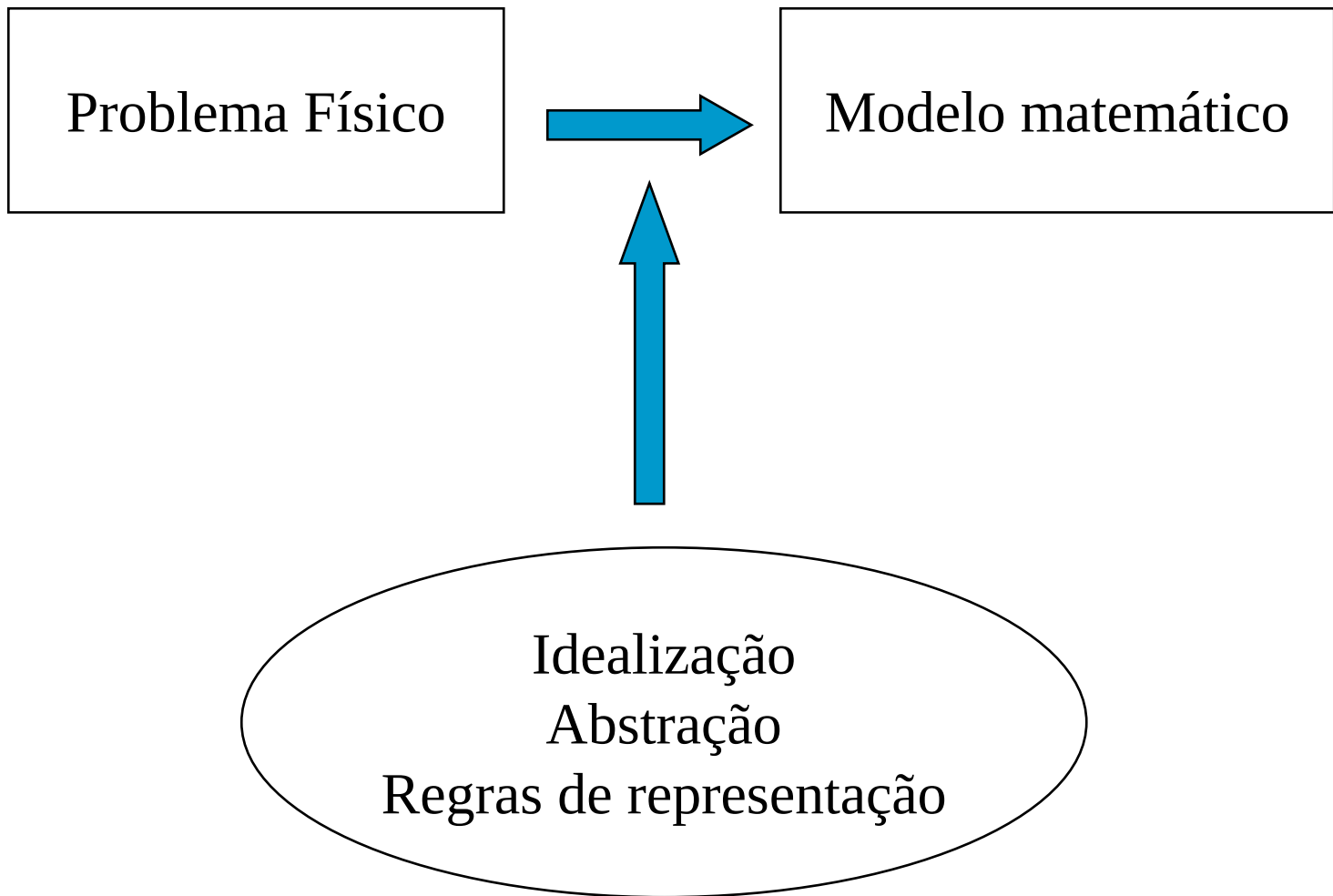


Modelagem matemática e computacional de estruturas – o processo de modelagem hierárquica



Problema Físico



Modelo Matemático 1

Modelo Matemático 2

Modelo Matemático 3

.

.

.

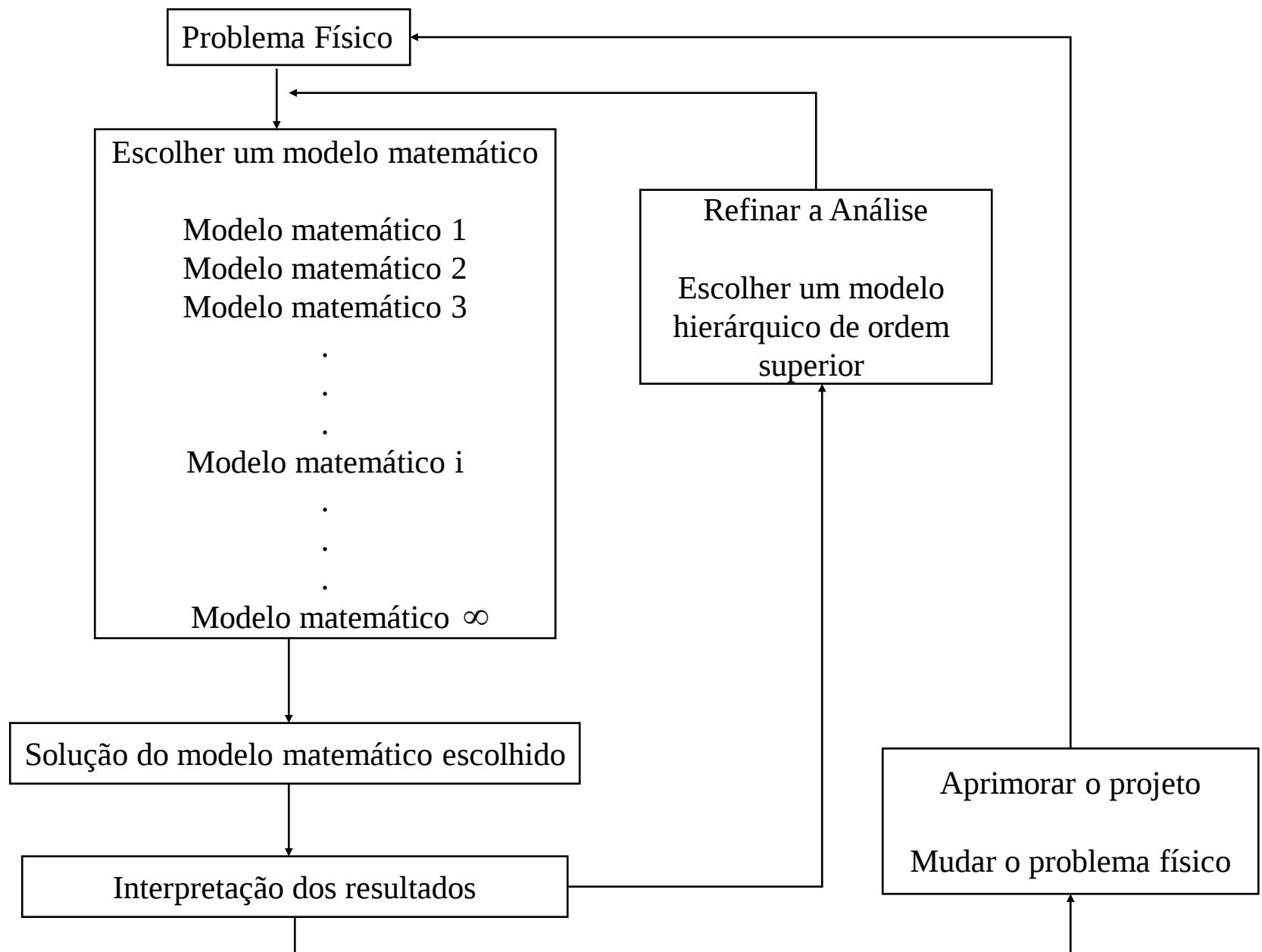
Modelo Matemático i

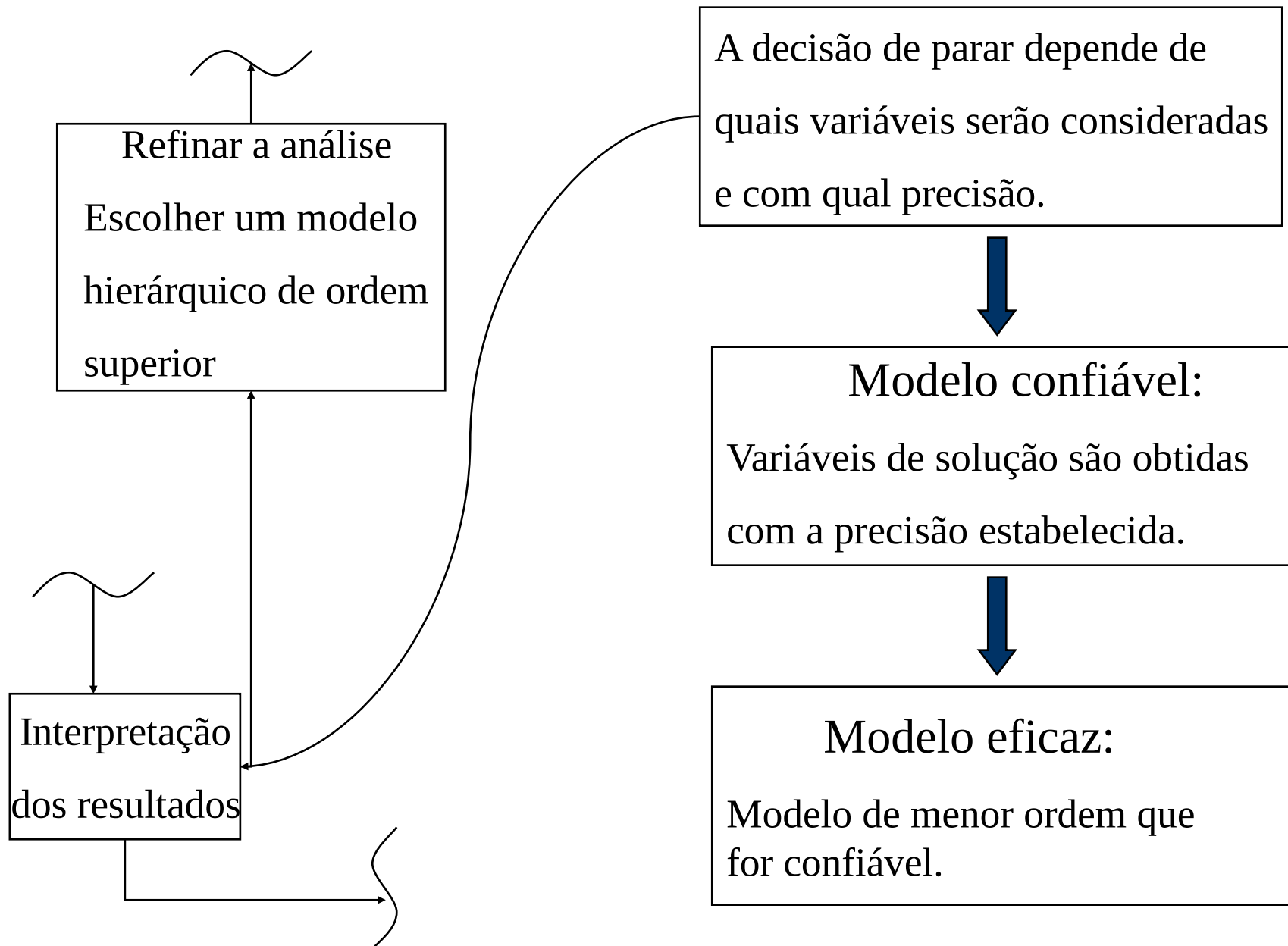
.

.

.

