



# DESIGN DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

**Daniel Afonso**  
Escola Superior Aveiro Norte,  
Universidade de Aveiro  
Centro de Tecnologia Mecânica e  
Automação (TEMA)  
dan@ua.pt [www.ua.pt/pt/p/16609746](http://www.ua.pt/pt/p/16609746)

# SUMÁRIO

## Apresentação

- Dossier Pedagógico da UC
- Objetivos
- Conteúdos
- Bibliografia
- Avaliação
- Plano de aulas

## Design de Estruturas

- Definição de estruturas
- O projeto estrutural

## Estruturas aeroespaciais

- Tipologias de estruturas
- Definição e tipos de treliças
- Avaliação de treliças



# APRESENTAÇÃO

Dossier  
pedagógico da  
unidade curricular



# DOCENTES



Daniel Afonso

- dan@ua.pt
- Eng. Mecânica



Ricardo Torcato

- ricardo.torcato@ua.pt
- Eng. Tecnologia Industrial



Augusto Coelho

- augustodesousacoelho@ua.pt
- Design



# OBJETIVOS

- Conhecer e compreender os requisitos e tipologias de estruturas e mecanismos aeroespaciais;
- Conceber e comunicar propostas de estruturas aeroespaciais com base em desenho manual;
- Traduzir, de forma eficaz, especificações geométricas e dimensionais de estruturas aeroespaciais recorrendo a desenho manual e a modelos virtuais tridimensionais (3D) em aplicações informáticas de Desenho Assistido por Computador (CAD);
- Executar, modificar e gerir modelos CAD 3D de componentes e montagens de estruturas aeroespaciais;
- Simular a cinemática de componentes e sistemas com base em modelos CAD 3D.

# CONTEÚDOS PROGRAMÁTICOS

## Introdução às estruturas aeroespaciais

- Tipologias de estruturas e mecanismos
- Cinemática de mecanismos
- Componentes de estruturas
- Componentes de mecanismos

## Desenho e conceção de estruturas aeroespaciais

- O desenho livre como ferramenta de design conceptual
- O desenho livre como instrumento de comunicação

## Desenho e montagem de estruturas aeroespaciais com recurso ao CAD

- Desenvolvimento de modelos CAD 3D
- Montagens de estruturas e mecanismos
- Gestão de recursos digitais

## Simulação cinemática de componentes e sistemas

- Graus de liberdade de movimento
- Parametrização de movimento
- Simulação cinemática

# BIBLIOGRAFIA PRINCIPAL

- Introduction to Aerospace Structures and Materials, René Alderliesten, TU Delft Open, 2018
- Aerospace Structures- an Introduction to Fundamental Problems, Terry Weisshaar, Purdue University, 2011
- Advanced CAD Modeling: Explicit, Parametric, Free-Form CAD and Re-engineering, Nikola Vukašinić, Jože Duhovnik, Springer, 2019
- Sketching: Drawing Techniques for Product Designers, Roselien Steur, Koos Eissen, BIS Publishers, 2019

# AVALIAÇÃO DISCRETA

30%

Teste prático: Modelação 3D, montagens e simulação  
04/11/2022

30%

Desenvolvimento de projeto e apresentação  
06/01/2023

40%

Exame teórico-prático  
Época normal

# AVALIAÇÃO FINAL

60%

Exame prático: Desenho livre, Modelação 3D, montagens e simulação  
Época normal

40%

Exame teórico-prático  
Época normal



# MOMENTOS DE AVALIAÇÃO

## Teste prático

- Teste prático de modelação CAD 3D, montagem de estruturas e mecanismos e simulação de mecanismos a 04/11/2022

## Projeto

- Projeto de design e conceção de um sistema aeroespacial
  - Desenho manual da proposta
  - Seleção de componentes
  - Modelação e montagem
  - Simulação de movimentos
- Entrega de projeto e apresentação na aula de 06/01/2023

## Exame teórico prático

- Exame escrito sobre conteúdos abordados nas aulas teorico-práticas

# PLANO DE AULAS

## TP

- Airframe Design: Truss structures
- Airframe Design: Shell structures
- Airframe Design: Sandwich structures
- Mechanism kinematics: motion and DOF
- Mechanism kinematics: overconstrained mechanisms
- Mechanism kinematics: deployable structures
- Sketching and design aerospace structures
- Compliant bi-stable and Origami Designs
- Structures components: joining and fixing
- Structures components: motion guidance
- Structures components: power transmission
- Design for X
- Tolerance analysis and assembly design

## P

- CAD modelling
- CAD modelling
- CAD modelling
- CAD kin. sim. - assembly
- CAD kin. sim. - kin. sim.
- CAD kin. sim. - din. sim.
- Freehand sketch
- Freehand sketch
- Project - freehand sketch
- Project - select components
- Project - modeling
- Project - assembly
- Project - simulation



# DESIGN DE ESTRUTURAS

Introdução ao  
design de  
estruturas

# O QUE É UMA ESTRUTURA

## Segundo dicionários

- O que permite que uma construção se sustente e se mantenha sólida
- O que serve de sustento ou de apoio.
- A sustentação de uma obra.
- Something made up of a number of parts that are held or put together in a particular way

## Do ponto de vista da engenharia

- O elemento (ou conjunto de elementos) que suporta e permite o funcionamento /utilização de um sistema mecânico

# O QUE É UMA ESTRUTURA

## Do ponto de vista da engenharia aeroespacial

- a aeronave ou espaçonave sem equipamentos e equipamentos instalados
- a pele e a construção (esqueleto) que fornecem formas aerodinâmicas
- as peças de suporte de carga que suportam forças durante o voo normal, manobras, decolagem, aterrissagem etc.
- as partes que juntas protegem o conteúdo do meio ambiente

# HIERARQUIA DE ESTRUTURAS

## estruturas primárias

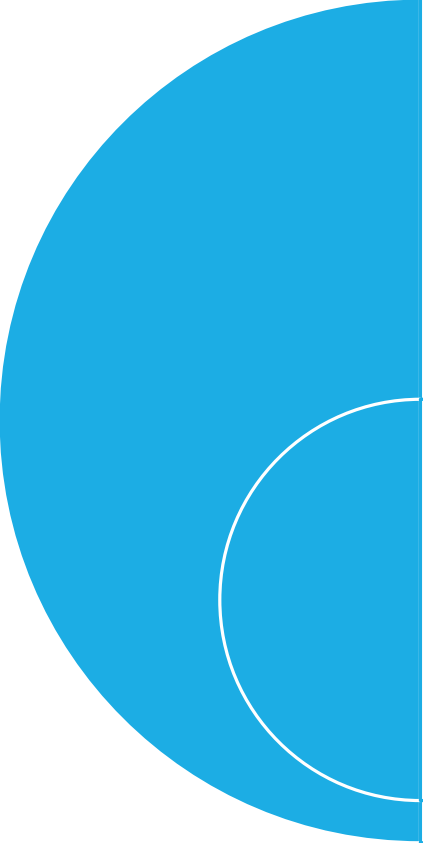
- Os elementos estruturais que cumprem uma função crítica
- Elementos que, em caso de dano ou falha, podem levar à falha de toda a aeronave ou nave espacial

