:
  - Máx. Deflexão profundor na VA (defletir o prof. ao máximo, limitado pelo esforço do piloto, na vel. de projeto VA, até aeronave atingir o fator de carga máximo dado no diagrama V-n de manobra)
  - Deflexão especificada do profundor (Defletir o prof. de forma a atingir as acelerações de arfagem estabelecidas pelo requisito);

positive pitching acceleration (nose up)

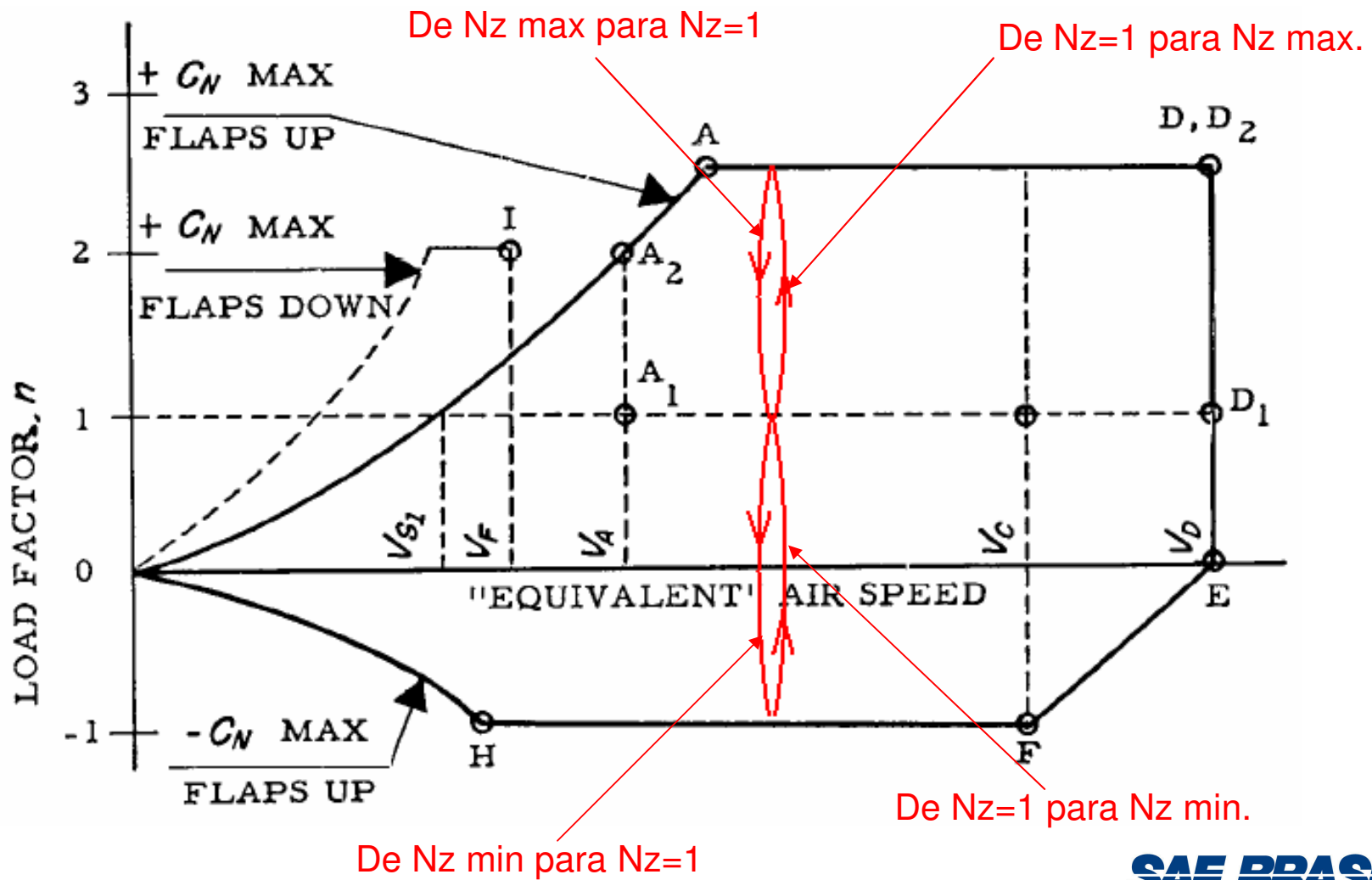
$$\frac{39n}{v} (n - 1.5), (\text{Radians/sec.}^2)$$