Modelo Matemático ∞

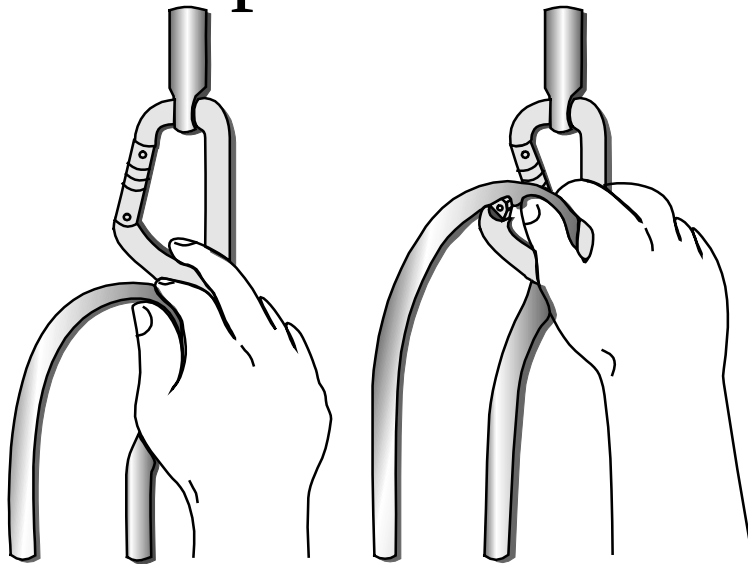




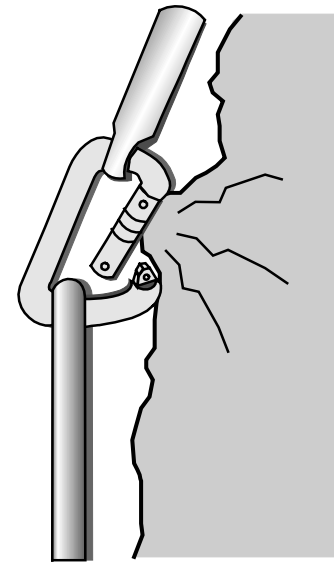
Exemplo: Grampo de Alpinismo



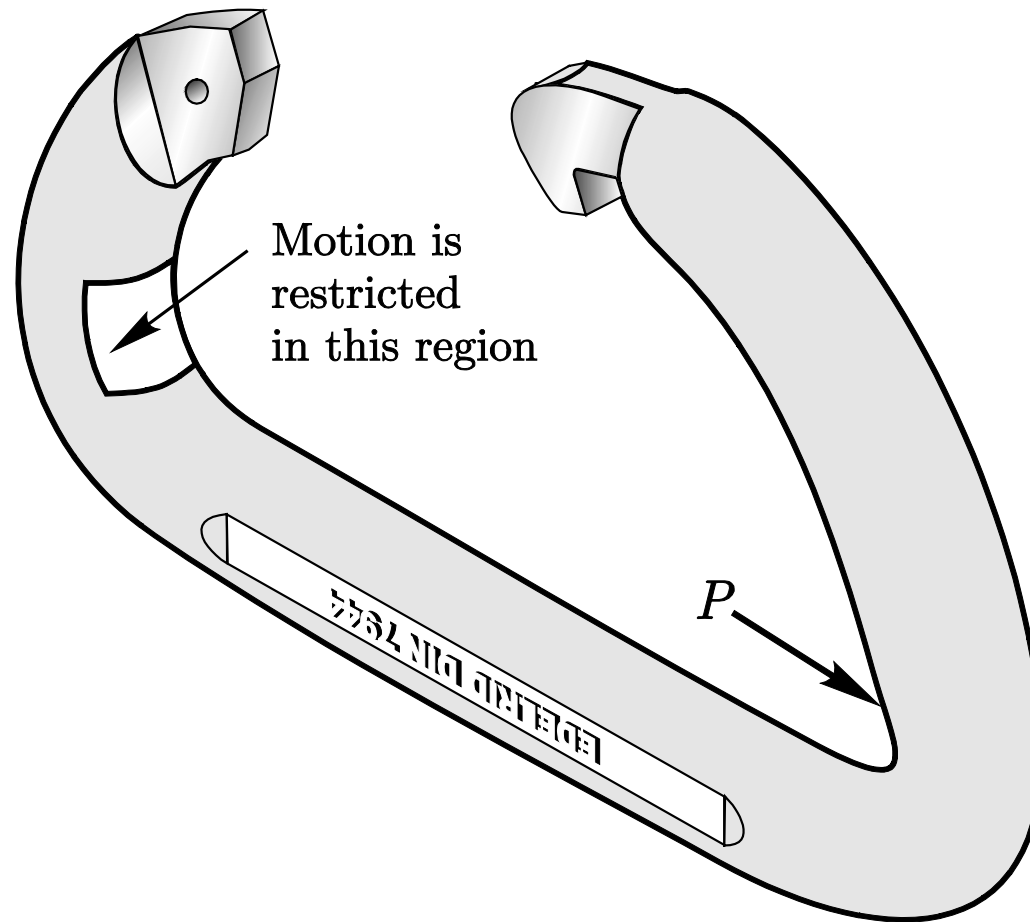
Grampo de Alpinismo

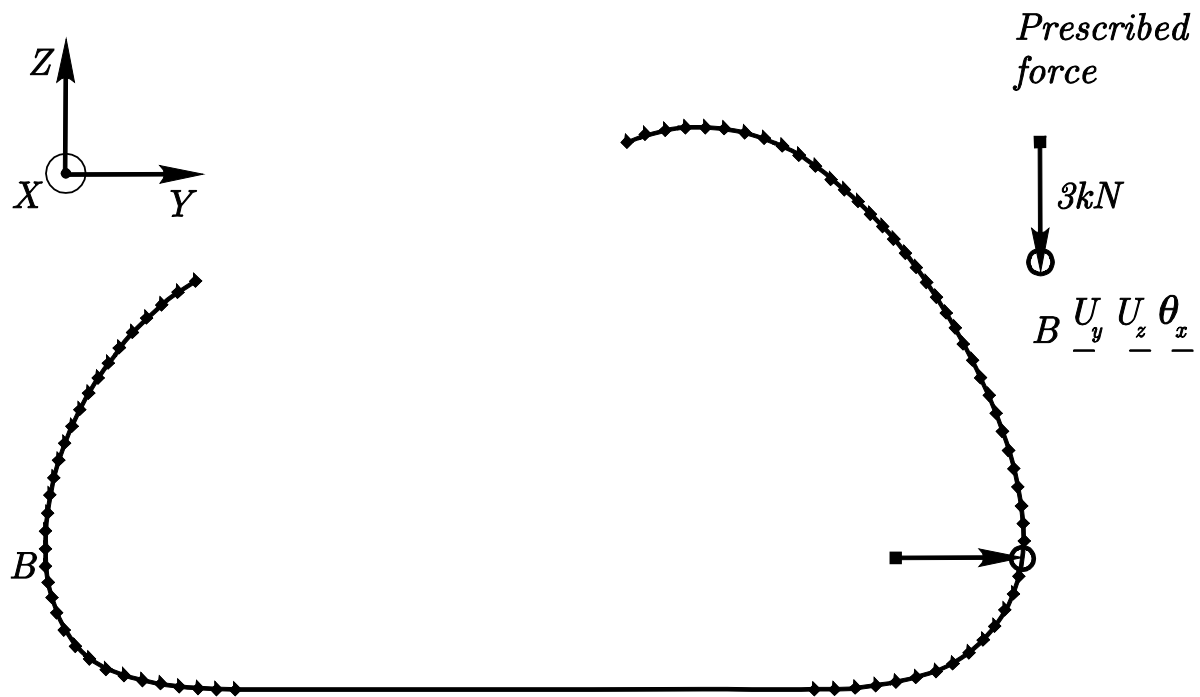


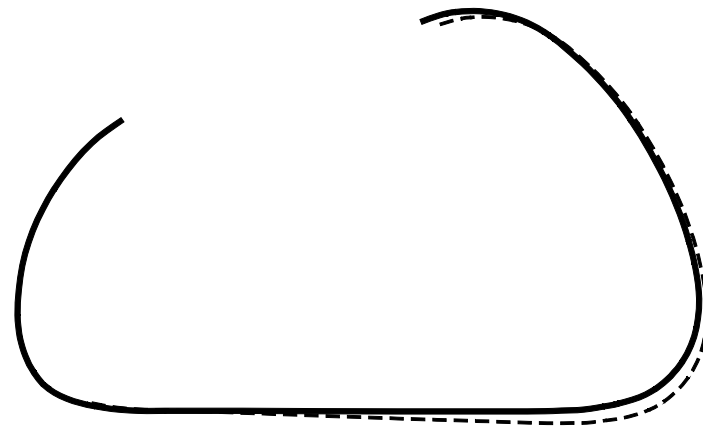
a)

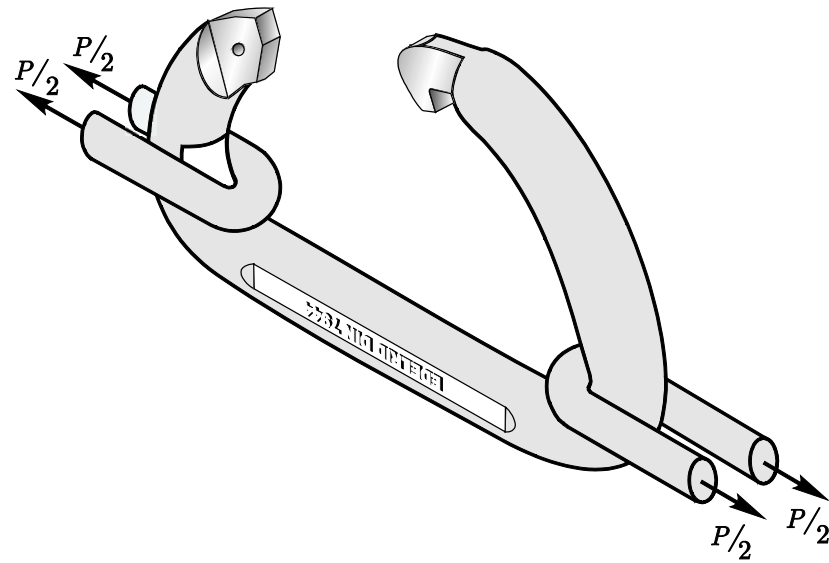


b)