## estruturas secundárias

- Os elementos estruturais que cumprem funções não críticas
- Elementos que suportam apenas cargas aerodinâmicas e inerciais de componentes não críticos



# OBJETIVO DO PROJETO ESTRUTURAL



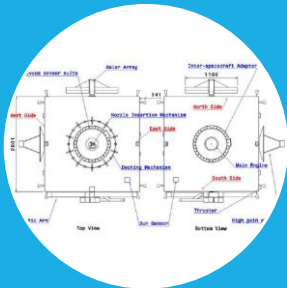
Obter uma estrutura adequada à utilização pretendida

- Suportar esforços que o equipamento vai sofrer durante a utilização
- Manter geometria adequada ao bom funcionamento de todos os componentes
- Garantir durabilidade no tempo
- Garantir segurança de utilização

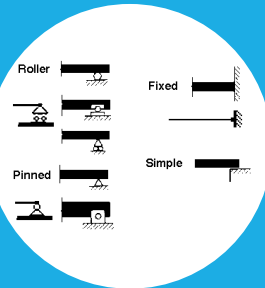
Preocupações gerais no projeto

- Minimizar o custo: material, produção, montagem, manutenção
- Minimizar a massa da estrutura

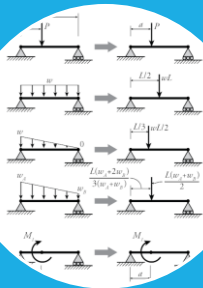
# ESPECIFICAÇÕES DE UM PROJETO ESTRUTURAL



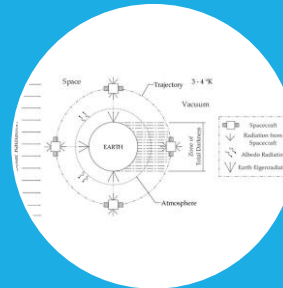
Geometria de referência  
(limites e restrições dimensionais e de massa)



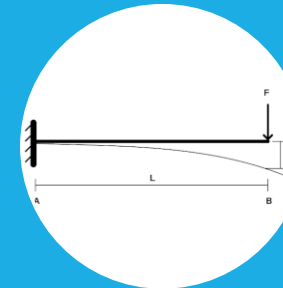
Tipos de apoio ou constrangimentos  
(fixações necessárias e/ou obrigatórias)



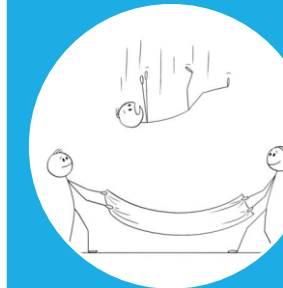
Condições de carregamento  
(valor e distribuição de carga a suportar)



Condições ambientais  
(ambiente a que a estrutura está sujeita)



Limites de operação  
(deformação máxima, tensão máxima, condutividade elétrica ou térmica)



Fator de segurança  
(ordem de grandeza de sobre-dimensionamento do projeto)

# PRINCÍPIO DO PROJETO ESTRUTURAL

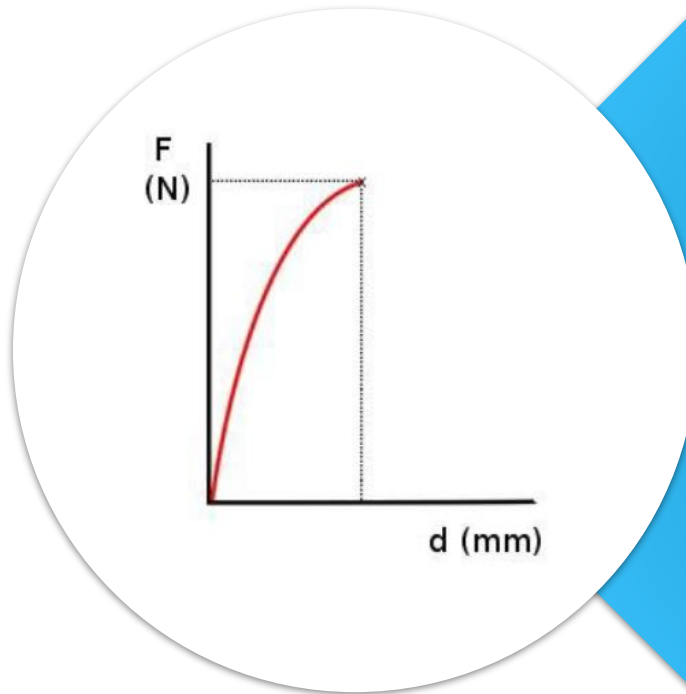
projetar para  
a resistência

- Utiliza a resistência máxima dos materiais
- Preocupação com integridade da peça, e não da sua geometria

projetar para  
a rigidez

- Relação entre carga aplicada e deformação resultante
- Preocupação com integridade da peça e da sua geometria

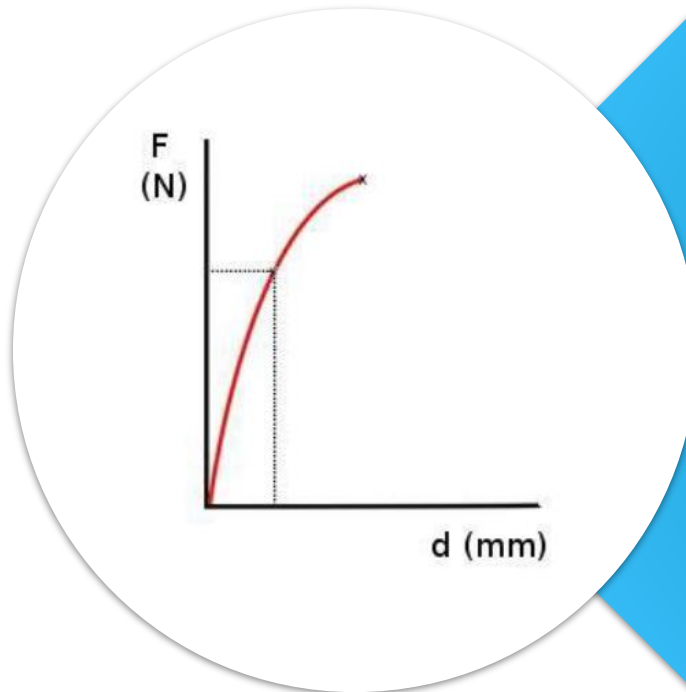
# PROJETAR PARA A RESISTÊNCIA



resistência é definida pela carga máxima que uma peça pode suportar sem provocar a sua falha

- Dependendo da aplicação, pode considerar-se falha:
  - Deformação plástica da peça
  - Quebra da peça
  - Fissuração do material
- Preocupação com integridade da peça, e não da sua geometria
- Utiliza-se este princípio de projeto estrutural quando as deformações não prejudicam o funcionamento da peça projetada.

