



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PMR 3501**  
**Engenharia de Precisão**

**A01**  
**INTRODUÇÃO**

**2020.2**



## Informações gerais

**Docentes:** Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

Prof. Dr. Rodrigo Stoeterau

Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas

Mecânicos - Salas MS-02, MS-04

**e-mails:** ohorikawa@usp.br , rodrigo.stoeterau@usp.br

**Horário:** Quartas-feiras das 07:30 - 09:10 - Webaula

Quintas-feiras das 09:20 - 11:00 - Webaula



## Planejamento

Dia	S	Aula	Tópico	Prof.
19.08	4ª	A1	INTRODUÇÃO. Desenvolvendo máquinas de alta precisão / Precisão e acurácia. Por que alta precisão? / Estado da arte / Aspectos históricos	OH-RS
20.08	5ª	A2	Princípios de projeto de máquinas de precisão: Axioma das informações mínimas, Princípio da independência funcional, Princípio do projeto total, Princípio da folga zero / Princípio de Abbe	OH
26.08	4ª	A3	Princípio da rigidez / Minimização da dilatação térmica	OH
27.08	5ª	A4	Princípio do movimento suave / Princípio do projeto cinemático / Princípio da compensação de erros / Limite superior da precisão de usinagem	OH
02.09	4ª	A5	<b>Exercícios -1</b>	OH
03.09	5ª	A6	Princípios de usinagem: Erros da usinagem / Usinagem <i>in-situ</i>	OH
08.09	4ª	A7	Princípio do copiamento / Princípio da evolução / Princípio de Abbe	OH
10.09	5ª	A8	Metrologia de precisão: Sensores	OH
16.09	4ª	A9	Franjas de moire	OH
17.09	5ª	A10	Interferômetro a laser	OH
23.09	4ª	A11	<b>Exercícios -2</b>	OH
24.09	5ª	A12	Medição de precisão de movimento rotativo e circularidade	OH
30.09	4ª	A13	Medição de precisão de movimento linear simples	OH
01.10	5ª	A14	Medição de precisão de movimento linear composto	OH
07.10	4ª	A15	<b>Exercícios -3</b>	OH
08.10	5ª	A16	Elementos de máquinas de precisão - mancais e guias hidrostáticos	RS
14.10	4ª	A17	Elementos de máquinas de precisão - mancais e guias aerostáticos	RS
15.10	5ª	A18	Elementos de máquinas de precisão - mancais magnéticos	RS
21.10	4ª	A19	Elementos de máquinas de precisão - guias de molas	RS
22.10	5ª	A20	Elementos de máquinas de precisão - transmissores do movimento	RS
28.10	4ª		<b>Feriado</b>	RS
29.10	5ª	A21	Elementos de máquinas de precisão - conversores do movimento	RS
04.11	4ª	A22	Elementos de máquinas de precisão - atuadores	RS
05.11	5ª	A23	Elementos de máquinas de precisão - acoplamentos	RS
11.11	4ª	A24	<b>Exercícios -4</b>	RS
12.11	5ª	A25	Estruturas de sistemas de precisão: Requisitos, Materiais e Fabricação	RS
18.11	4ª	A26	Estruturas de sistemas de precisão: configurações estruturais e laço estrutural	RS
19.11	5ª	A27	Estruturas de sistemas de precisão: considerações estáticas, dinâmicas e térmicas. Erros, propagação de erros / compensação de erros	RS
25.11	4ª	A28	Materiais para componentes de precisão	RS
26.11	5ª	A29	<b>Exercícios -5</b>	RS
02.12	4ª	A30	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
03.12	5ª	A29	Apresentação de Estudo de Caso/Seminário	RS
09.12	4ª	A30		
10.12	5ª	A31		
14.12	3ª		<b>Encerramento do semestre 2020-2</b>	
06.12			Medidor tridimensional de coordenadas	



## Método de Avaliação

$$Média Final = \frac{Av_i + Estudo de Caso}{5}$$

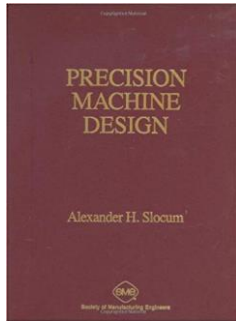
Onde:

$$Av_i = \sum Nota_i - Nota_{menor}$$

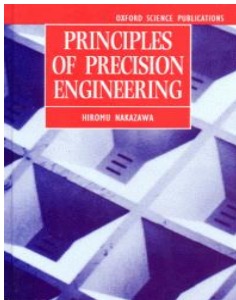
→ A frequência mínima é de 75%; alunos que se ausentarem por mais de sete aulas serão **reprovados**.



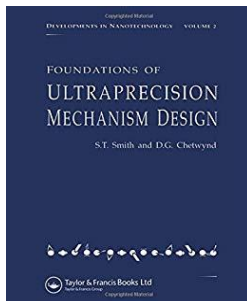
## Bibliografia



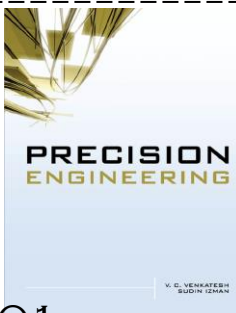
- Slocun, A. Precision Machine Design, SME, 1992 - 750 páginas



- Nakazawa, H. Principles of precision engineering, Oxford University Press, 1994 - 267 páginas



- Smith, S.T., Chetwynd, D.G.. Foundation of Ultraprecision Mechanism Design, Gordon and Breach Science Publishers, 1998.



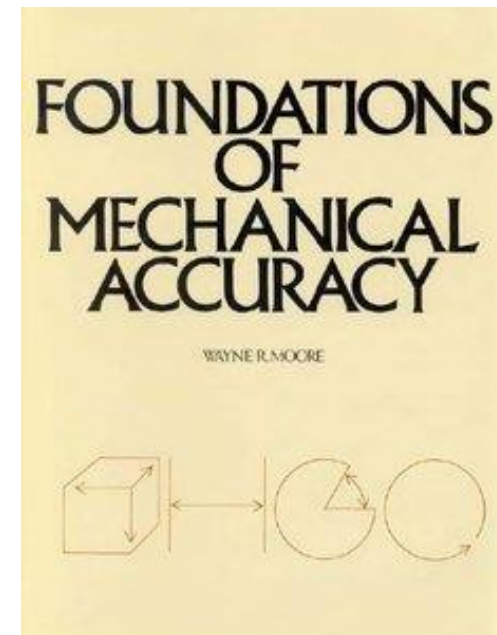
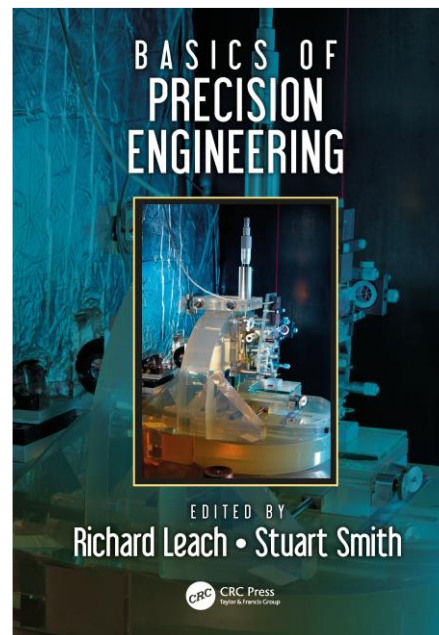
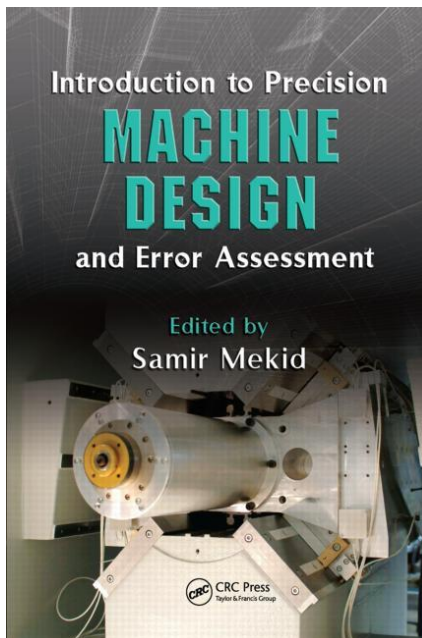
- Venkatesh, V. C.; Izman S. Precision Engineering, McGraw-Hill Publishing, 2007