negative pitching acceleration (nose down)

$$\frac{-26n}{v} (n - 1.5), (\text{Radians/sec.}^2)$$

N = fator de carga positivo na velocidade de referência da manobra

# CONDIÇÕES PARA ANÁLISE: MANOBRAS



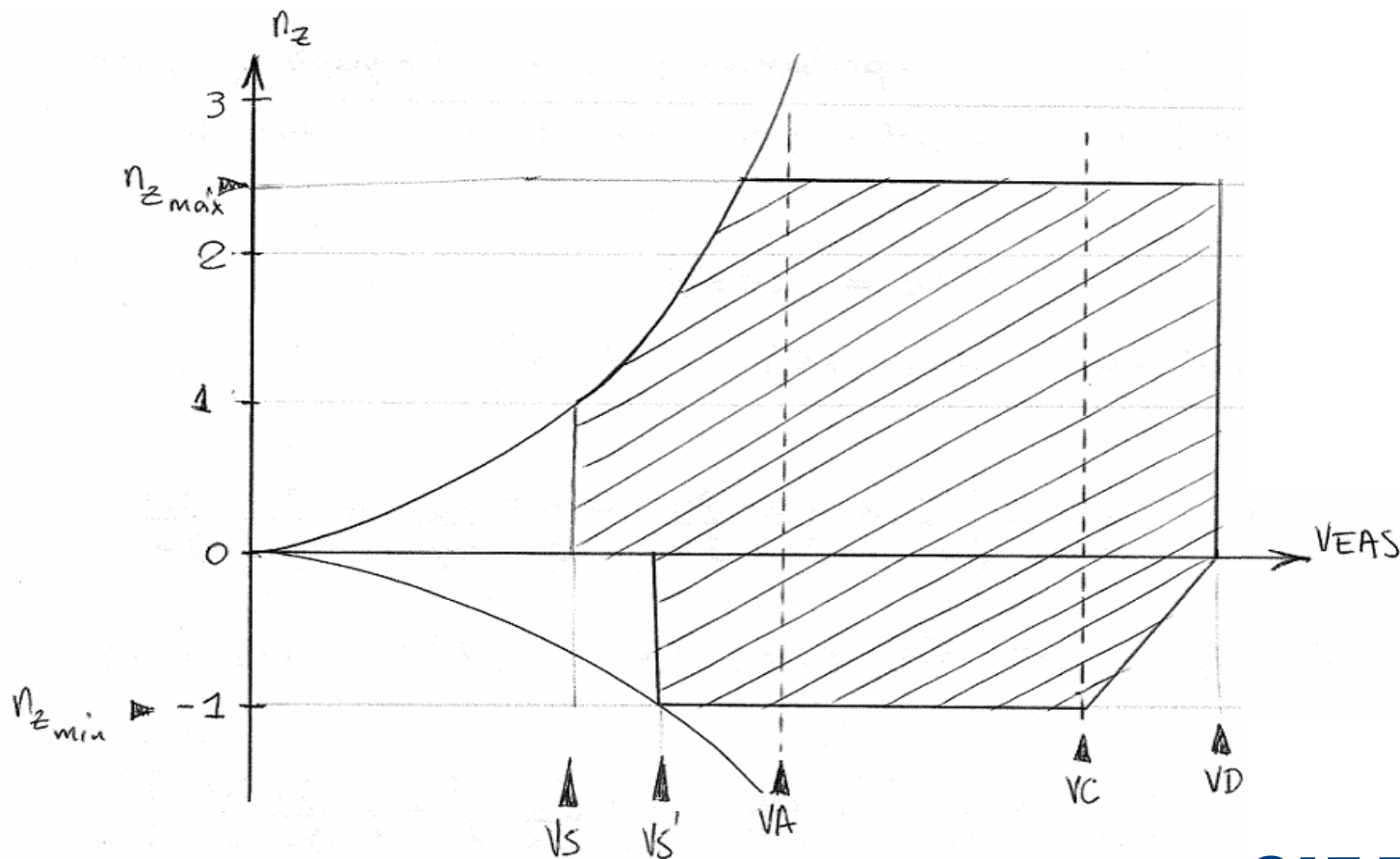
# CONDIÇÕES PARA ANÁLISE: RAJADAS



- Cargas de rajada podem compor o envelope de carregamento dos componentes da estrutura, e por isso devem ser analisadas.
- São vários os grupos de cargas de rajada que podem ser utilizados. Os principais:
  - Rajada de turbulência contínua;
  - Rajada sintonizada (perfil 1-cosseno).
- Para o Aerodesign, a análise de cargas para rajadas tipo “1-cosseno” já fornece um valor bastante razoável (verificar as velocidades de rajada na subparte 341 dos requisitos FAR).

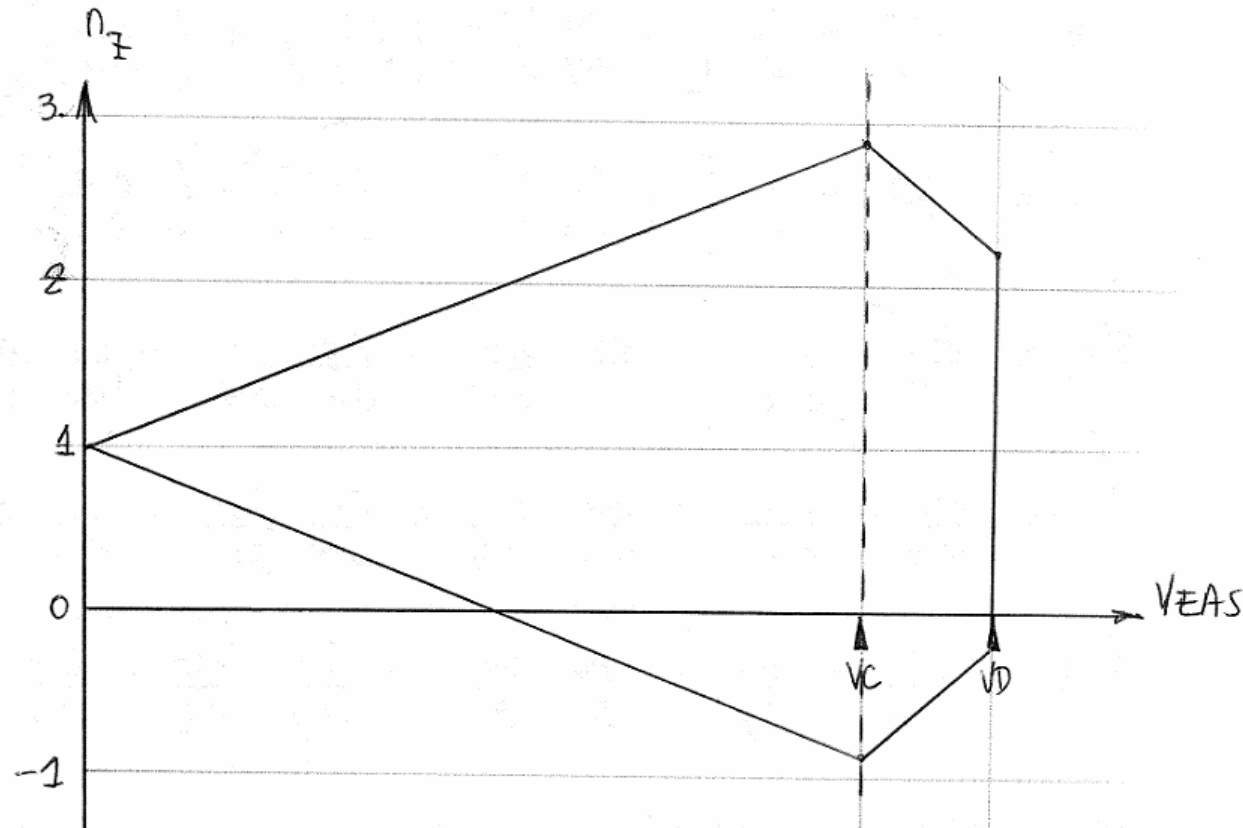
# ENVELOPES: DIAGRAMA V-N MANOBRA

- Limita o fator de carga vertical em função da velocidade de vôo.
- Apresenta limites aerodinâmicos, estruturais e aeroelásticos.