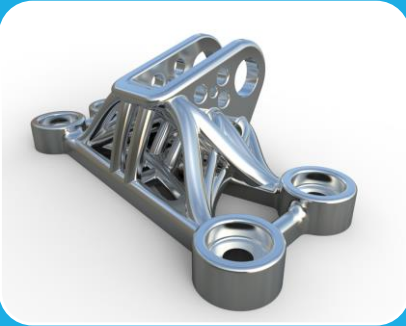
# PROJETAR PARA A RESISTÊNCIA



A rigidez é definida como a razão entre as cargas e a deformação: quanto maior a rigidez, menos a deformação para a mesma carga.

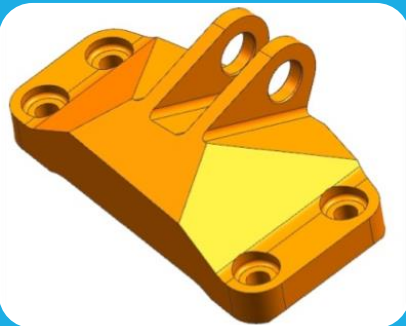
- Dependendo da aplicação, pode considerar-se falha:
  - Deformação plástica da peça
  - Deformação superior a um valor estipulado para o projeto (função da peça)
  - Fissuração do material
- Utiliza-se este princípio de projeto estrutural quando a deformação exagerada prejudica o funcionamento da peça projetada.

# CRITÉRIOS PARA OTIMIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA



## Otimização da rigidez ou resistência / massa

- Seleção do material
- Considerações geométricas
- Adição de material apenas nas zonas de maior solicitação
- Remoção de material em zonas sobredimensionadas

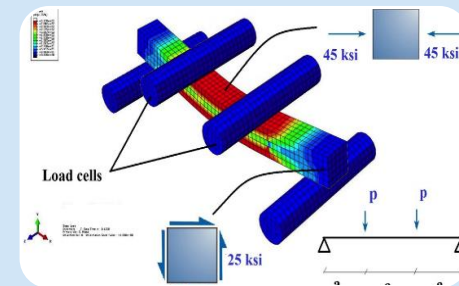
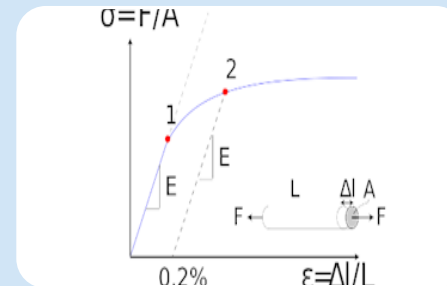
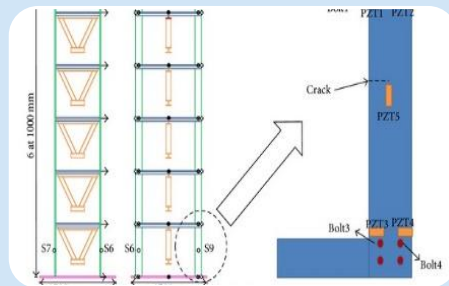
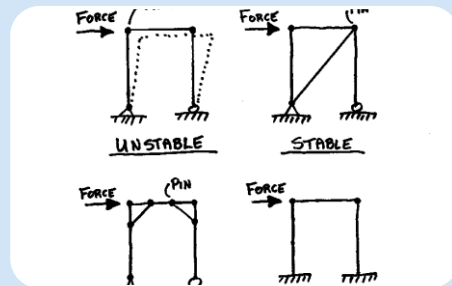


## Otimização da rigidez ou resistência / custo

- Custos do material
- Custos de produção
- Minimização da complexidade do processo de fabrico