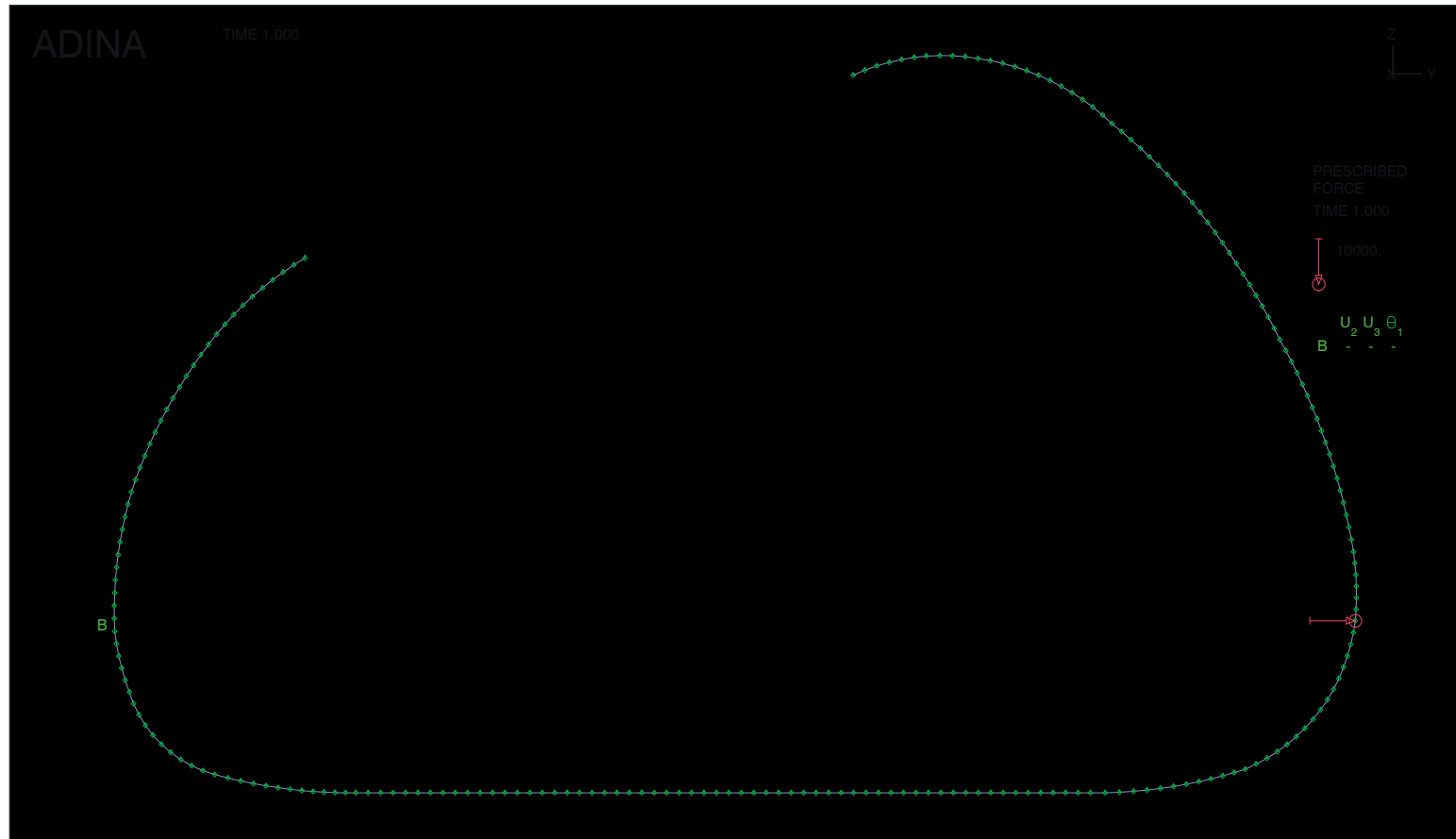




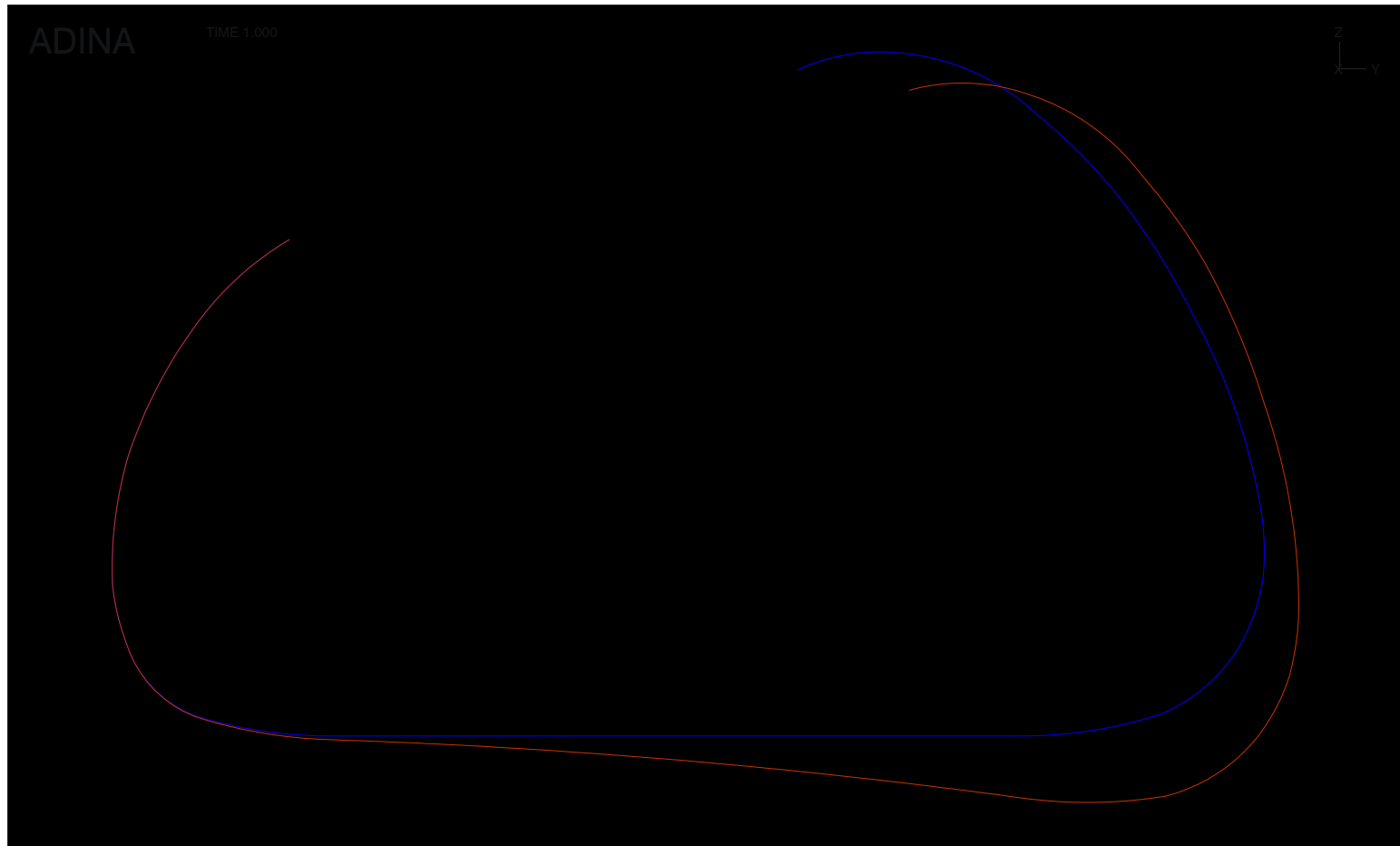




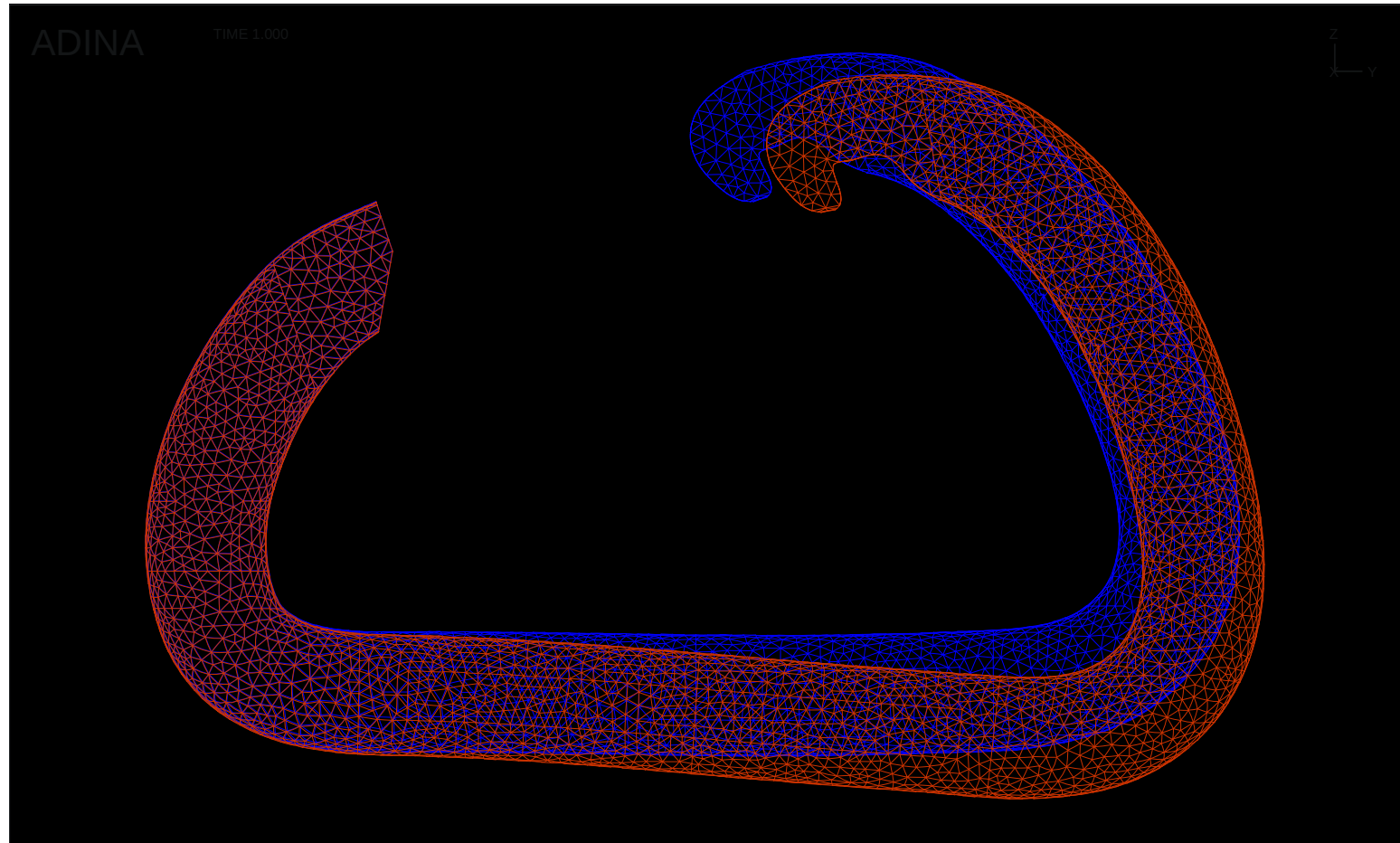
Viga

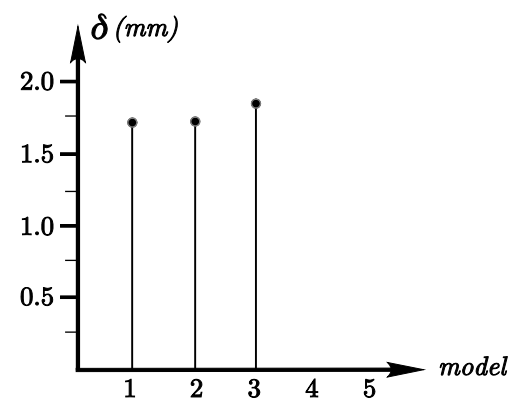
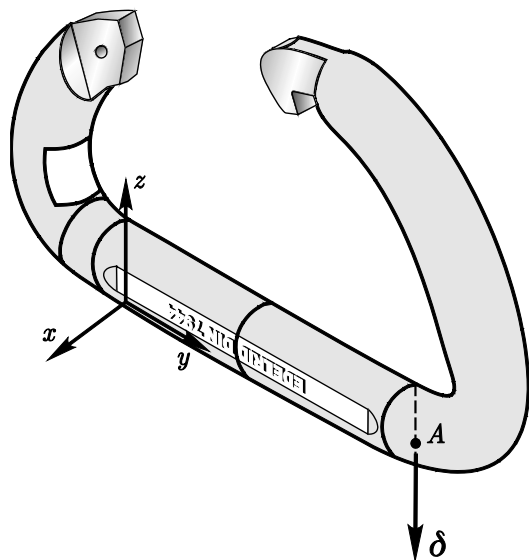