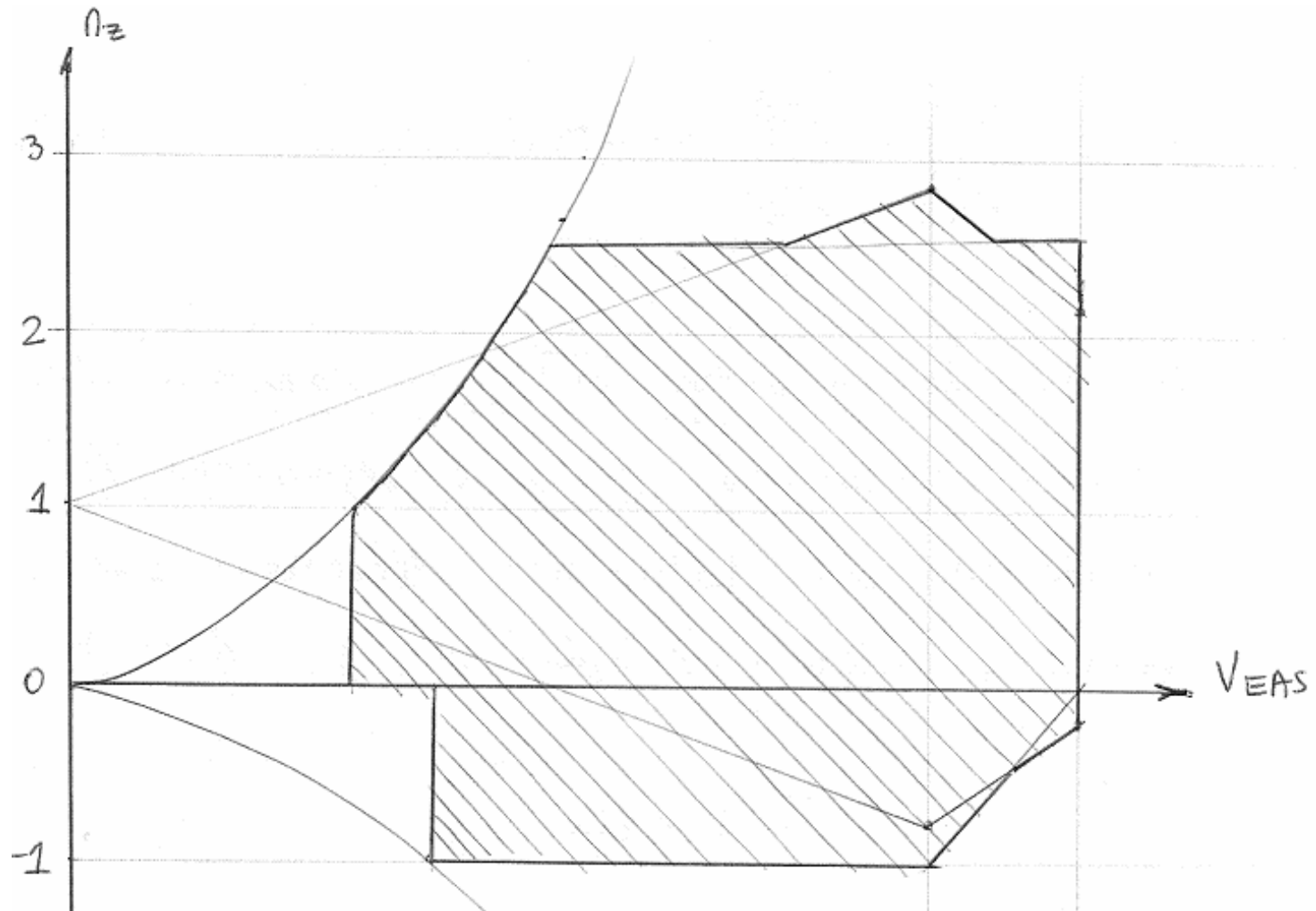


# ENVELOPES: DIAGRAMA V-N RAJADA

- Limita o fator de carga vertical em função da velocidade de vôo.
- Fatores de carga em função da velocidade de projeto e características da aeronave.