# COMO RESOLVER UM PROBLEMA ESTRUTURAL



## Por experiência

- Simples
- Rápido
- Sujeito a falhas

## Experimentalmente

- Lento
- Dispendioso
- Sujeito a falhas

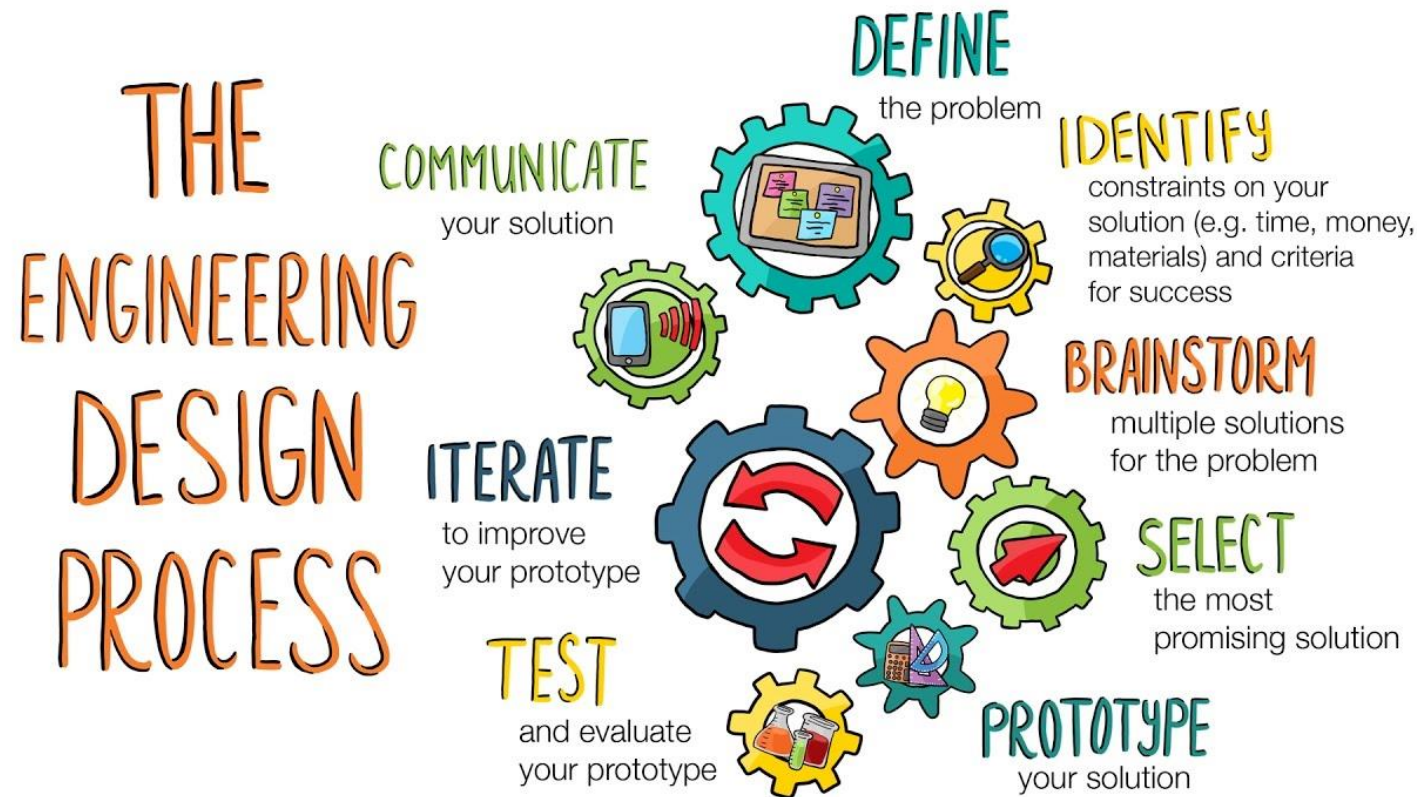
## De forma analítica - teoricamente

- Complexo
- Limitações geométricas

## Numericamente

- Solução simples
- Rápido
- Sujeito a erros

# COMO RESOLVER UM PROBLEMA ESTRUTURAL





# ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

Tipologia de  
estruturas -  
Treliças

# TIPOLOGIAS DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

## Estruturas de treliças

- Estrutura baseada em elementos que suportam maioritariamente tensões de tração ou compressão

## Estruturas de casca

- Estrutura baseada em chapas finas, com rigidez obtida a partir da geometria da peça

## Estruturas Sandwich

- Estrutura baseada em duas chapas finas, ligadas por elementos de baixa densidade

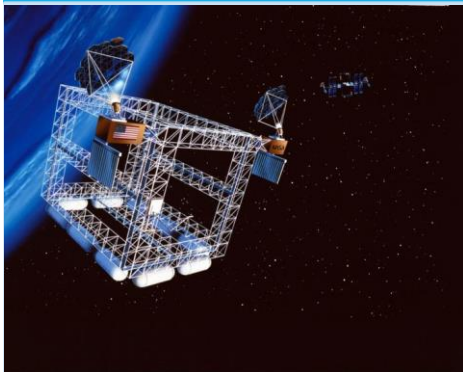
## Estruturas integralmente reforçadas

- Estruturas com princípio semelhante a estruturas de casca ou sandwich, com possibilidade de reforços adaptados continuamente.



# TIPOLOGIAS DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

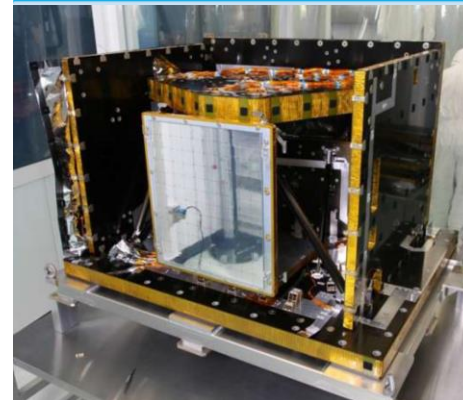
Estruturas de  
treliças



Estruturas de casca



Estruturas Sandwich



Estruturas  
integralmente  
reforçadas



# TIPOLOGIAS DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

## Estruturas de vigas

- Estrutura baseada em elementos que suportam maioritariamente esforços de flexão ou torção

## Estruturas de pórticos

- Estrutura baseada num conjunto de elementos que suportam esforços de flexão, torção e carregamento axial

## Estruturas com carregamentos tridimensionais

- Estrutura ou componentes de estruturas sujeitas a forças e momentos segundo vários eixos (geometria 3d livre)

## Placas de circuito empilhadas

- Estrutura de suporte de componentes eletrónicos



# TIPOLOGIAS DE ESTRUTURAS AEROESPACIAIS

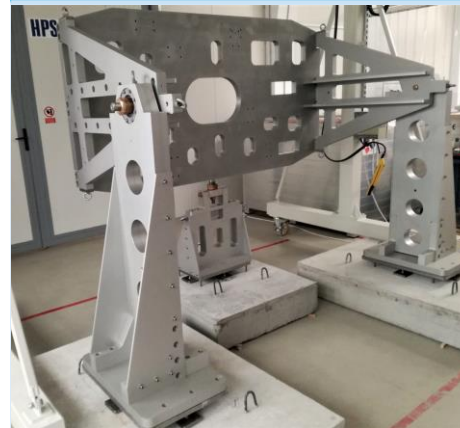
Estruturas de vigas



Estruturas de pórticos



Estruturas com carregamentos tridimensionais



Placas de circuito empilhadas



# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)

Estrutura formada por vários elementos ligados entre si



## Barras rígidas (strut)

- Cada barra suporta apenas esforços axiais
- A disposição das barras é responsável pela rigidez da estrutura



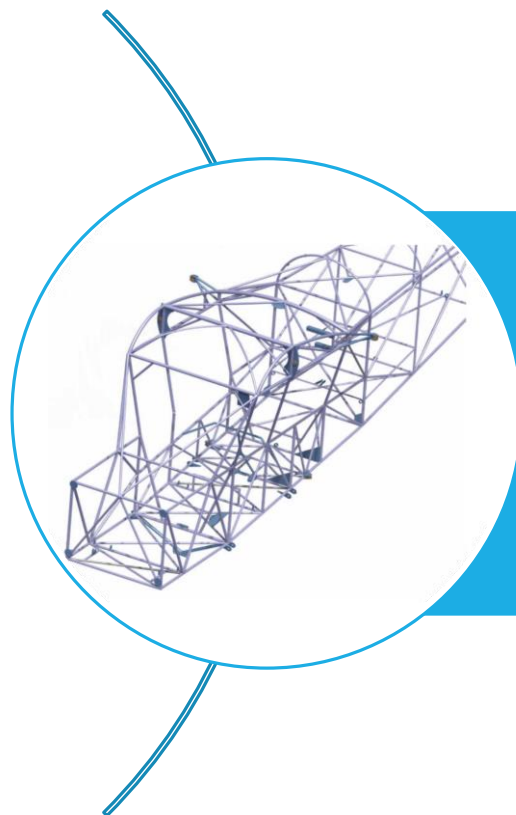
## Ligações articuladas entre as barras: nós (nodes)