Viga

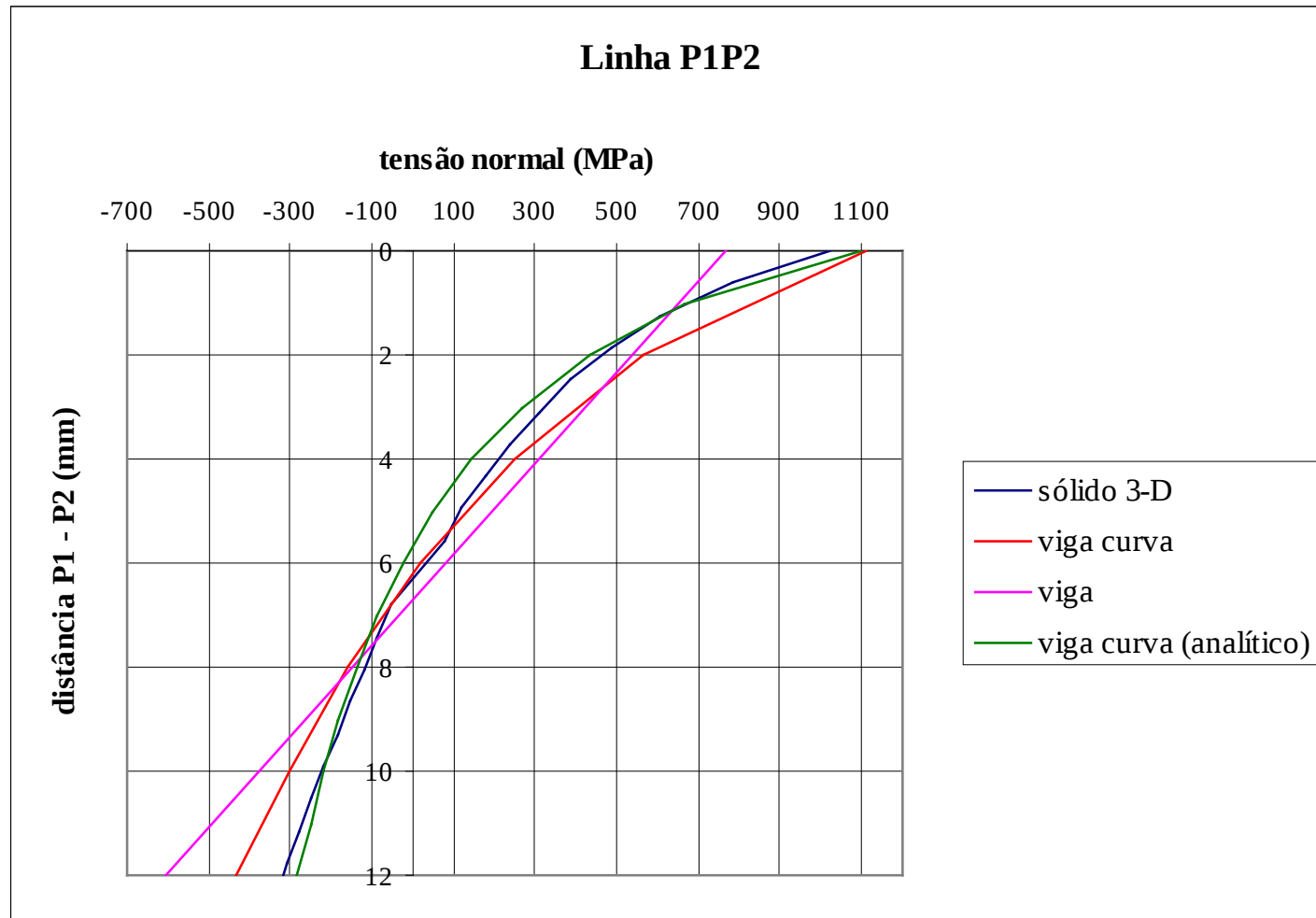


Sólido 3-D

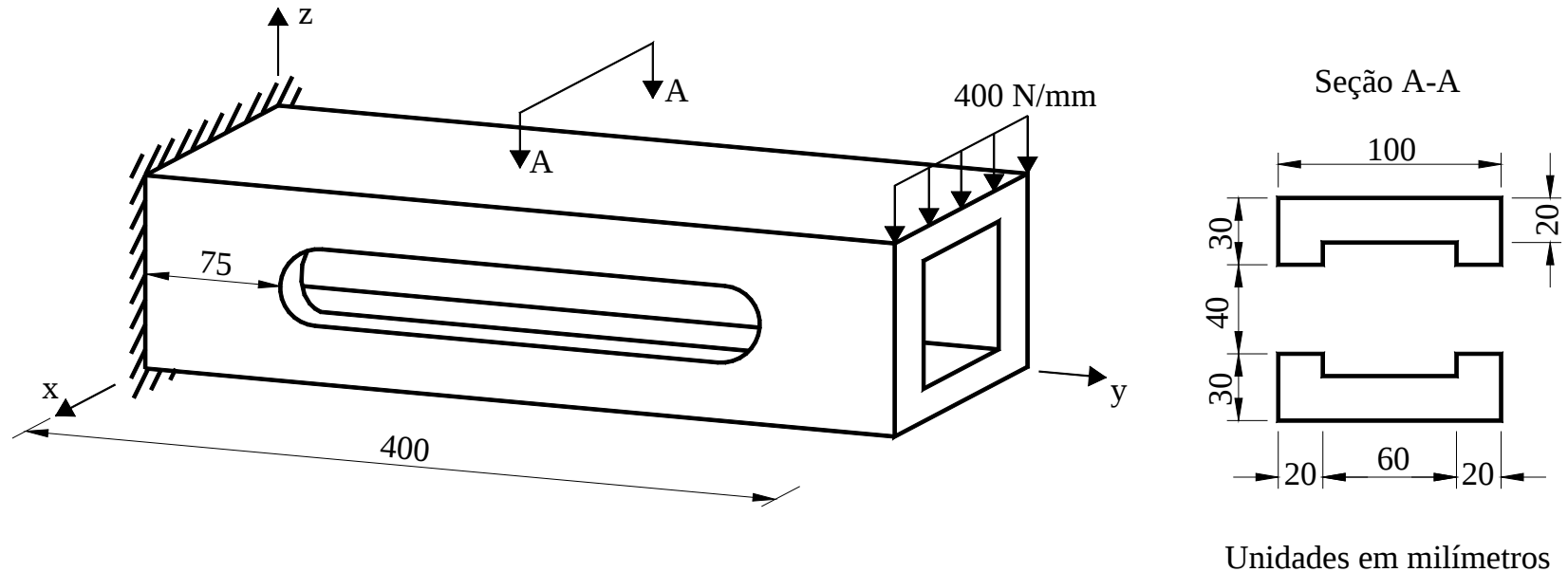




Tensão normal: P1-P2



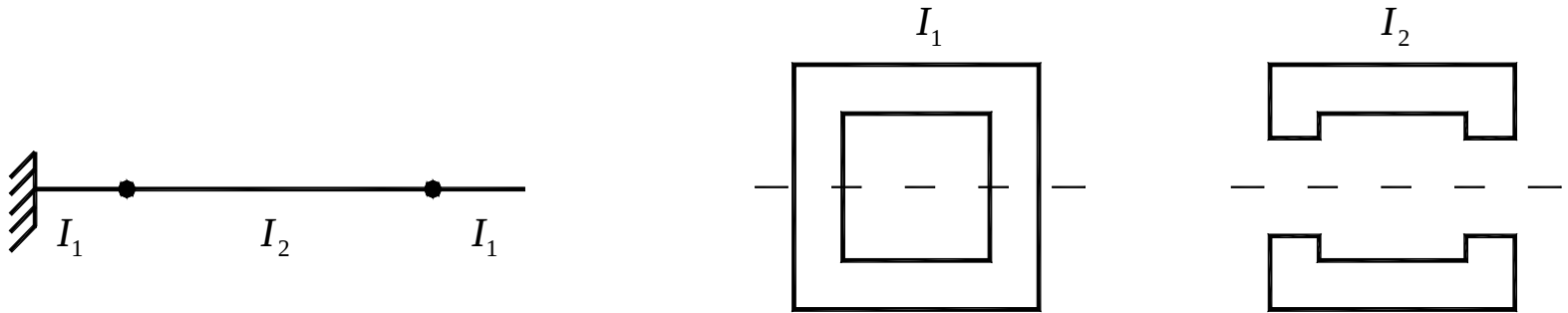
Exemplo – Modelagem de uma ferramenta de manufatura



Modelos hierárquicos

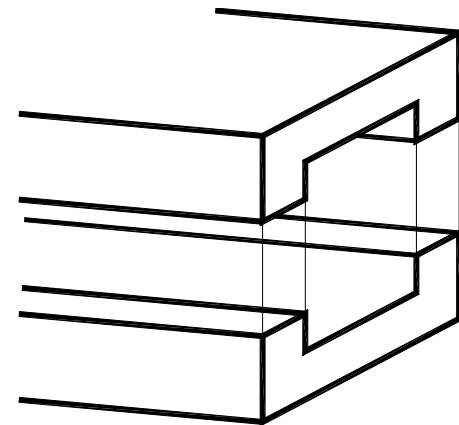
- 1) Viga de Bernoulli-Euler com ligações rígidas
- 2) Casca
- 3) Sólido 3-D

Viga

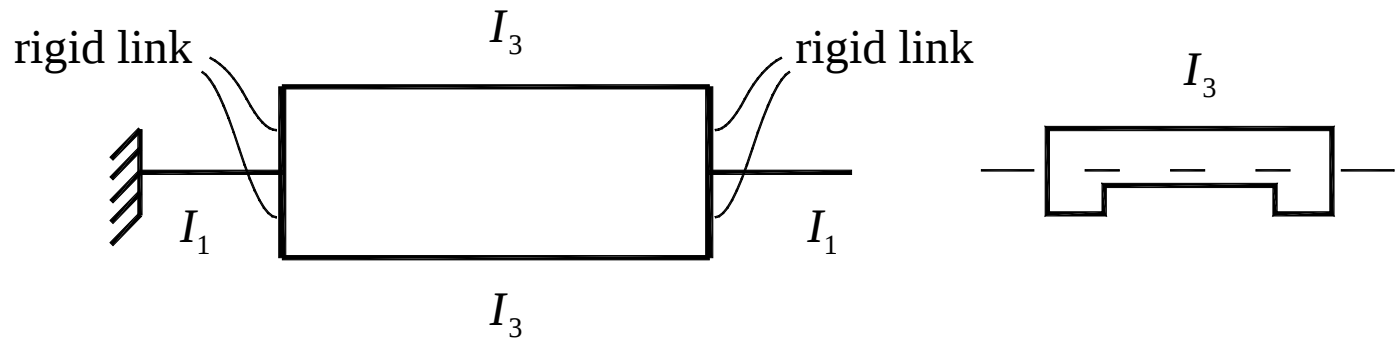


Essa modelagem não representa adequadamente o comportamento físico na região do furo

As seções na região do furo não se comportam como uma seção de viga



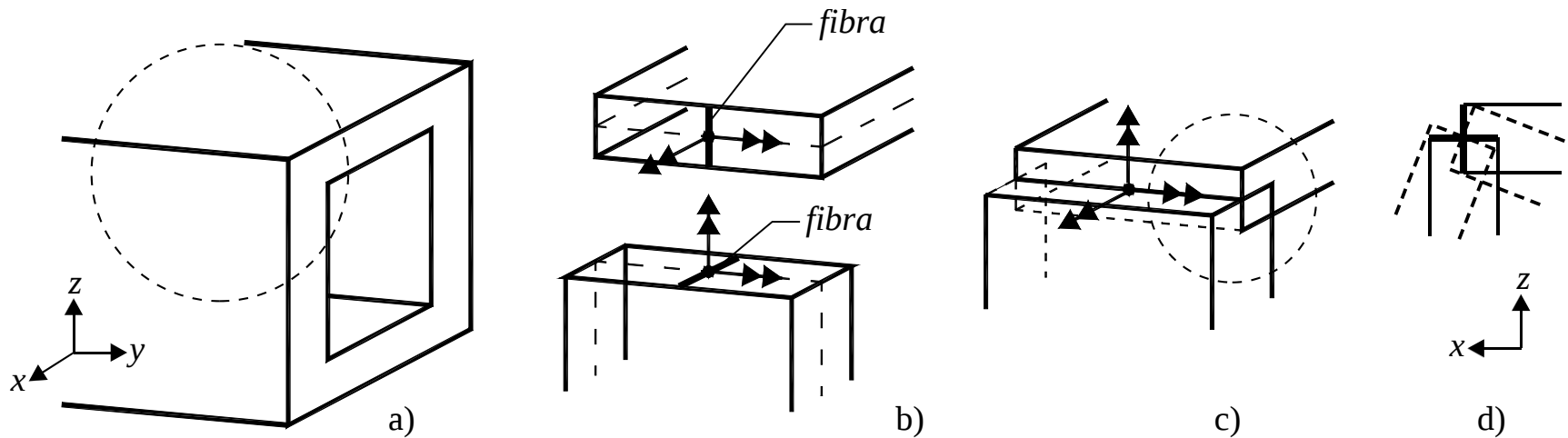
Viga com ligações rígidas



Casca

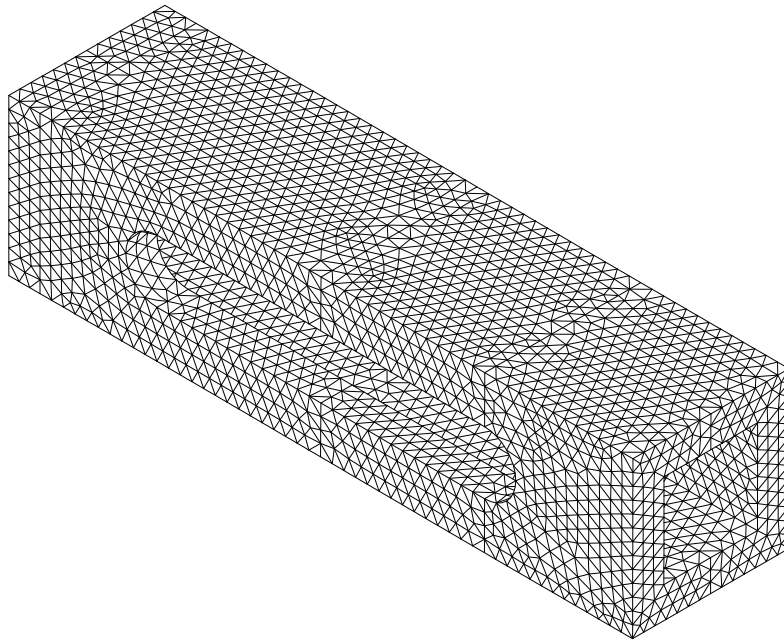
Casca

Modelagem não-completa na região dos cantos

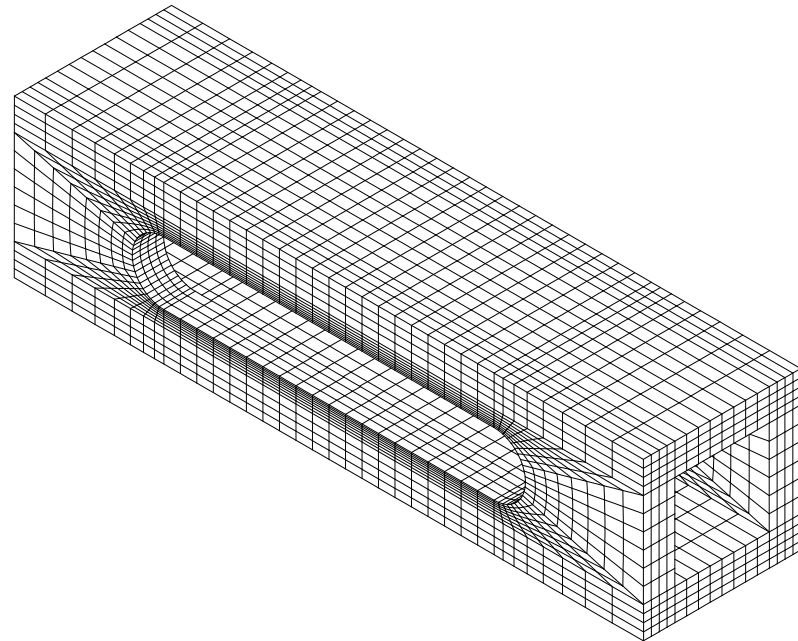


Sólido 3-D

Malha *free-form* (*advanving-front*)