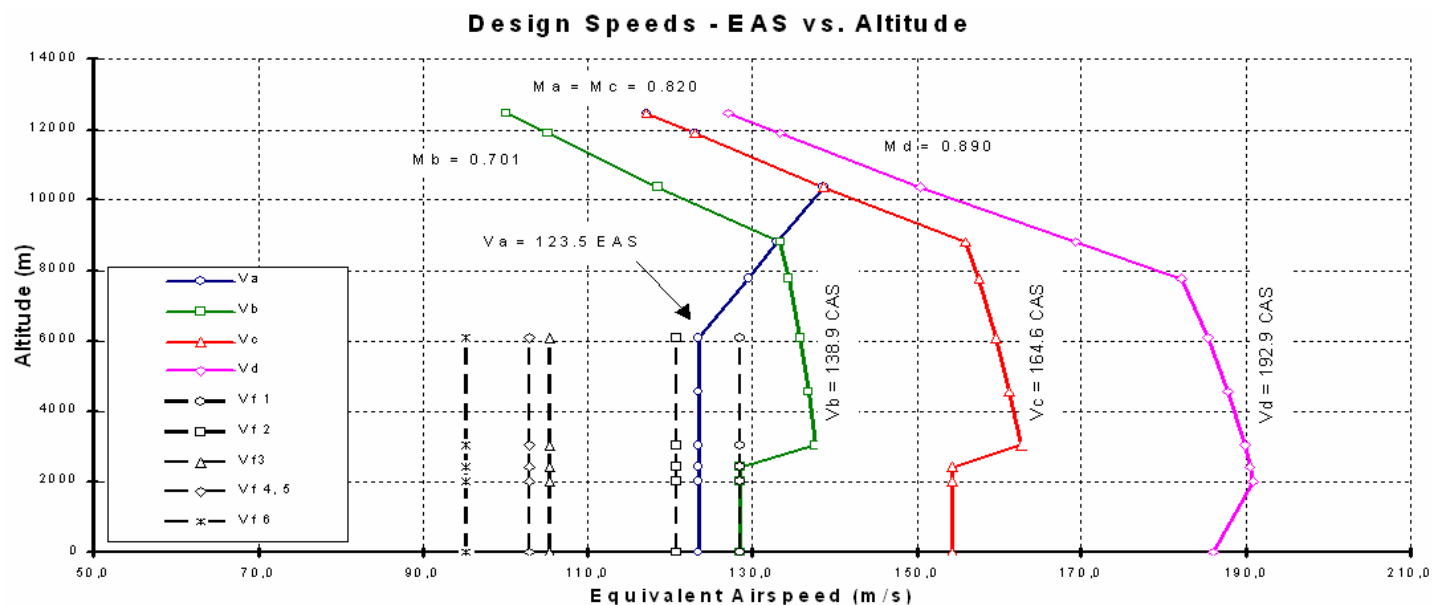
# ENVELOPES: DIAGRAMA V-N COMBINADO





# ENVELOPES: DIAGRAMA V-H

- Estabelece limites de velocidade de projeto para as várias altitudes
- As quebras no gráfico são limitações de velocidades impostas por diversos fatores:
  - Efeitos de onda de choque;
  - Bird Strike
  - Limitações aeroelásticas



# MODELO MATEMÁTICO

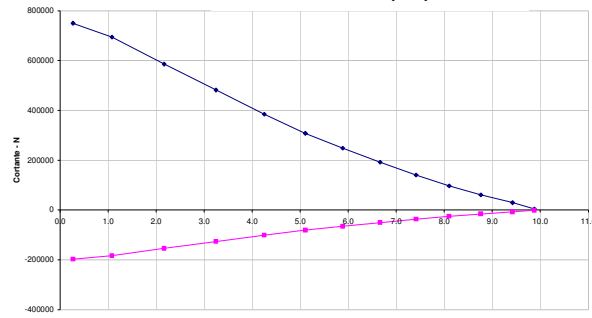
- O modelo matemático para cálculo de cargas deve permitir a variação dos parâmetros de projeto importantes;
- Cálculo do comportamento da aeronave durante as manobras ou rajadas é feito normalmente em função do tempo;
- Registra-se os valores extremos que as cargas atingem durante as análises;
- É interessante registrar os parâmetros que geraram aquele grupo de carregamento, bem como os valores dos esforços em todos os pontos da estrutura (velocidade, alfa, beta, deflexão de comandos,  $N_z$ , etc)