- Permitem a rotação livre das barras
- São geralmente articulações simples (2D) ou juntas esféricas (3D)

# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)



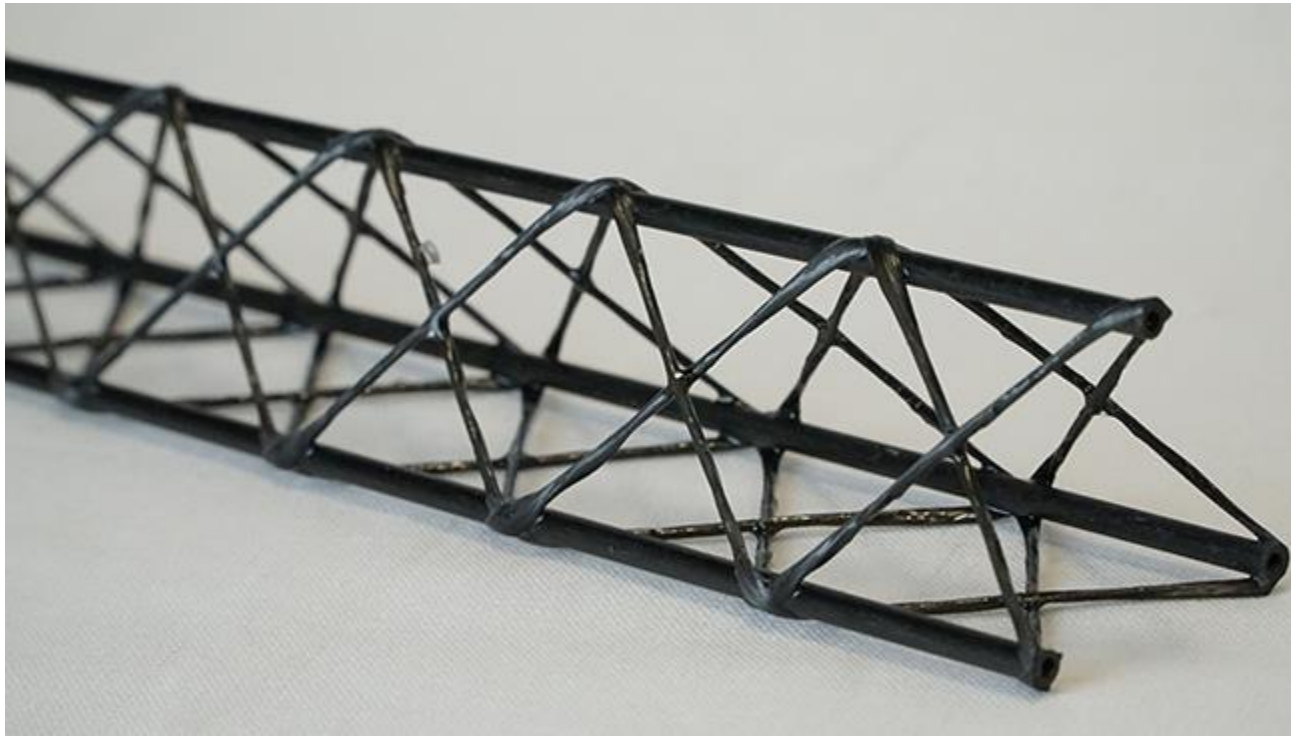
# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)



Por motivos construtivos,  
as juntas podem ser substituídas por ligações rígidas

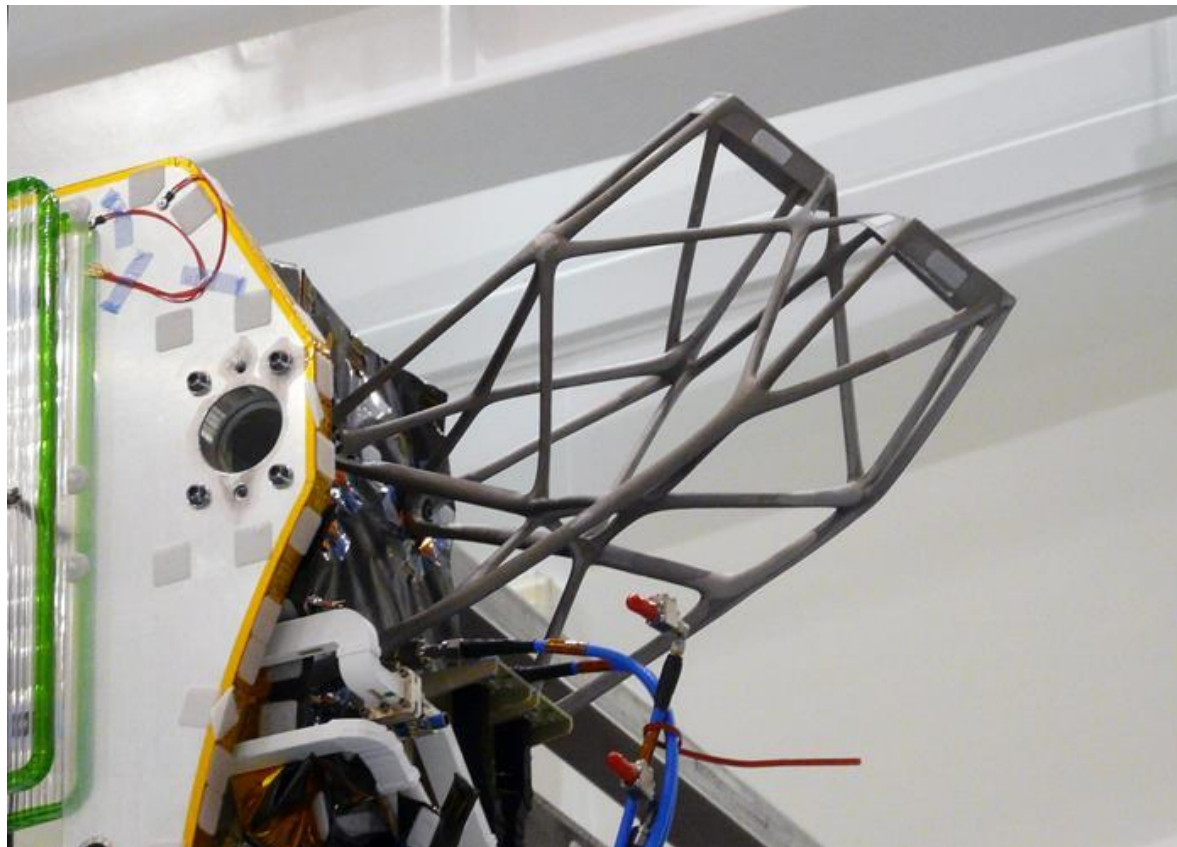
- Fabrico de várias barras num único componentes
- Facilidade de ligação mecânica
- Apesar da ligação rígida a tornar num pórtico, a escala entre comprimentos de barras e ligações mantém o seu comportamento estrutural próximo de uma treliça

# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)





# TRELIÇAS (ESTRUTURAS RETICULADAS)

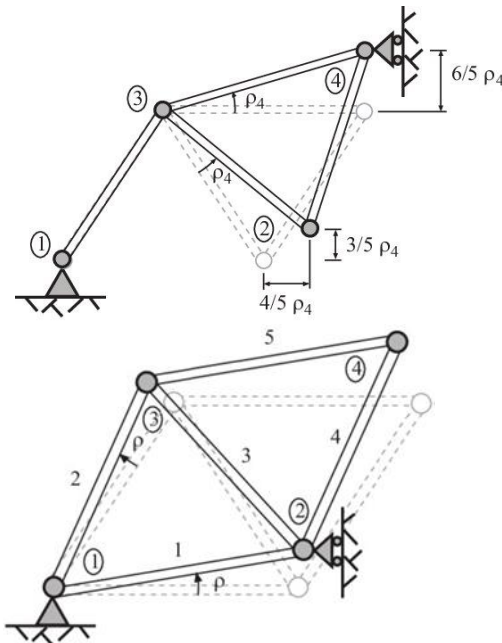




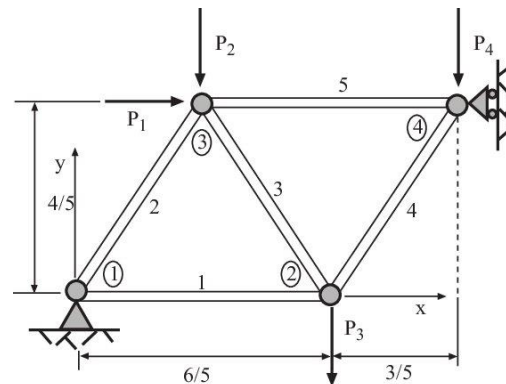
# ANÁLISE DE TRELIÇAS

## Treliças Estaticamente Determinadas

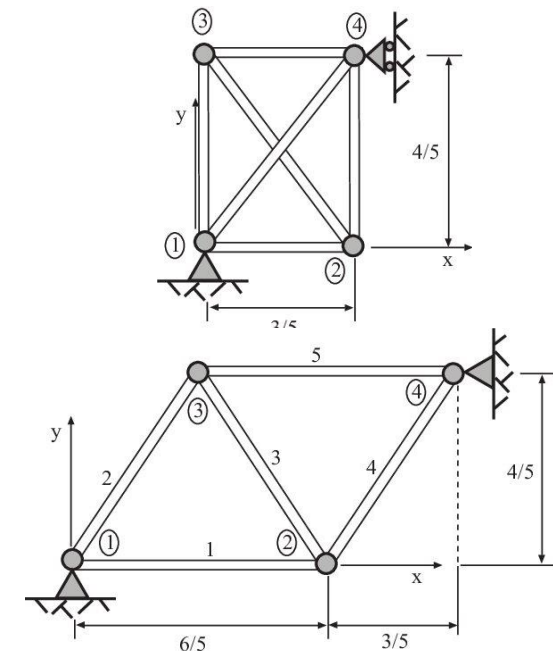
- hipostática



- isoestática



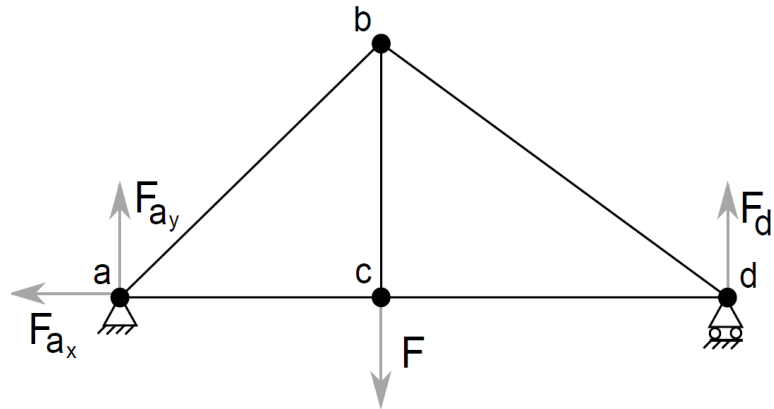
- hiperestática



# ANÁLISE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

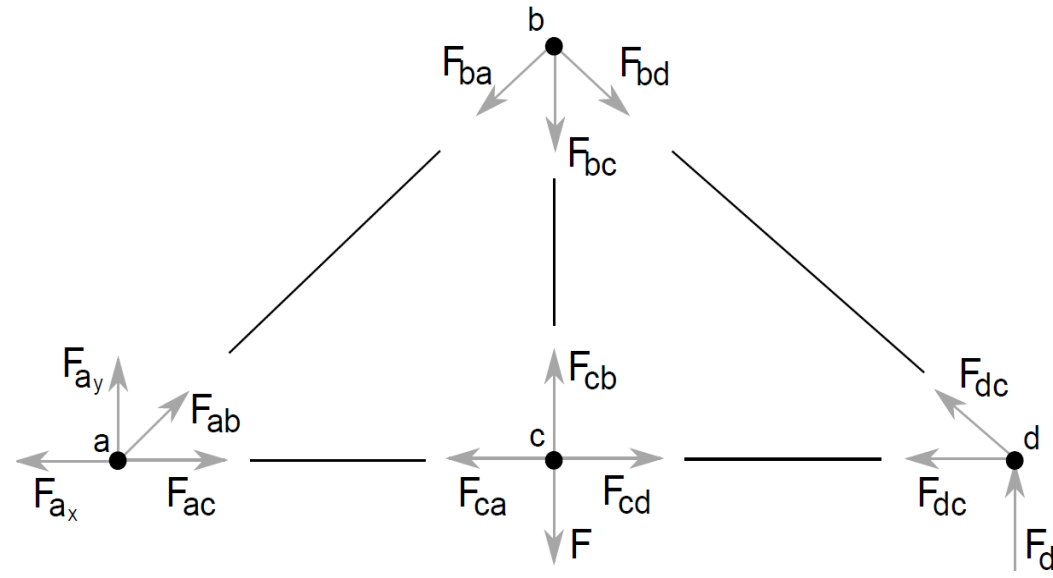
## Cálculo de forças externas

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$
$$\sum \vec{M}_o = \vec{0}$$