## Bibliografia auxiliar

- Notas de aula e artigos disponibilizados durante o curso.





## **Introdução**

A filosofia da engenharia de precisão remonta ao início dos anos 1930, quando esta área de a engenharia foi discutida em um contexto mais amplo.

Hoje, existem órgãos renomados atuando fortemente neste campo da engenharia:

- A Sociedade Japonesa de Engenharia de Precisão (JSPE),
- a Sociedade Americana de Engenharia de precisão (ASPE),
- a Sociedade Europeia de Engenharia de Precisão e Nanotecnologia (EUSPEN),
- e a International Academy for Production Research (CIRP — Collège International Recherche Production)

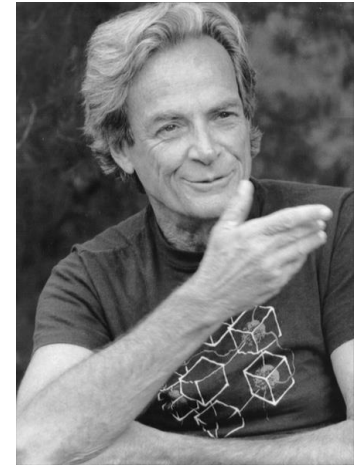
A JSPE teve origem através do esforços do Professor Tamotou Aoki da Universidade de Tóquio em 1933 e foi fundada em 1947 nos moldes da Association of Precision Machinery.

O objetivo inicial desta associação era se concentrar na pesquisa e desenvolvimento em máquinas de precisão.



**Richard Feynman (Nobel de Física), 1959.**

***“ There’s still plenty of room at the bottom”***



- *Feynman gave his famous lecture, considered the conceptual beginnings of the field of nanotechnology.*
- *Promulgated the idea of manipulating individual atoms and the notion of chemical synthesis by mechanical manipulation.*

[Richard Feynman] truly believed that if you couldn't explain something simply, you didn't understand it.

— Leonard Suskind —





**Norio Taniguchi, 1974**

was the first to coin the word **Nanotechnology**



TABLE OF CONTENTS

DNC and Automated Manufacturing System  
Problems in Designing Integrated Manufacturing Systems for Batch Production  
C. de Beer (Netherlands) .....

Controlling of Automated Manufacturing Systems by Using an Expanded DNC-System  
G. Spier, A. Pfizlold, F. Zastrow (Germany) .....

CAM Systems in Unmanned Factories  
K. Togino (Japan) .....

Nano-technology in Materials Processing (Ultra-fine Finishing)  
**On the Basic Concept of "Nano-technology"**  
N. Taniguchi (Japan) .....

The Limit of Accuracy of Machine Tools  
J.B. Bryan, E.G. Loewen (U.S.A.) .....

Ultra-fine Machining as an Ultra-fine Finishing Method  
M. Y. Miwa (Japan) .....

Some Practical Limits on the Measurement of Surfaces Using Stylus Techniques  
Whitehouse (U.K.) .....

Grinding Physics  
Development of a Model of Grinding  
S. Dojke, L.E. Samuels (Australia) .....

Statistical Mechanism of Chip Formation in Grinding Process  
J. Peklenik (Yugoslavia) .....

Chip Generation Process in Grinding  
K. Ohamura, T. Nakajima (Japan) .....

Environmental and Human Concerns in Manufacturing, with Special Consideration  
Computer-Automated Factory  
M.E. Merchant (U.S.A.) .....

Mechanical and Physical Behaviors of Material in Materials Processing  
Fracture Aspects of Metal Processing  
H. Miyamoto, S. Fukuda (Japan) .....

Processing to Achieve High Productivity and Controlled Mechanical Properties  
Machining  
J.P. Kahles, M. Field (U.S.A.) .....

The Formation of the Surface Layer in the Conventional Machining Process and  
Reduction of Them  
K. Kishi, H. Eda (Japan) .....

90

102

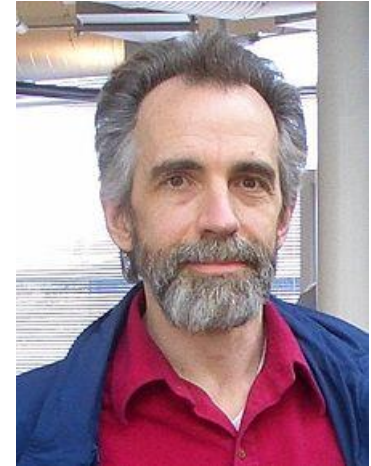
Proceedings of  
The International Conference on  
Production Engineering  
**TOKYO 1974**  
(PART II)

SPONSORED  
BY  
THE JAPAN SOCIETY OF PRECISION ENGINEERING  
(J.S.P.E.)  
AND  
INTERNATIONAL INSTITUTION FOR PRODUCTION ENGINEERING RESEARCH  
(C.I.R.P.)

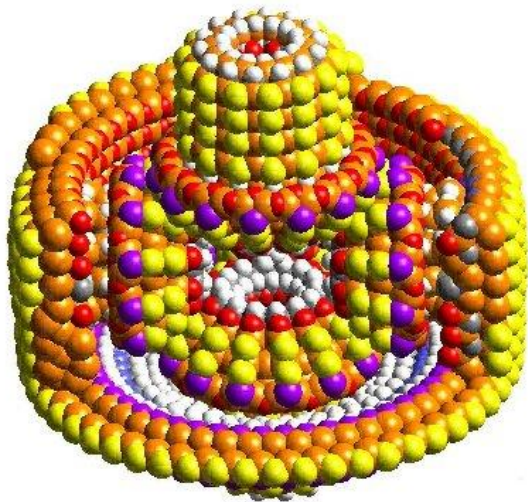
On the Basic Concept of "Nano-technology"  
N. Taniguchi (Japan)



## K. Eric Drexler



"In thinking about nanotechnology today, what's most important is understanding where it leads, what nanotechnology will look like after we reach the assembler breakthrough."