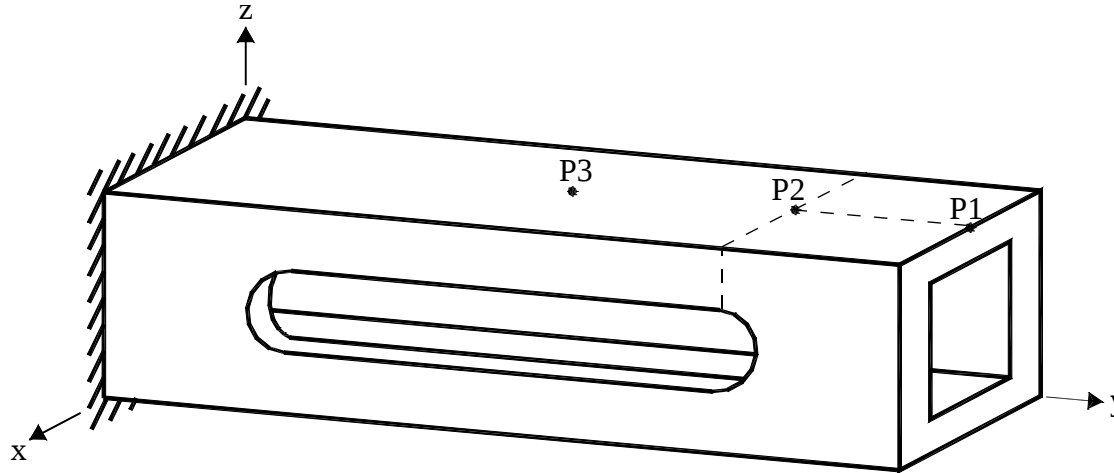


Malha mapeada



Sólido 3-D

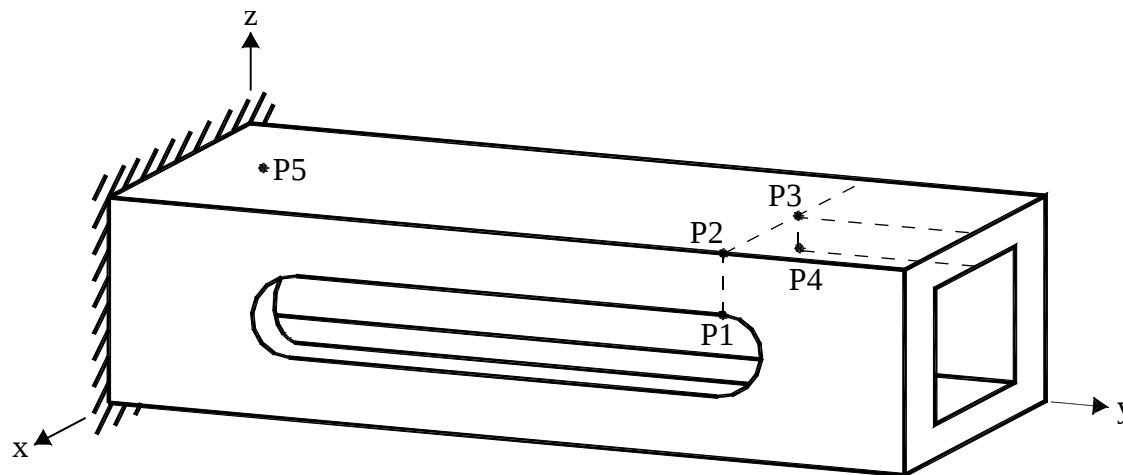
Deslocamento-z



Modelo	P1	P2	P3
Viga	-0.569	-0.370	-0.177
Viga c/ ligações rígidas	-1.358	-1.158	-0.582
Casca	-1.448	-1.175	-0.607
Sólido 3-D (malha <i>advancing-front</i>)	-1.637	-1.335	-0.688
Sólido 3-D (malha <i>mapped</i>)	-1.635	-1.336	-0.688

Modelo	P1	P2	P3
Viga	0.348	0.277	0.257
Viga c/ ligações rígidas	0.831	0.867	0.846
Casca	0.886	0.879	0.882
Sólido 3-D (malha <i>advancing-front</i>)	1.001	0.999	1.000
Sólido 3-D (malha <i>mapped</i>)	1.000	1.000	1.000

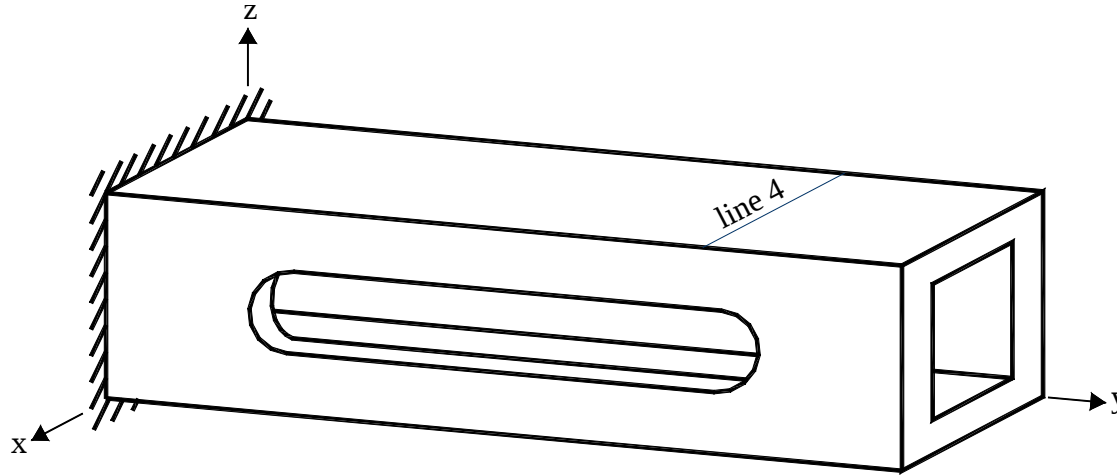
Tensão -YY



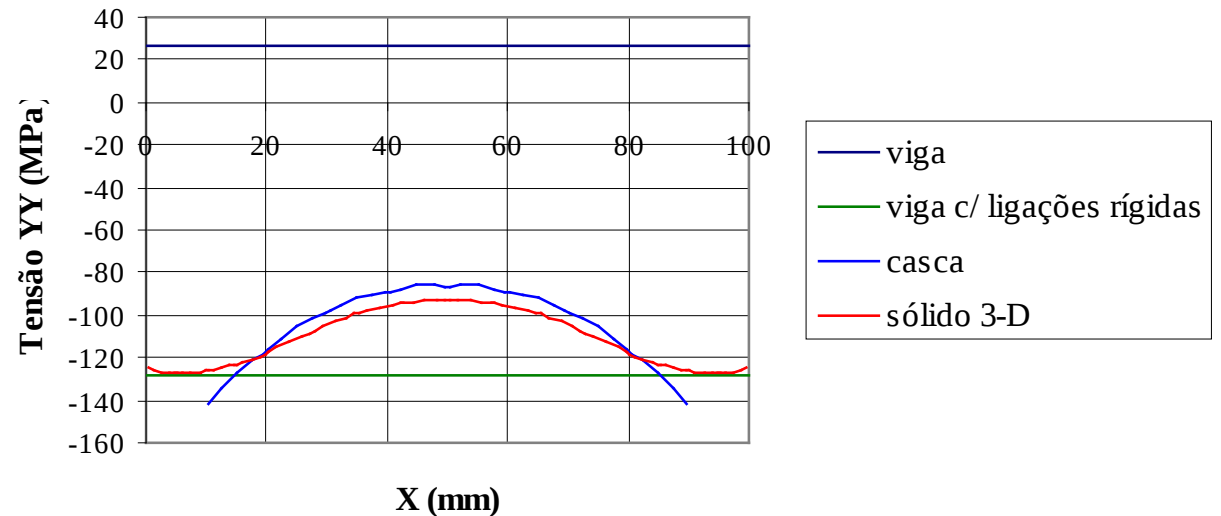
Modelo	P1	P2	P3	P4	P5
Viga	10,79	26,99	26,99	16,19	104,78
Viga c/ ligações rígidas	276,04	-128,34	-128,34	141,24	104,78
Casca	274,26	-91,12	-86,57	92,97	104,60
Sólido 3-D (malha <i>advancing-front</i>)	305,49	-127,11	-94,47	118,57	118,37
Sólido 3-D (malha <i>mapped</i>)	301,64	-128,20	-94,92	118,93	117,88

Modelo	P1	P2	P3	P4	P5
Viga	0,036	-0,211	-0,284	0,136	0,889
Viga c/ ligações rígidas	0,915	1,001	1,352	1,188	0,889
Casca	0,909	0,711	0,912	0,782	0,887
Sólido 3-D (malha <i>advancing-front</i>)	1,013	0,991	0,995	0,997	1,004
Sólido 3-D (malha <i>mapped</i>)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tensão -YY



Tensão YY - Linha 4



Escolha dos modelos matemáticos em Mecânica das Estruturas

Modelos estruturais	Tipo da análise
M1 - Trelça	A1 – Estática
M2 - Estado plano de tensões	A2 - Dinâmica
M3 - Estado plano de deformações	Cinemática
M4 - Axissimétrico	K1 - pequenos deslocamentos e deformações
M5 - Viga de Timoshenko	K2 - grandes deslocamentos e pequenas deformações
M6 - Viga de Bernoulli-Euler	K3 - grandes deslocamentos e deformações
M7 - Reissner-Mindlin	
M8 - Elasticidade tridimensional	
Carregamentos	Comportamento constitutivo
Condições de contorno	C1 - Elástico, linear e isotrópico
	C2 - Elástico, linear e ortotrópico
	⋮

Modelo matemático é definido pela escolha de:

Modelo estrutural j - M_j (ou combinação)

Tipo de análise k - A_k

Cinemática p - K_p

Comportamento constitutivo n - C_n

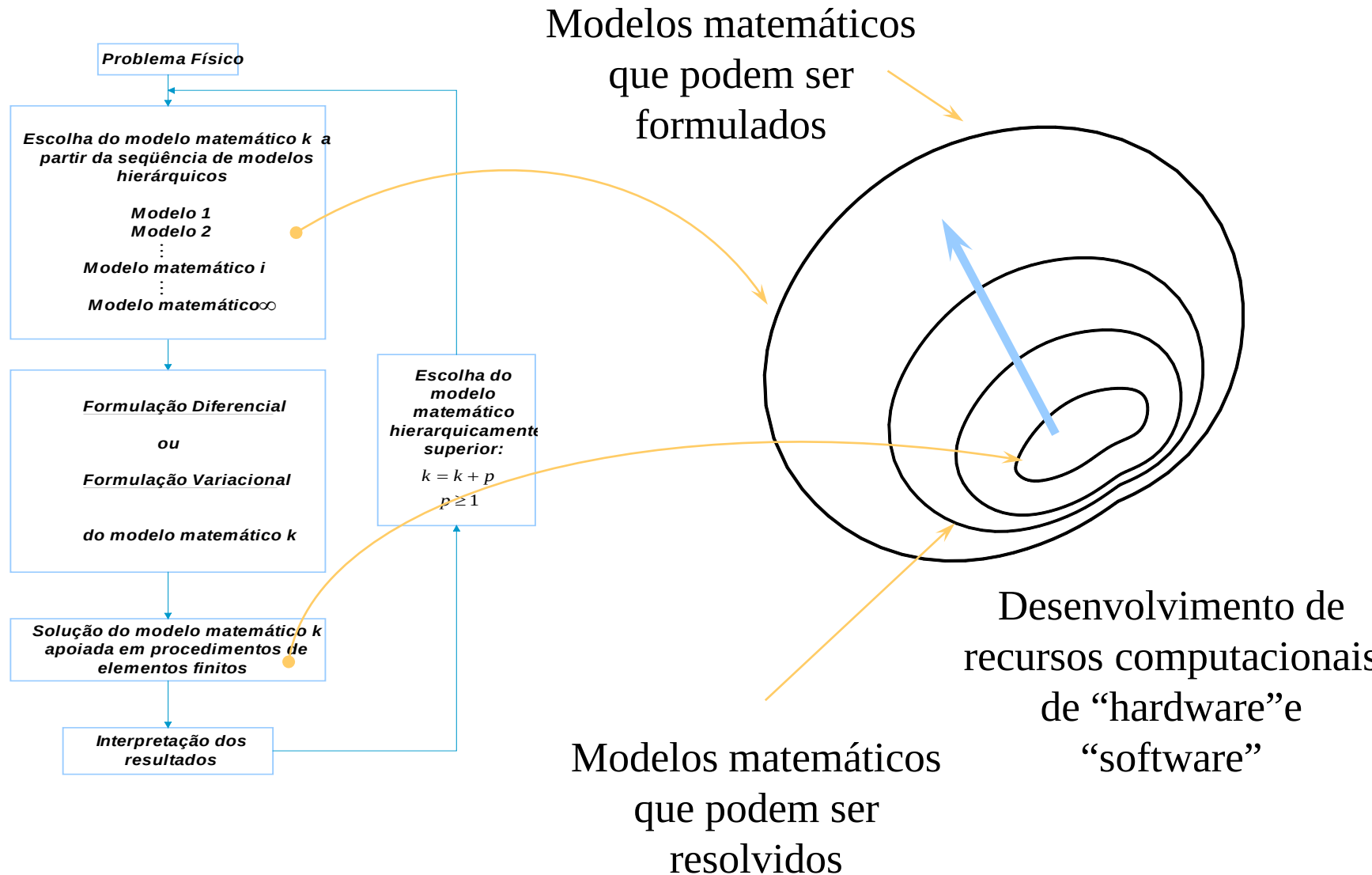
Carregamentos

Condições de contorno

Abordagem de modelagem hierárquica

- Modelos de baixa ordem permitem o entendimento do comportamento físico e a possibilidade de realizar estudos paramétricos.
- Modelos de alta ordem levam a previsões mais realistas.
- A modelagem deve ser cuidadosa:
 - É difícil julgar a resposta de modelos de alta ordem sem previamente ter resolvido modelos de baixa ordem.
 - Procedimentos de elementos finitos devem ser confiáveis.