# ANÁLISE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

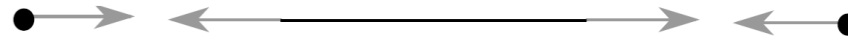
## Cálculo de forças internas



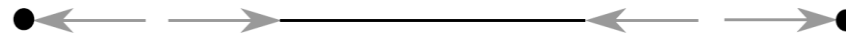
$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$
$$\vec{F}_{ij} = \vec{F}_{ji}$$

# ANÁLISE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

Barras à tração



Barras à compressão



# DESIGN DE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

Os apoios devem impedir o movimento como corpo rígido uma vez por grau de liberdade

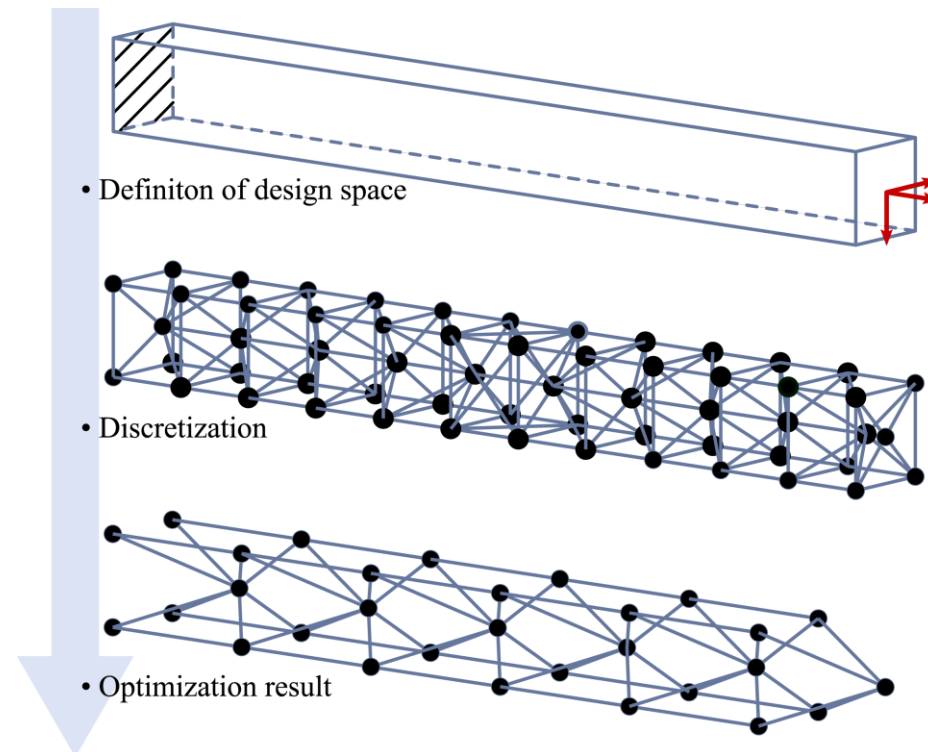
- Restrição de 3 DoF em 2D
- Restrição de 6 DoF em 3D
- Número de apoios depende do número e disposição de barras

O movimento (rotação) de cada barra deve ser restrito apenas uma vez pelas restantes barras

- A organização espacial de barras promove a rigidez da estrutura
- Barras apenas sujeitos a tração podem ser substituídos por elementos flexíveis
- Barras sujeitas a compressão podem (por vezes) ser substituídas pela diagonal oposta (à tração)

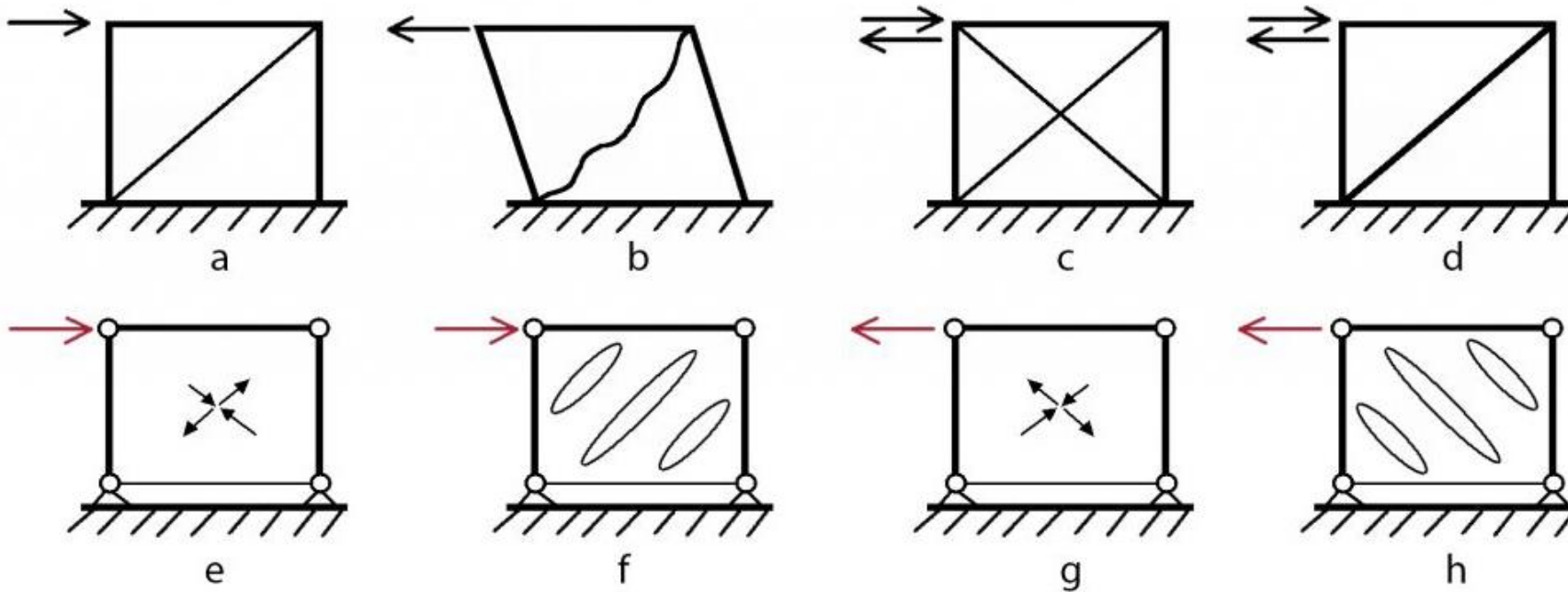
# DESIGN DE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