Copyright 1997 IMM. All rights reserved.

*"I had been impressed by the fact that biological systems were based on molecular machines and that we were learning to design and build these sorts of things."*



## Objetivo

Introduzir os princípios de engenharia de precisão, analisar componentes mecânicos, atuadores e sensores de posição do ponto de vista de resolução, precisão e acurácia. Apresentar técnicas de análise e correção de erros geométricos em máquinas de precisão, discutir os métodos de medição de erros geométricos em máquinas utilizando interferometria laser, exercitar os conceitos de mecânica de precisão no projeto de máquinas.



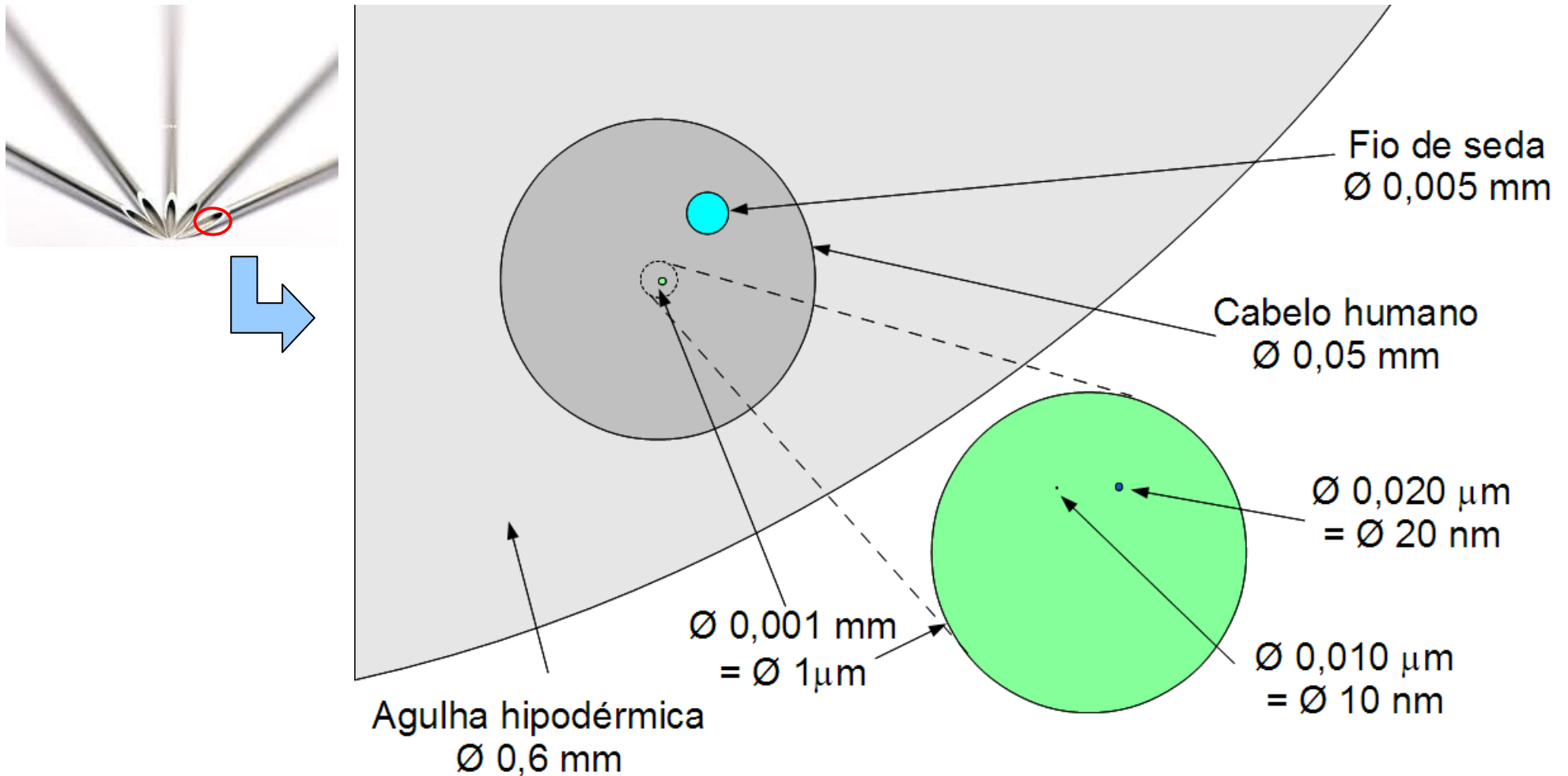
## Objetivo

- Apresentar os conceitos de projeto de sistemas de precisão e soluções mecatrônicas.
- Apresentar uma abordagem holística para problemas de engenharia que tenham requisitos extremos de movimentação e posicionamento entre outros.