# MODELO MATEMÁTICO

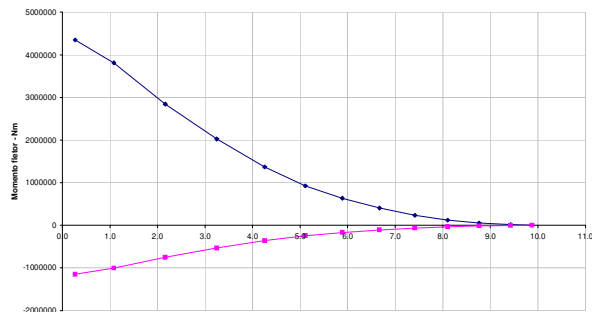
- Pode-se separar a análise de cargas em duas etapas principais:
  - Análise das condições de vôo, registrando as cargas extremas atingidas na forma de forças e momentos concentrados, e os parâmetros que refletem a condição de vôo;
  - Reconstituição da condição, agora considerando como as cargas são distribuídas ao longo da estrutura.
- Em todas as etapas de análise, deve-se considerar que as forças e momentos externos (aerodinâmica, trem de pouso) estão em equilíbrio com as cargas de inércia.

# RESULTADOS

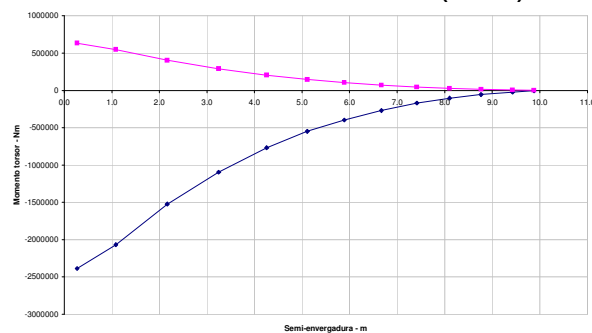
Cortante (N)



Momento Fletor (Nm)



Momento Torsor (Nm)



- O resultado final da análise de cargas deve conter os valores de forças e momentos máximos que serão aplicados aos componentes da estrutura, na forma de esforços solicitantes (integrados) o longo das linhas de referência dos componentes estruturais.

# DICAS

- Como o projeto de uma aeronave para o aerodesign não se enquadra nos requisitos aeronáuticos, antes de seguir algum requisito, avalie se o mesmo é aplicável ao seu projeto, e principalmente, se contribui para aumentar a segurança da sua aeronave;
- As características aerodinâmicas podem ser obtidas dos métodos conhecidos da literatura para projeto preliminar de aeronaves (Roskan, Raymer, etc);
- Distribuição das cargas nos componentes sustentadores pode ser feito através de programas de cálculo das propriedades aerodinâmicas que emprega o método dos painéis (TORNADO, XFOIL, etc);
- Sempre dimensionar a estrutura para os carregamentos máximos: para isso, pense quais as condições a aeronave deverá encontrar em sua operação (na competição, oras...).

# DICAS

- Não esqueça de considerar o **fator de segurança** nas cargas, antes de se iniciar o dimensionamento da estrutura;
- Faça um check se os resultados obtidos fazem sentido físico (cargas grandes demais ou pequenas demais...);
- Normalmente, a asa é envelopada para condições de fator de carga vertical extremos, e as pontas podem ser envelopadas para condições de deflexão de aileron na VA...
- Normalmente, empenagem horizontal é envelopada ou pelas manobras de deflexão máxima na VA ou deflexão controlada para atingir aceleração de arfagem dada pelo requisito, ou para rajadas verticais...
- Normalmente, empenagem vertical é envelopada para condições de manobras laterais de deflexão de leme (Rudder Kick ou R. Return, deflexão máx. Na VA), ou rajadas laterais...

A red and white model airplane is shown from a high-angle perspective, resting on a grey surface. The airplane has a white nose cone, a white propeller, and white markings on the wings and tail. The text "OBRIGADO PELA ATENÇÃO" is overlaid in the center of the image.

**OBRIGADO PELA  
ATENÇÃO**