## Definição e otimização da geometria



# DESIGN DE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

## Definição e otimização da geometria



a - c  
elementos  
flexíveis

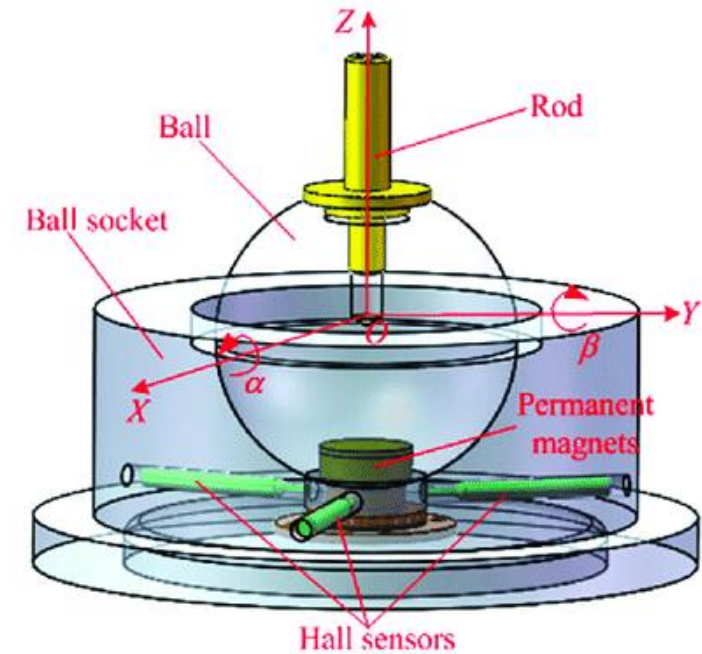
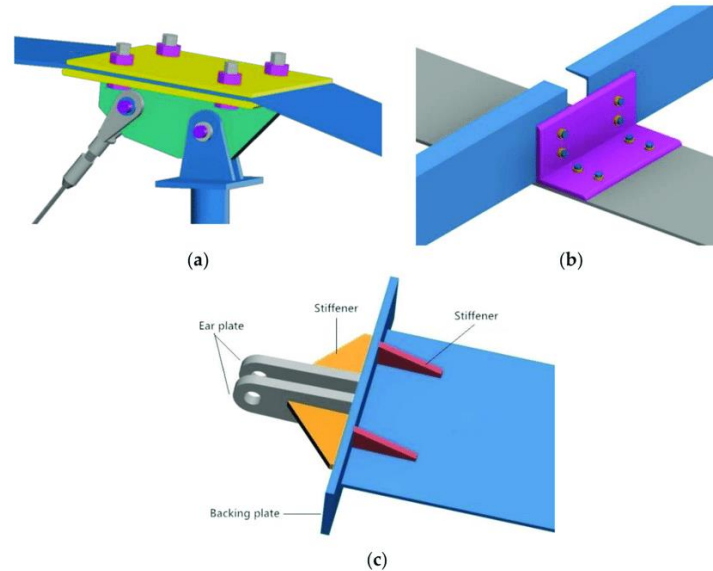
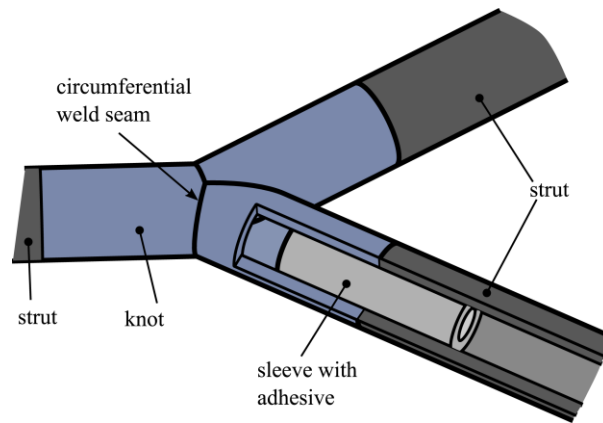
d  
diagonal  
rígida

e - h  
diagonal  
substituída  
por chapa

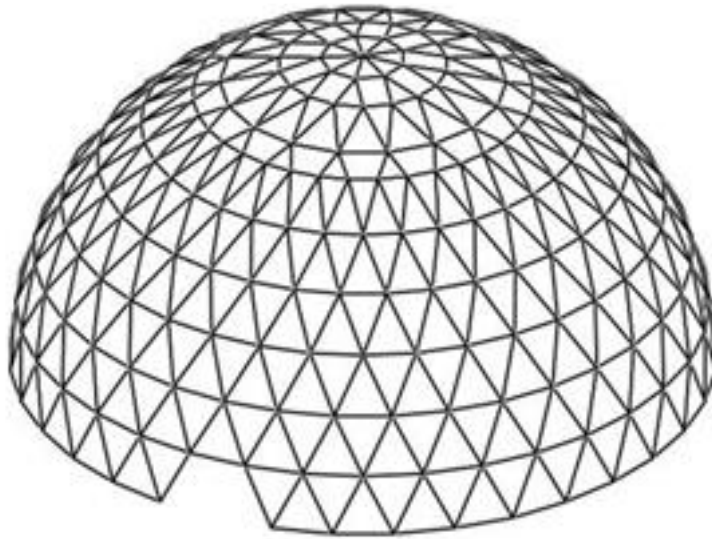


# DESIGN DE ESTRUTURAS ISOSTÁTICAS

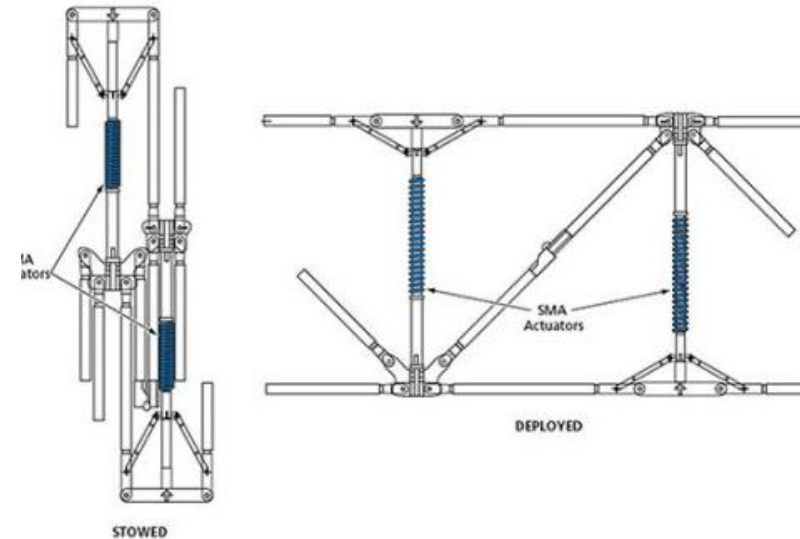
Seleção de materiais e definição do método de construção



# APLICABILIDADE DE ESTRUTURAS RETICULADAS



Estruturas de  
baixo peso



Estruturas  
reconfiguráveis