Solução de Modelos Matemáticos Apoiada em Procedimentos de Elementos Finitos



Consequências do desenvolvimento dos recursos computacionais

- Modelos de alta ordem podem ser resolvidos em ambientes computacionais “modestos”
- Modelos de alta ordem podem ser muito valiosos para determinadas modelagens

No entanto

Consequências do desenvolvimento dos recursos computacionais

É necessário:

- Conceber os modelos
- Obter a solução
- Avaliar os resultados
- Interpretar os resultados

Consequências do desenvolvimento dos recursos computacionais

Quem conduz a modelagem precisa:

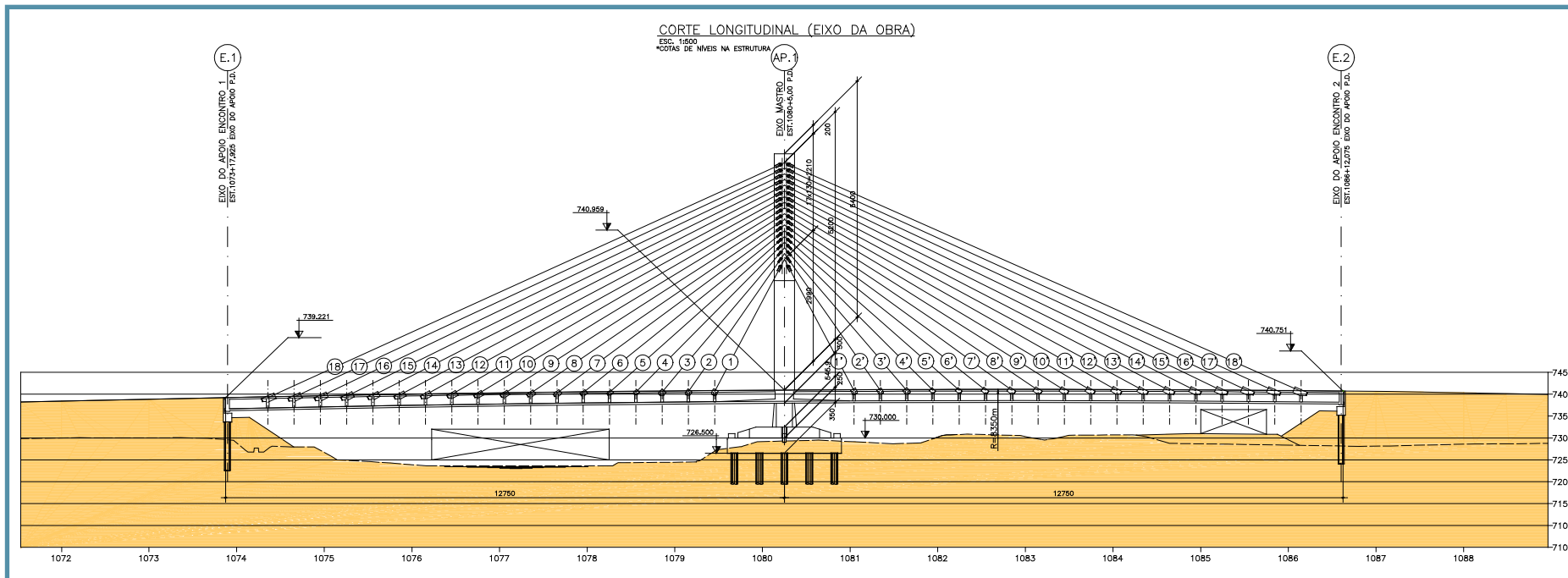
- Conhecer os modelos matemáticos envolvidos
 - formulações
 - hipóteses
 - expectativa de comportamento das soluções (“entendimento”)
- Conhecer os métodos de solução envolvidos
 - aspecto fundamental - confiabilidade

Ponte Estaiada-Complexo Jacu-Pessego

- SISTEMA ESTRUTURAL:**

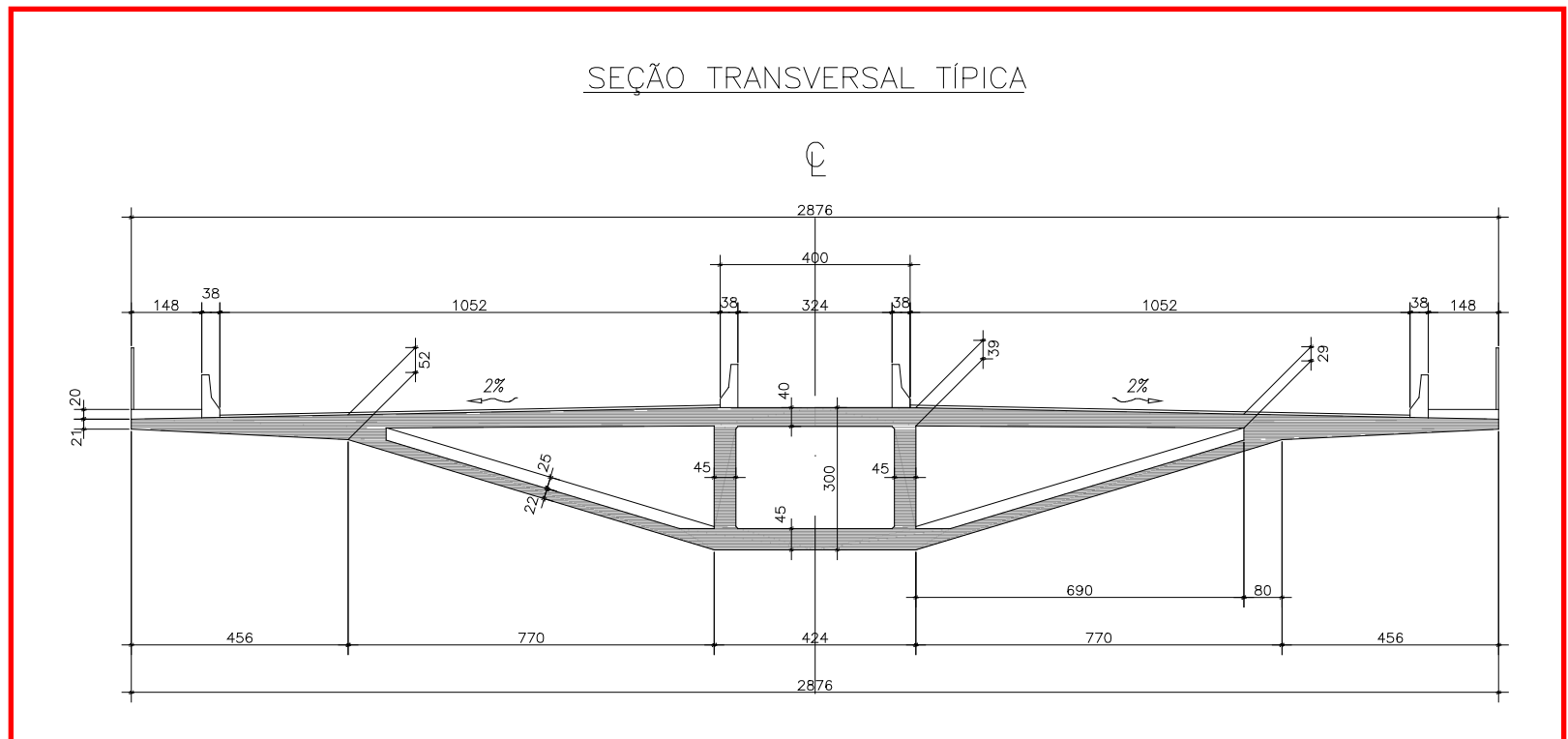
Ponte estaiada de 255,0 m de comprimento (dois vãos de 127,5 m), com pilão central de 54,0 m de altura;

➡ PROPORÇÃO $H = 0,21 \times L$



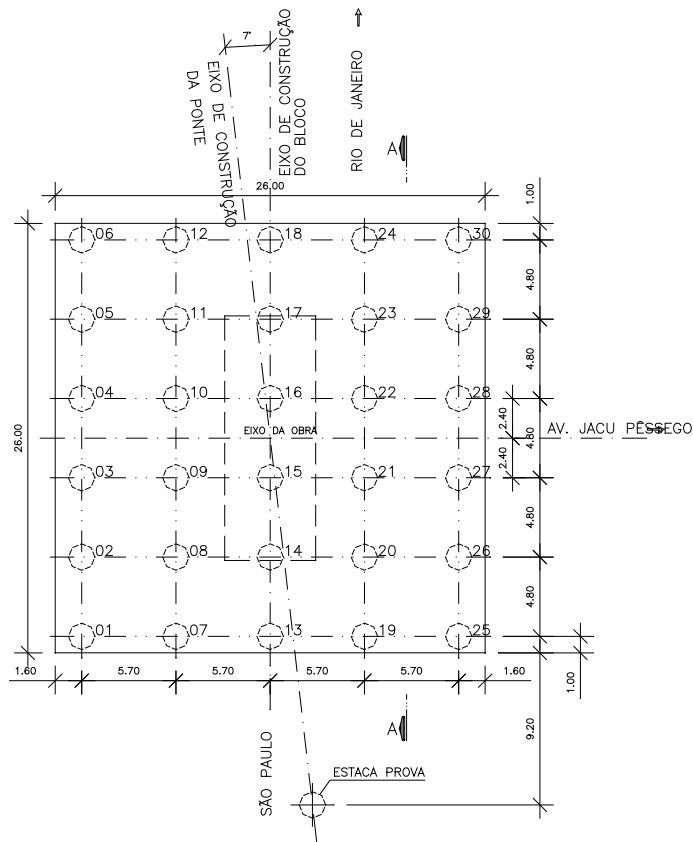
- SEÇÃO TRANSVERSAL:

O tabuleiro com largura de 29,76 m, para alojar duas pistas de rolamento com três faixas de tráfego, passeios laterais de 1,35 m e um canteiro central, foi concebido em seção celular de concreto protendido;

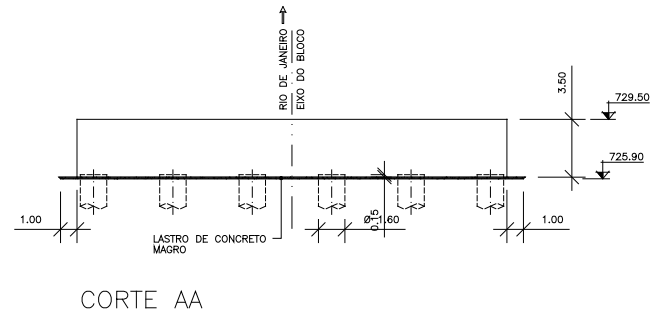


FUNDAÇÃO:

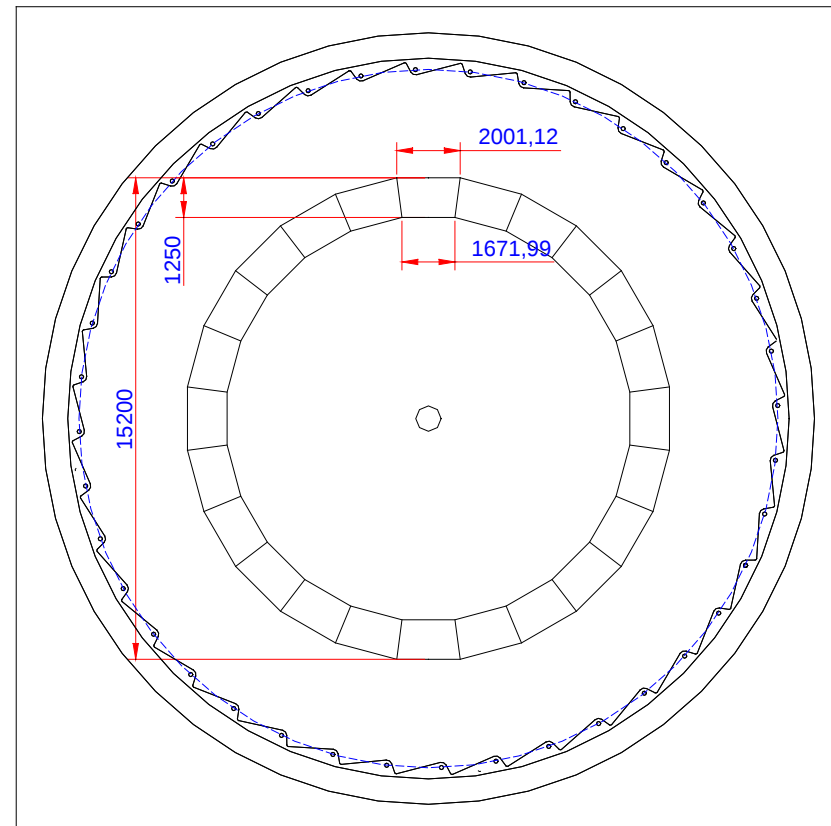
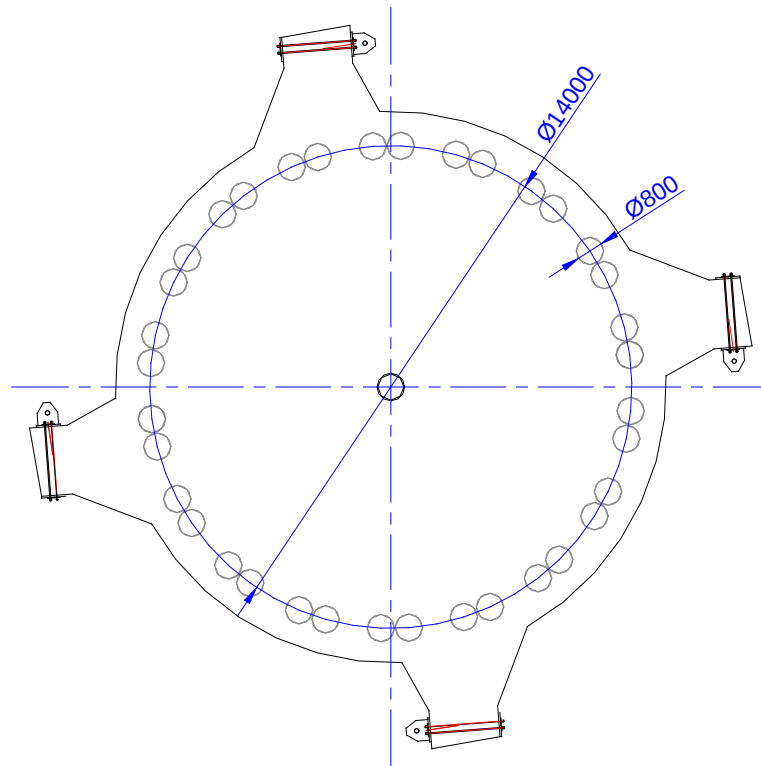
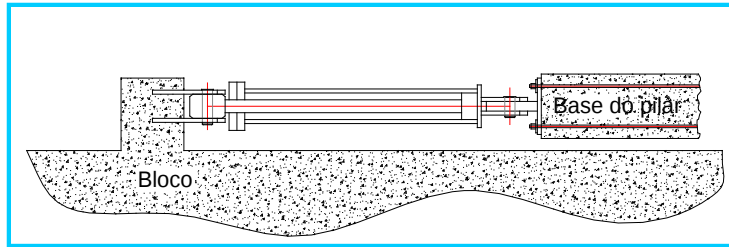
O bloco de dimensões $a \times b \times h = 26,00 \text{ m} \times 26,00 \text{ m} \times 3,50 \text{ m}$ (volume de concreto = 2.360 m^3), suportado por 30 estacas escavadas com lama betonítica de diâmetro $\phi 160 \text{ cm}$ (capacidade de 900 tf) e comprimento estimado de $22,0 \text{ m}$;



LOCAÇÃO DAS ESTACAS – PLANTA

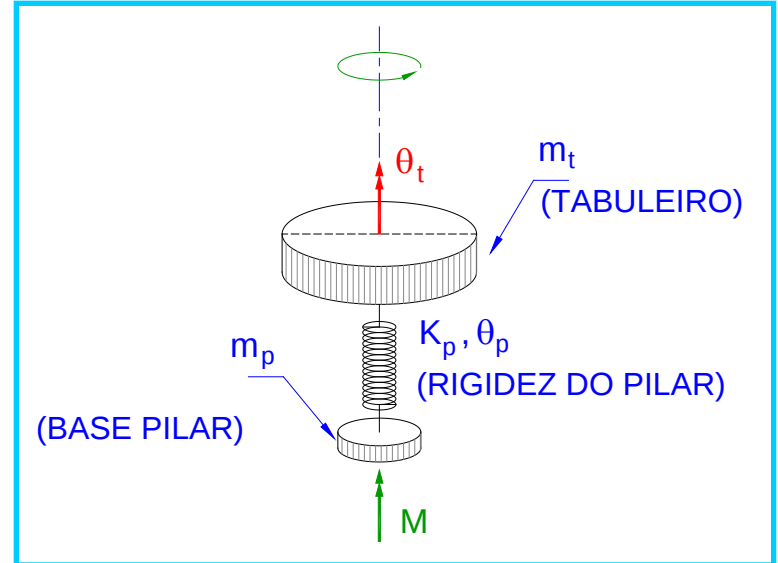


- ✓ Aparelhos metálicos provisórios são posicionados em torno do centro de giro, sobre uma pista de rolamento composta por um anel segmentado de aço carbono de 15,20 m de diâmetro externo e 12,80 m de diâmetro interno, revestido com aço inox;

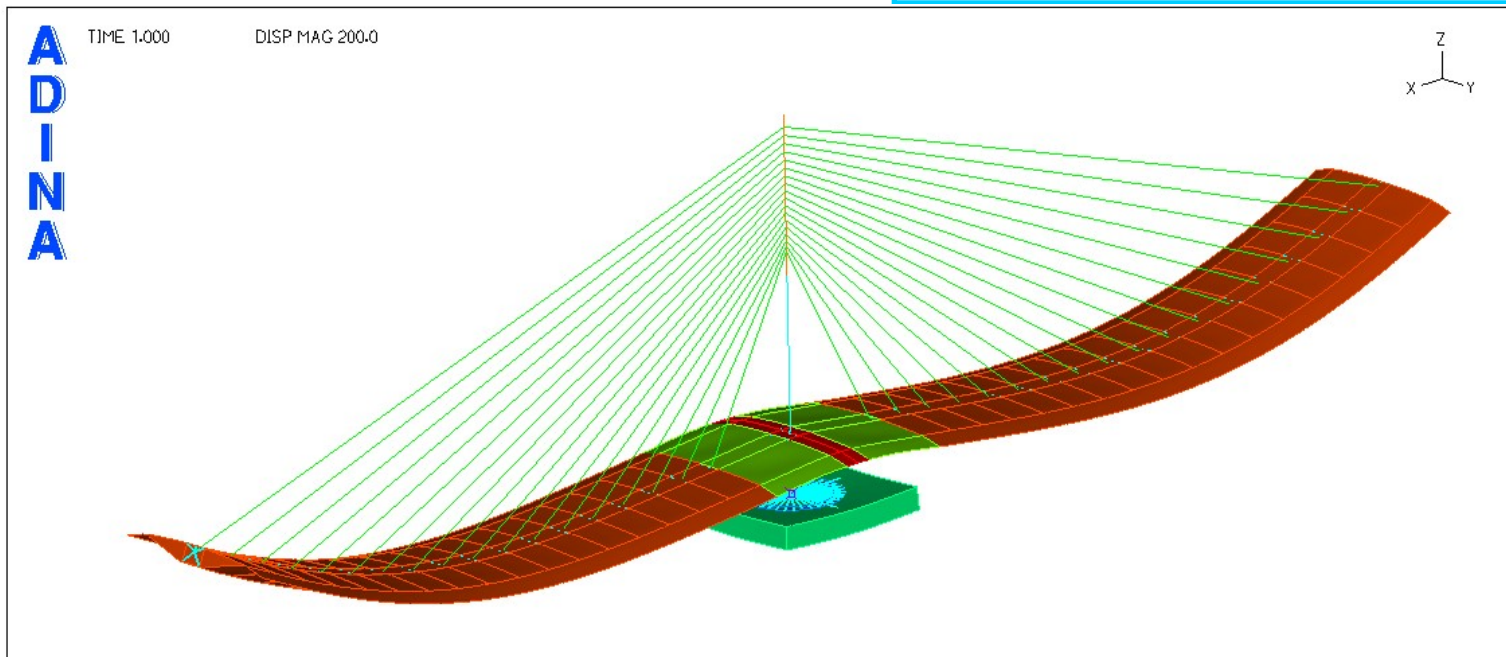


- EXEMPLOS DE MODELAGEM:

1. Modelo simplificado MASSA-MOLA :

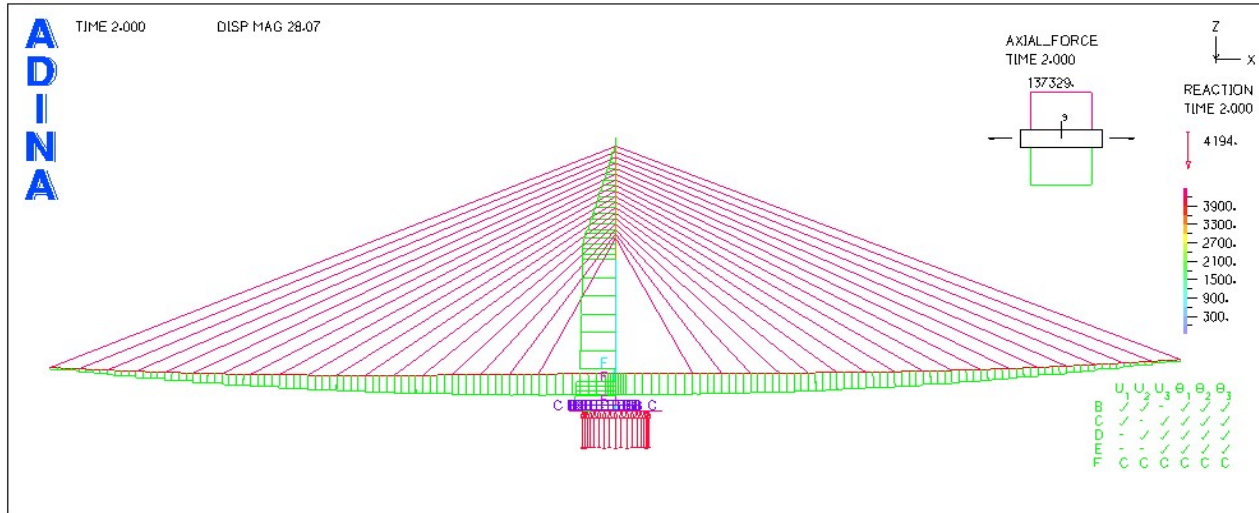


2. Modelo complexo MEF :

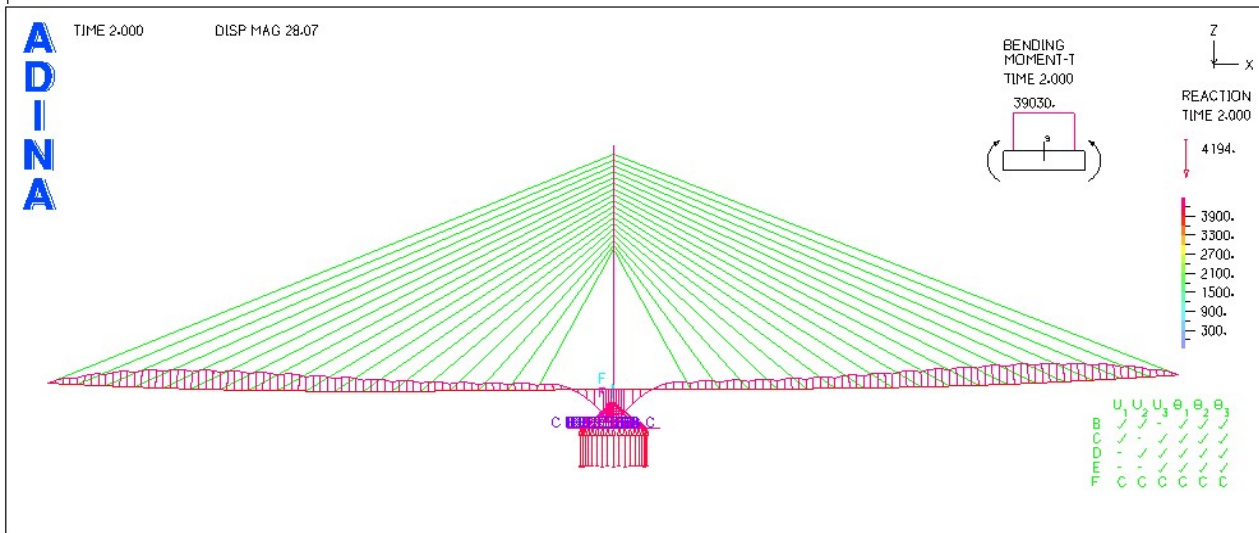


● MODELO 0:

- ✓ Análise estática elástica e linear, com a PROTENSÃO DOS ESTAIS – FASE FINAL DE EXECUÇÃO, anterior ao giro;



FORÇA
NORMAL,
Tabuleiro e Torre



MOMENTO
FLETOR,
Tabuleiro

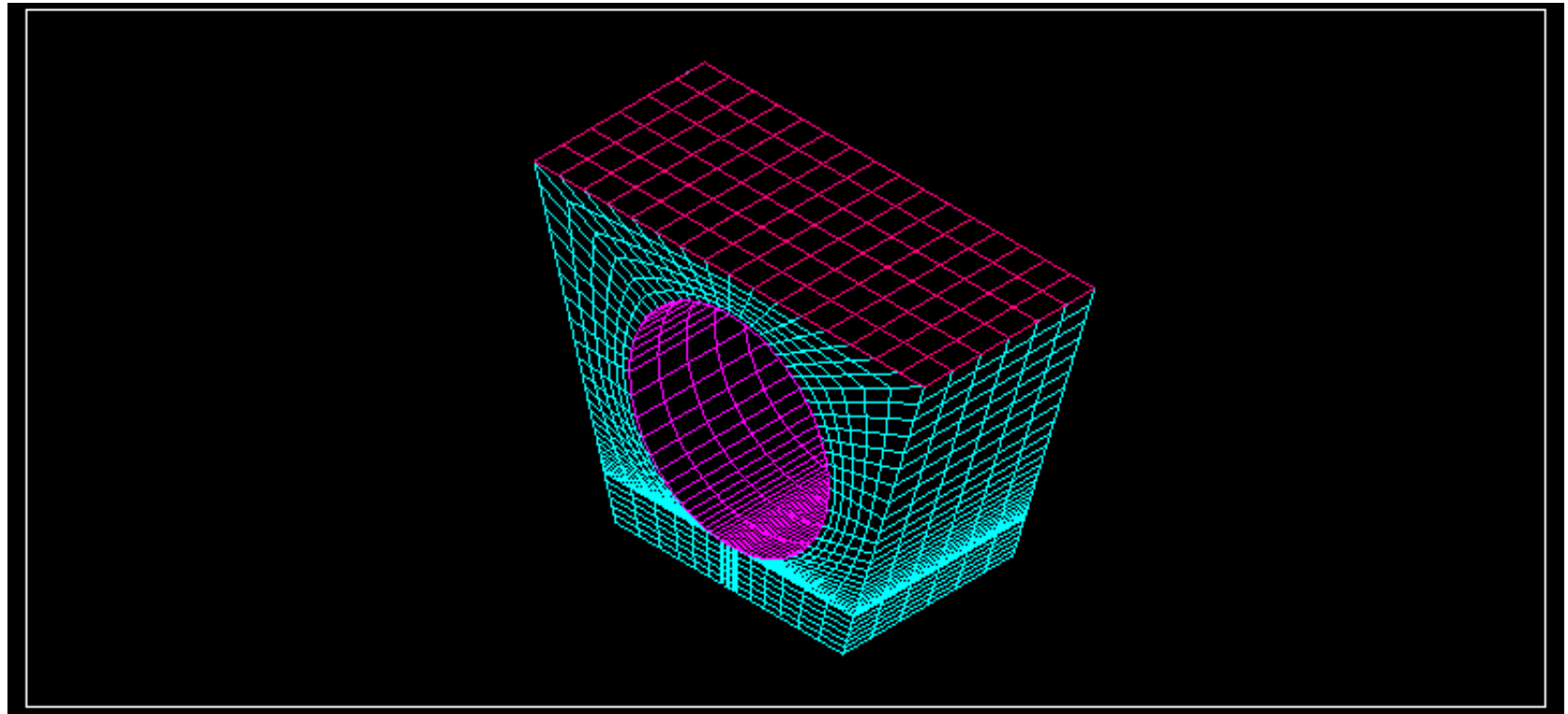
Modelagem de tubulação enterrada

- Tubulação de adução enterrada
- barragem – Conguillo, Equador
- ~ 1500 m de tubulação
- Colapso da tubulação durante recuperação do nível d'água

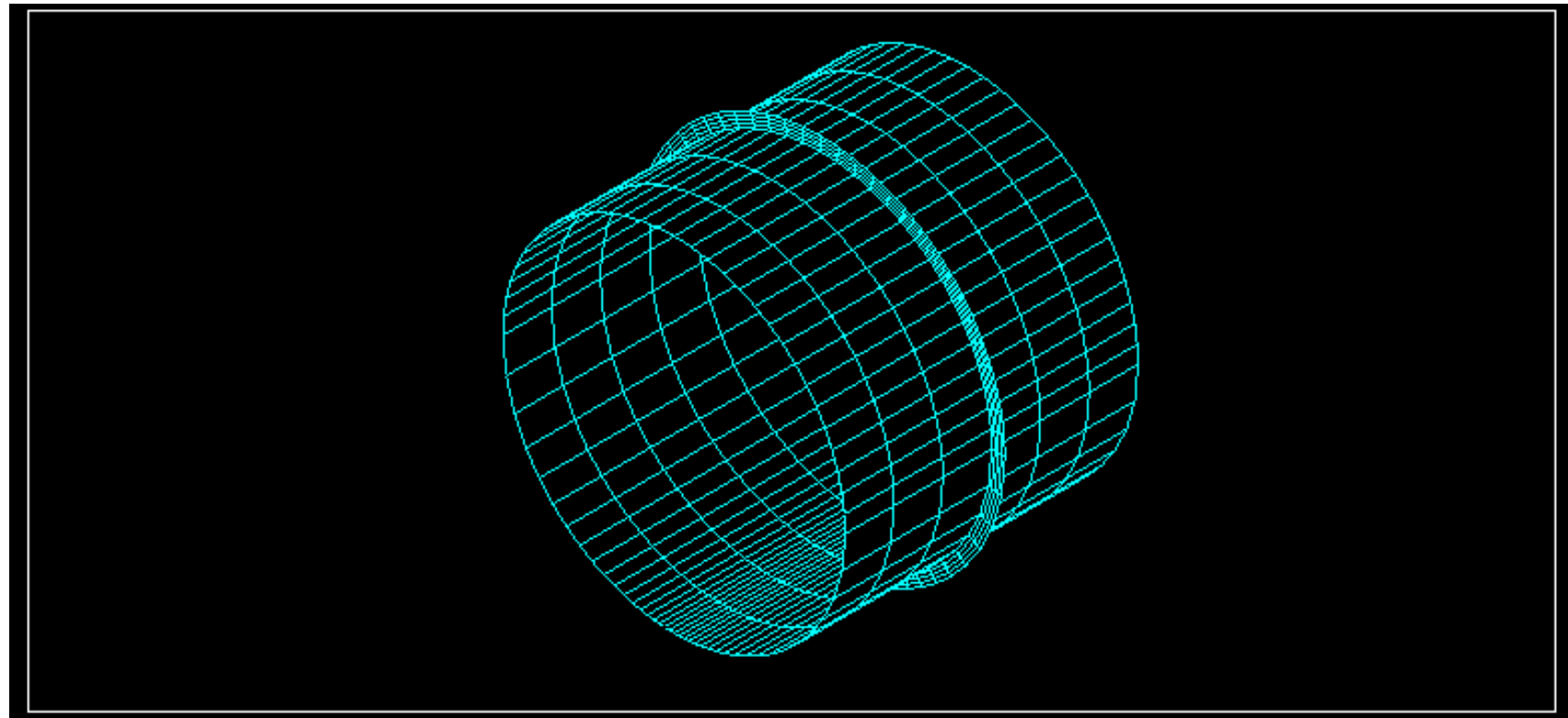
Modelagem

- Modelo geometricamente bastante simples
- Entendimento do comportamento fundamental
- Modelo de hierarquia superior – necessário
 - geometricamente não – linear
 - fisicamente não – linear
(comportamento elasto – plástico da tubulação metálica)

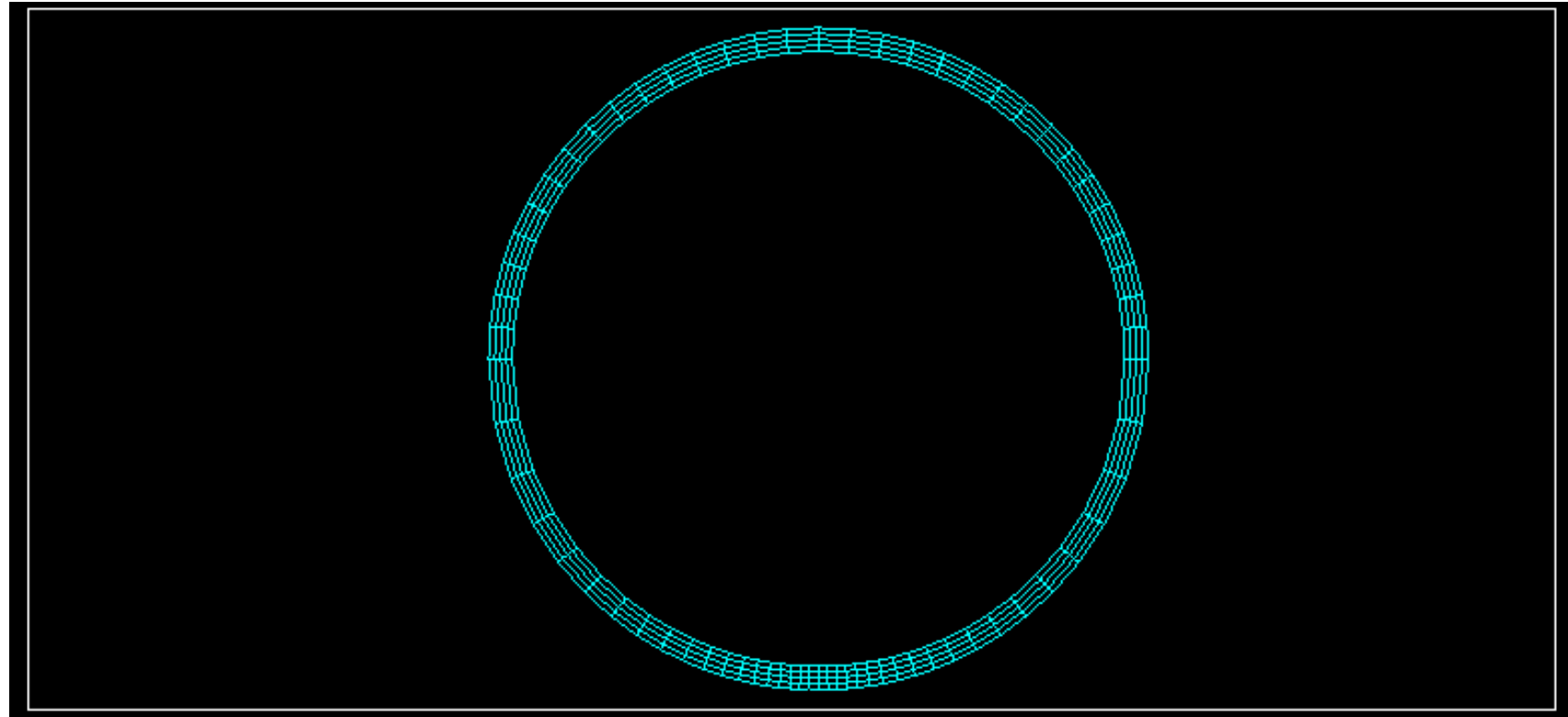
Resposta incremental do modelo



Resposta incremental do tubo enrijecido



Resposta incremental do enrijecedor



Considerações Finais

- A modelagem hierárquica é um procedimento importante e deve ser incorporada às atividades de projeto. Neste sentido, é cada vez mais importante o engenheiro de formação “conceitual”.
- Há um enorme potencial para o uso de tecnologias modernas de modelagem
- Ganhos podem ser substanciais
- Há uma enorme diferença no uso atual dessas tecnologias de modelagem quando se consideram as diferentes indústrias