## Introdução

O que é 1 nm? 1/10 de 1/1000 de 1 mm







# Comparativo dimensional

## Things Natural

**Dust mite**  
200  $\mu\text{m}$

**Human hair**  
~ 10-50  $\mu\text{m}$  wide

**Red blood cells with white cell**  
~ 2-5  $\mu\text{m}$

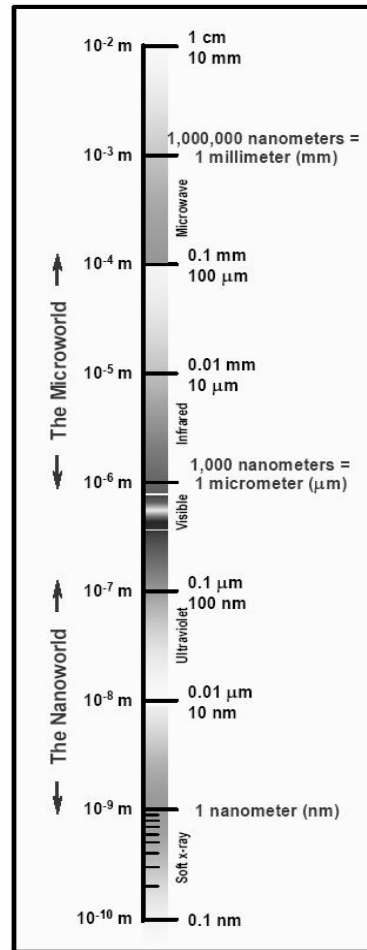
**Ant**  
~ 5 mm

**Fly ash**  
~ 10-20  $\mu\text{m}$

**DNA**  
~ 2-1/2 nm diameter

**ATP synthase**  
~ 10 nm diameter

**Atoms of silicon**  
spacing ~ tenths of nm



## Things Manmade

**Head of a pin**  
1-2 mm

**MicroElectroMechanical devices**  
10 - 100  $\mu\text{m}$  wide

**Red blood cells**  
**Pollen grain**

**Zone plate x-ray "lens"**  
Outermost ring spacing ~ 35 nm

**Nanotube electrode**      **Nanotube transistor**

**Quantum corral of 48 iron atoms on copper surface**  
positioned one at a time with an STM tip  
Corral diameter 14 nm

**Carbon nanotube**  
~ 2 nm diameter

**21st Century Challenge**

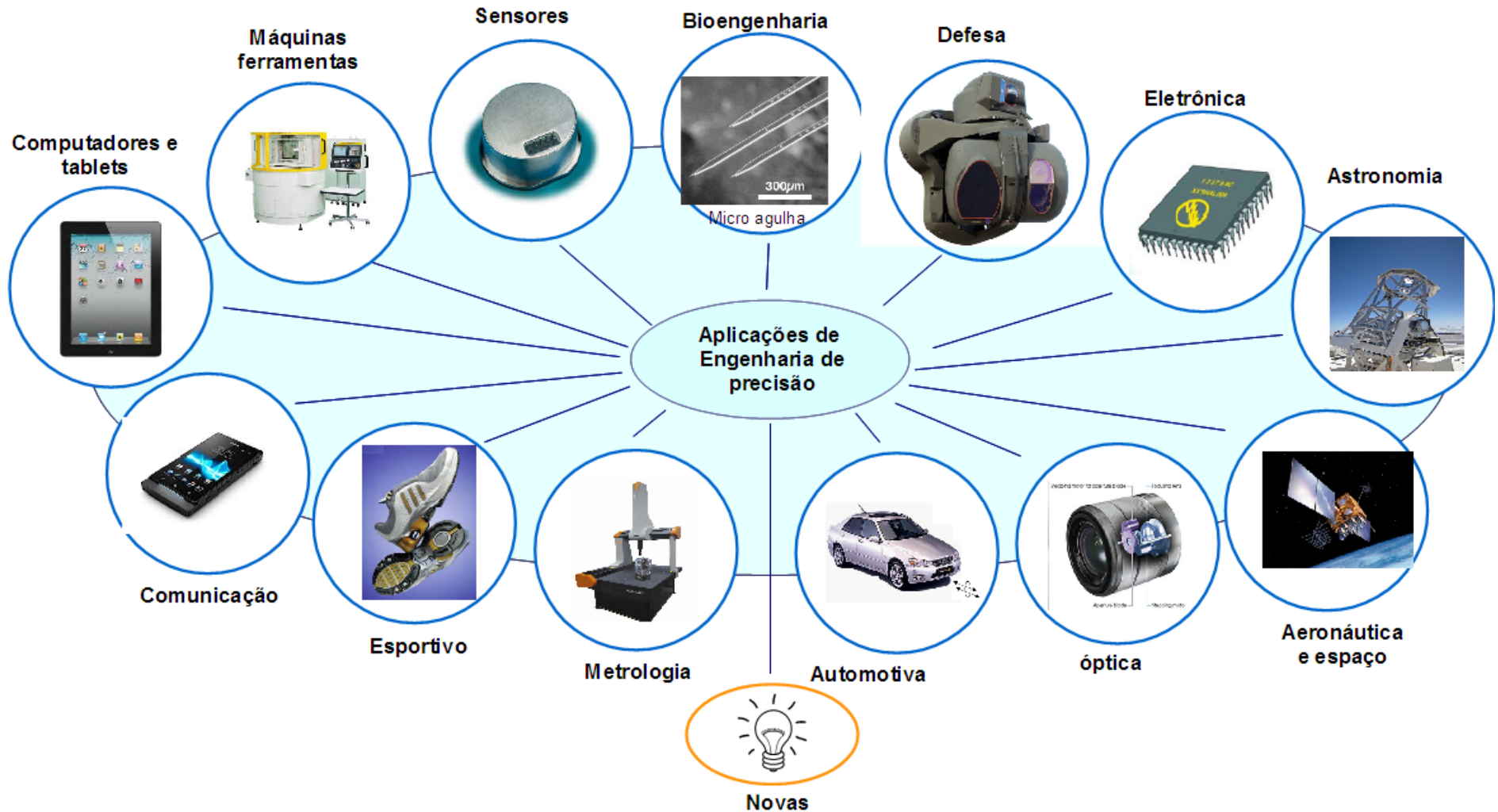
Combine nanoscale building blocks to make novel functional devices, e.g., a photosynthetic reaction center with integral semiconductor storage

Office of Basic Energy Sciences  
Office of Science, U.S. DOE  
Version 03-06-02





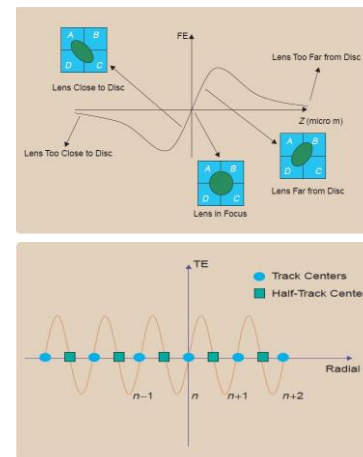
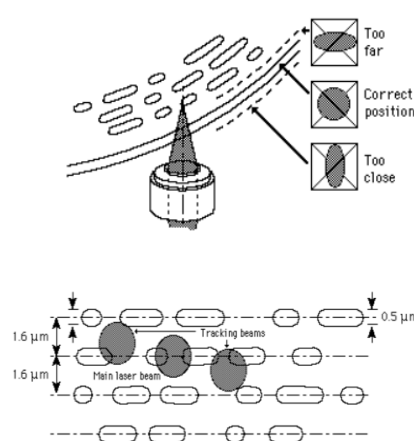
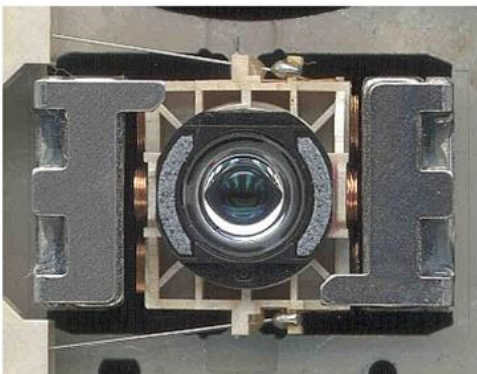
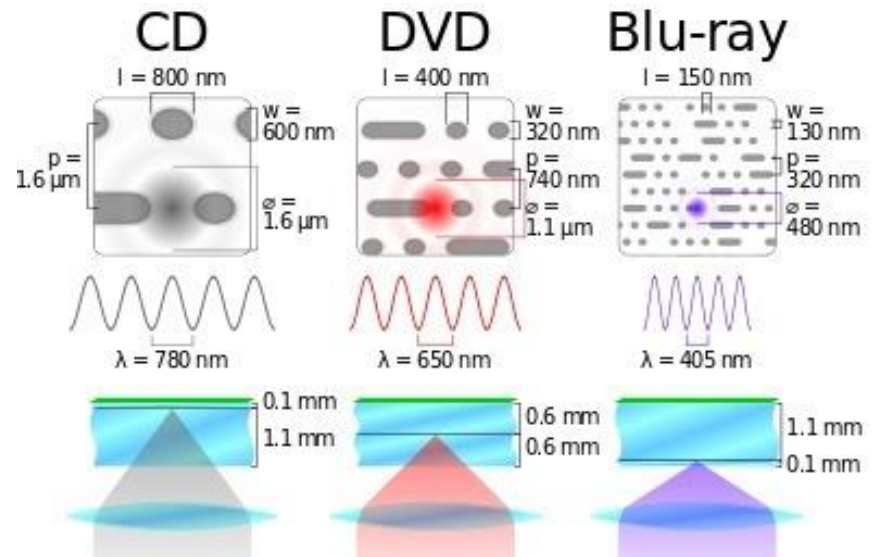
## Áreas de aplicações de engenharia de precisão





# Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

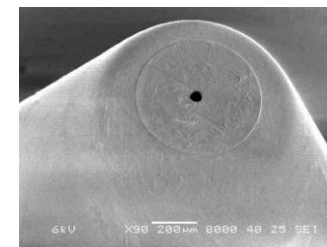
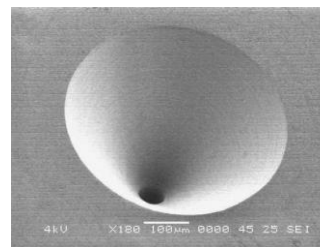
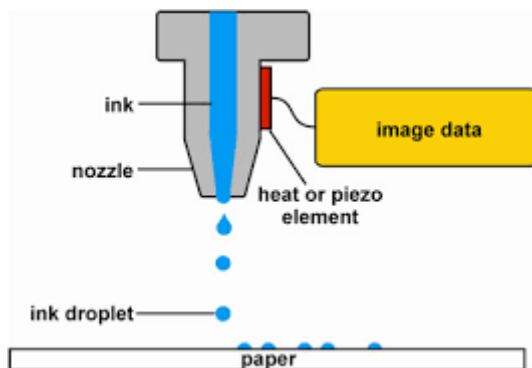
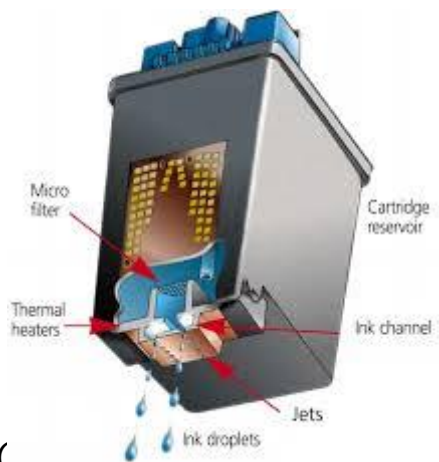
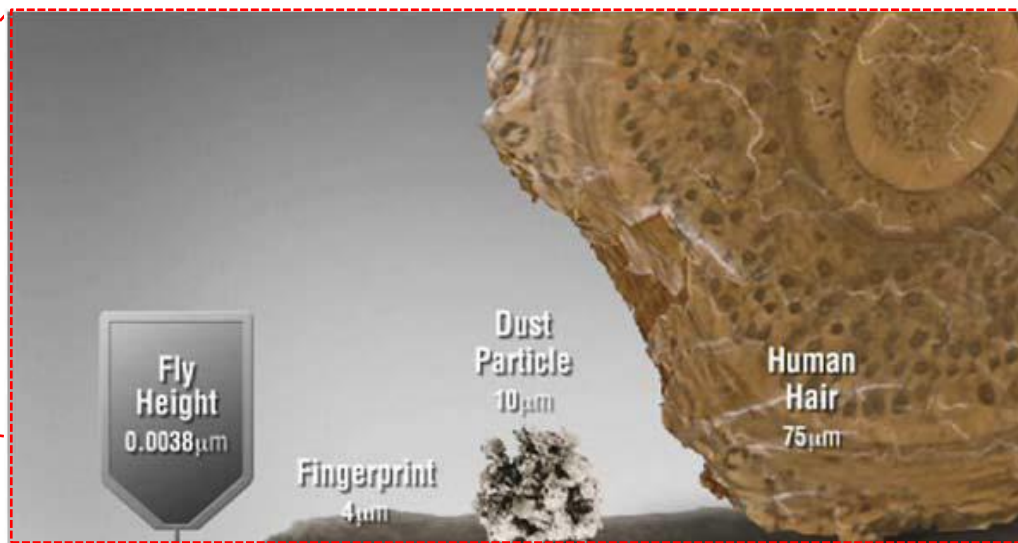
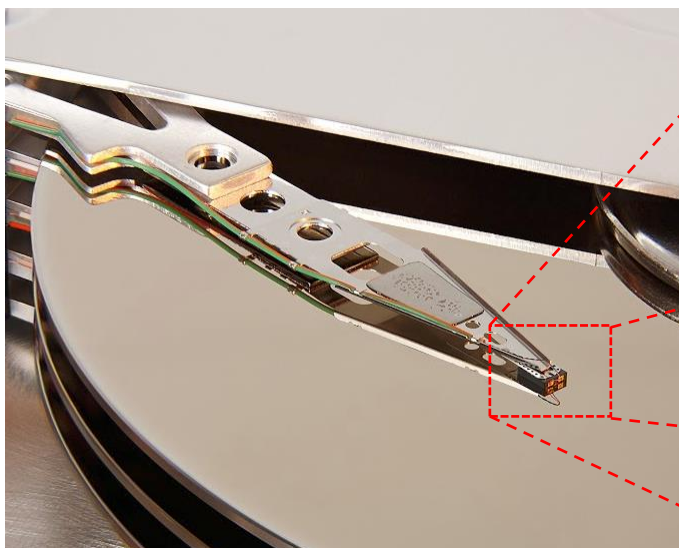
## Micro ótica





## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

### Computadores e periféricos







## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

### Máquinas ferramentas





## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

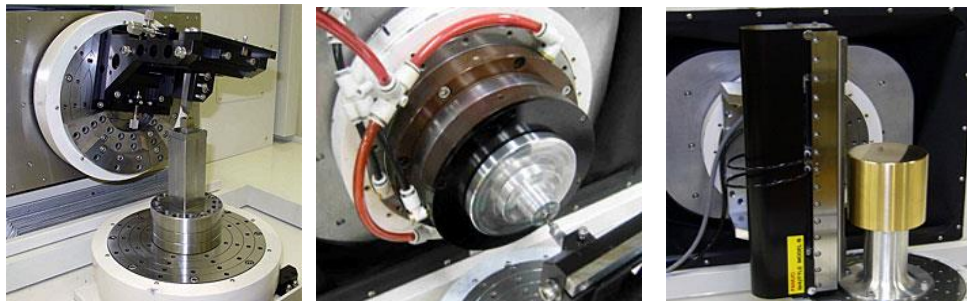
### Máquinas ferramentas

ROBONANO α-0iB



Main specifications

Stroke	X axis (horizontal linear)	280mm	
	Z axis (horizontal linear)	150mm	
	Y axis (vertical linear)	40mm	
	B axis (horizontal rotation)	360° (continuous rotation)	
	C axis (vertical rotation)		
Bearing type	Hydrostatic air bearing (all axes)		
Command resolution	X, Z, and Y axes	1nm	
	B and C axes	0.000001°	
Work-table area	B and C axes	Φ210mm	
	X and Z axes	500mm/min	
Maximum feedrate	Y axis	50mm/min	
	B axis	3600° /min	
		3600° /min	
C axis	250min <sup>-1</sup> (S axis mode)		
Straightness	X axis	0.2μm/280mm	
	Z axis	0.2μm/150mm	
	Y axis	0.2μm/40mm	
Run out	B and C axes	0.05μm	
Mass of the machine	Approx. 1700 kg		
Standard accessories	Supplying cutting fluid unit		
	Tool holder		
	Counter weight		
	Angle plate		
	Precision compressed air temperature control system		
	Speed display		





## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

Metrologia

Ex.: Máquinas e robos de medição por coordenadas

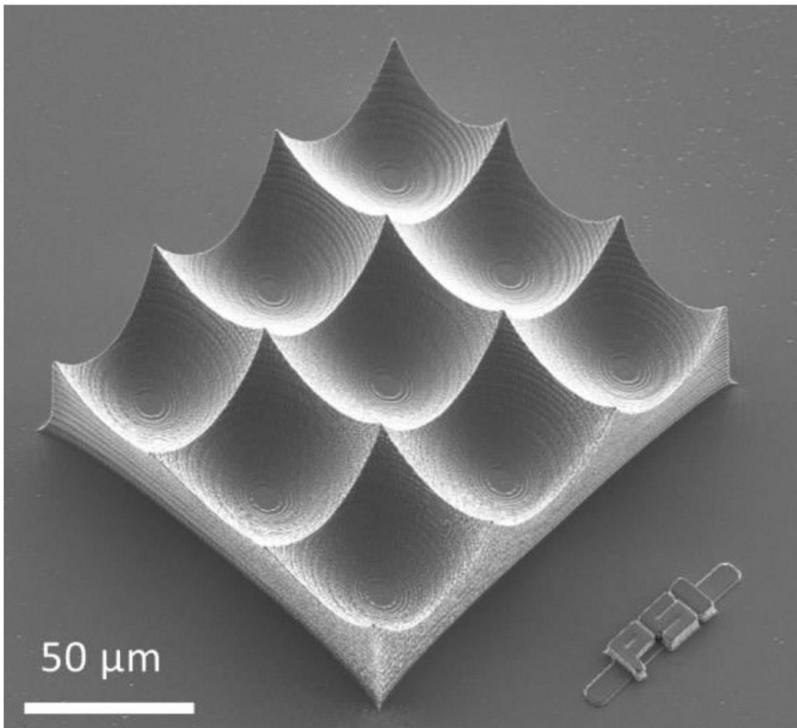




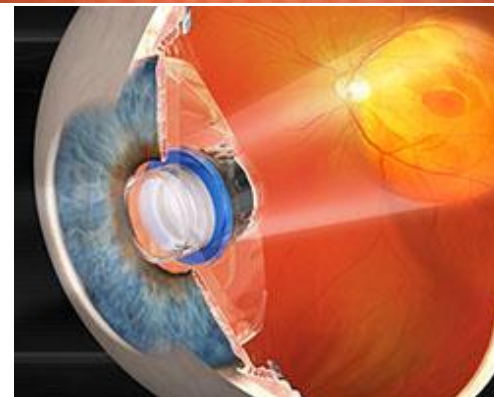
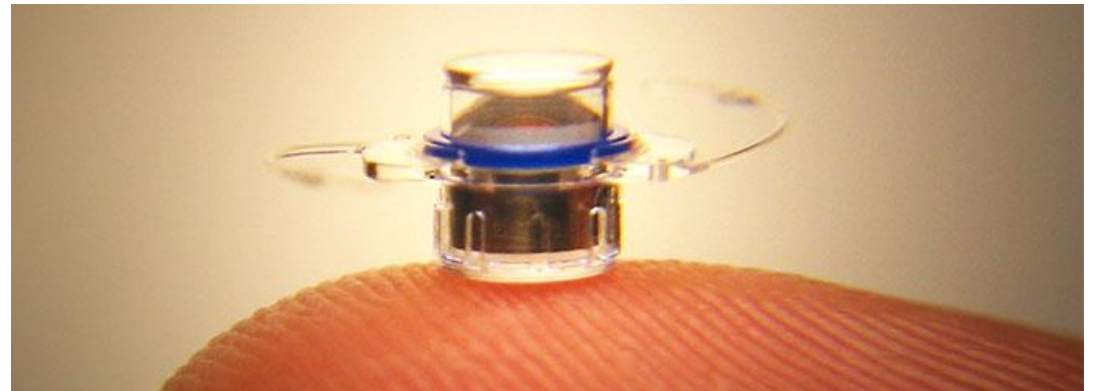


## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

### Micro ótica



<http://spie.org/newsroom/6788-reducing-the-roughness-of-3d-micro-optics>

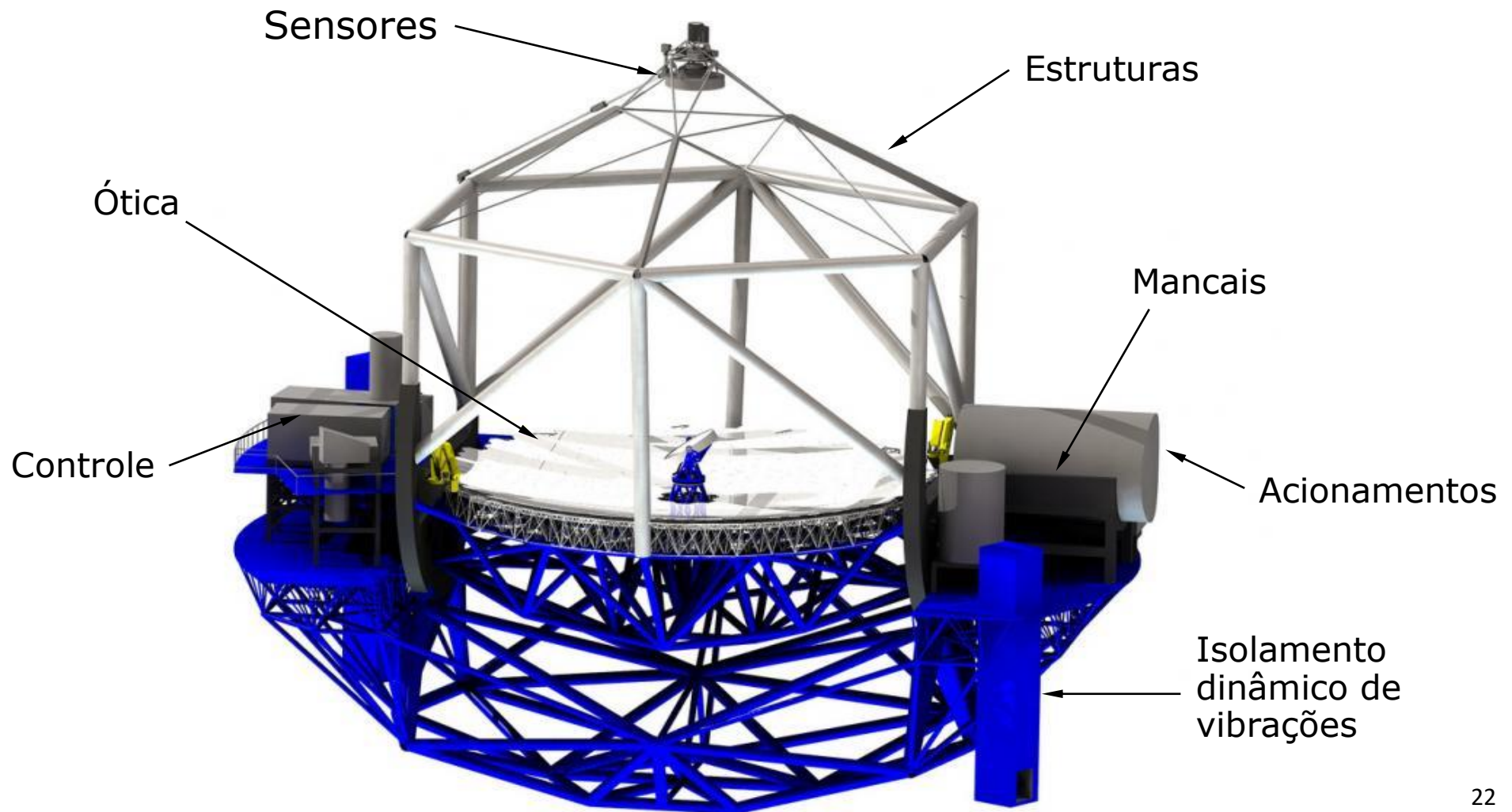


<http://eye.osu.edu/research/articles/microoptics/>



## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

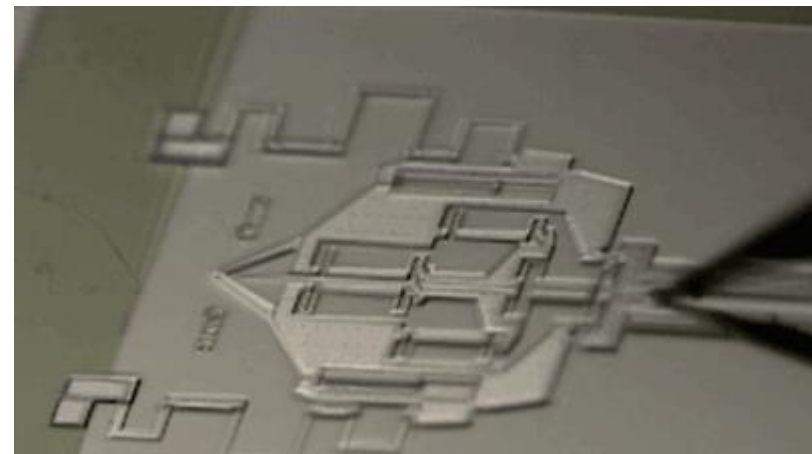
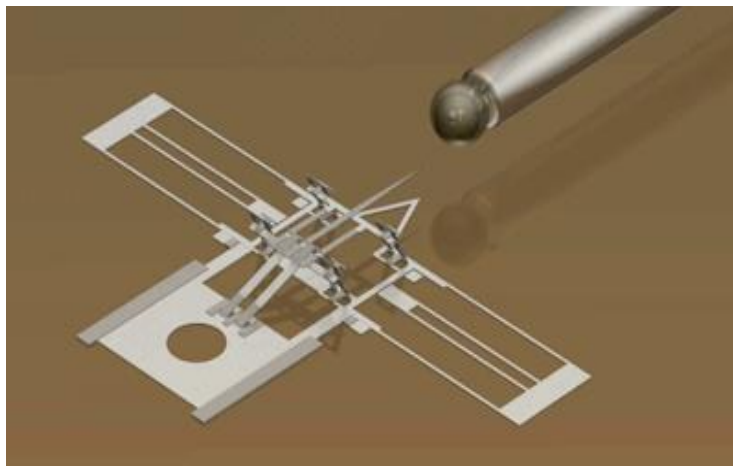
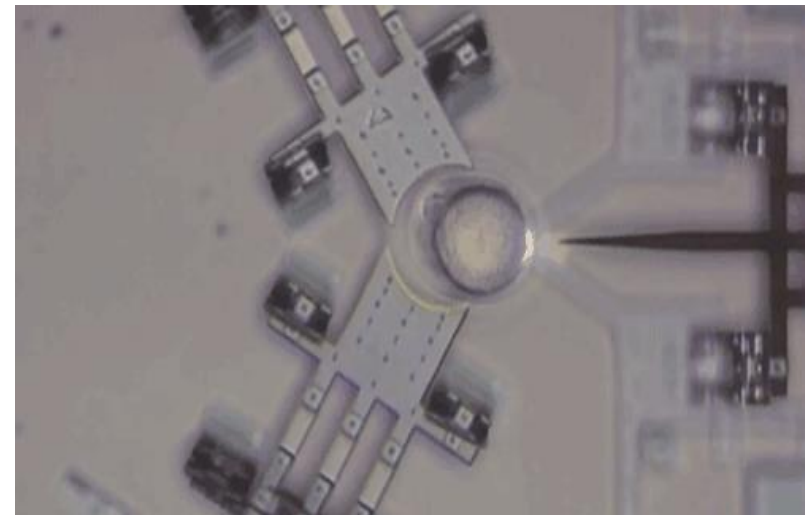
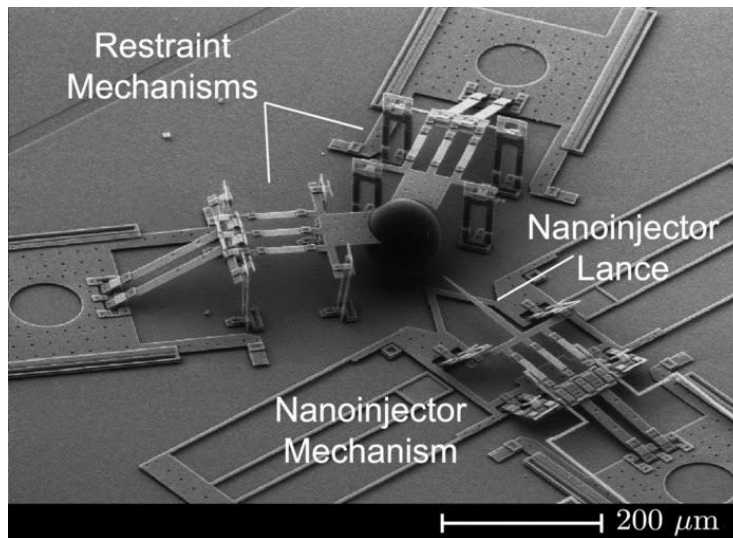
### Telescópios





## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

### Micro/nano máquinas







## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

### Sistemas médicos

Duraheart



Gyro



Ventr Assist



HeartMate III

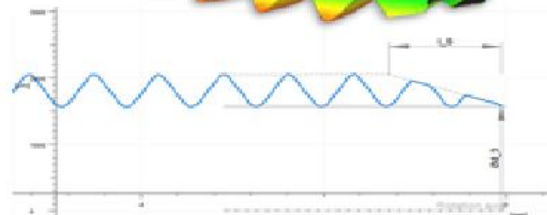
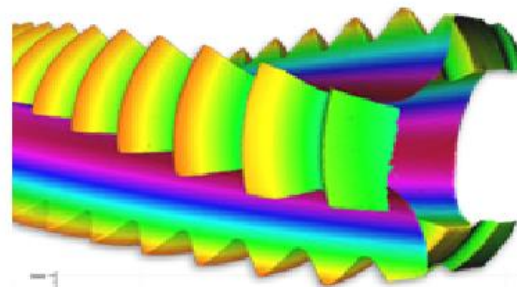
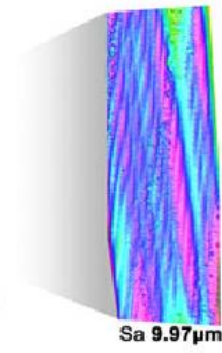
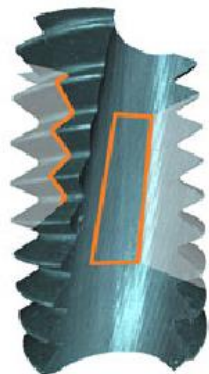
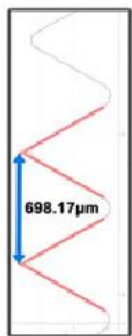
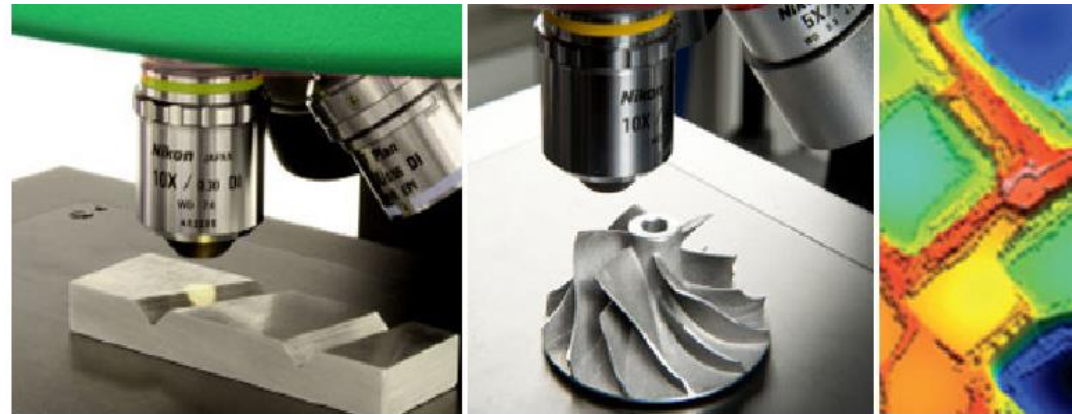


DAV no mundo



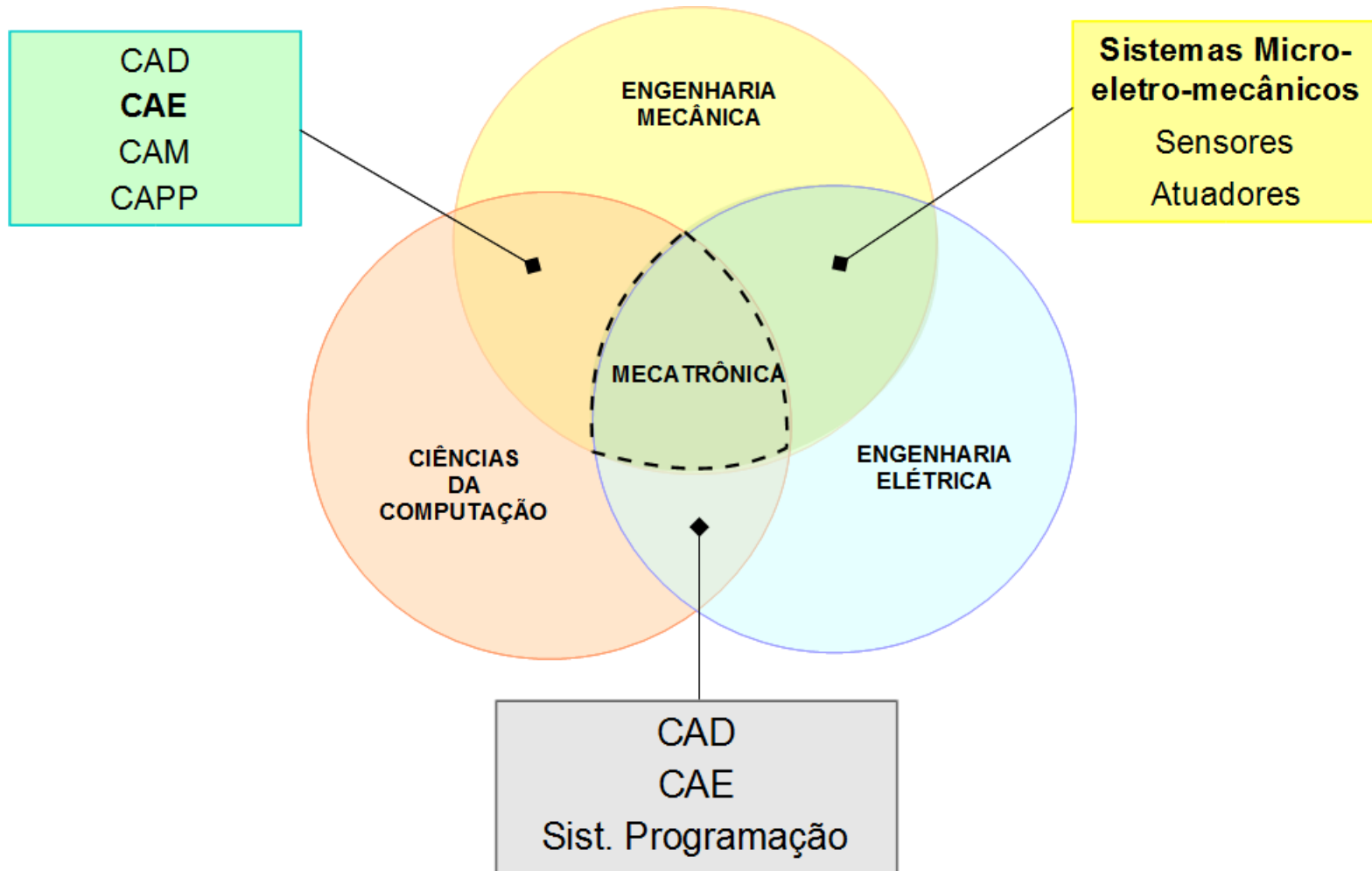
## Exemplos de aplicações de engenharia de precisão

### Sistemas de medição ópticos de alta resolução





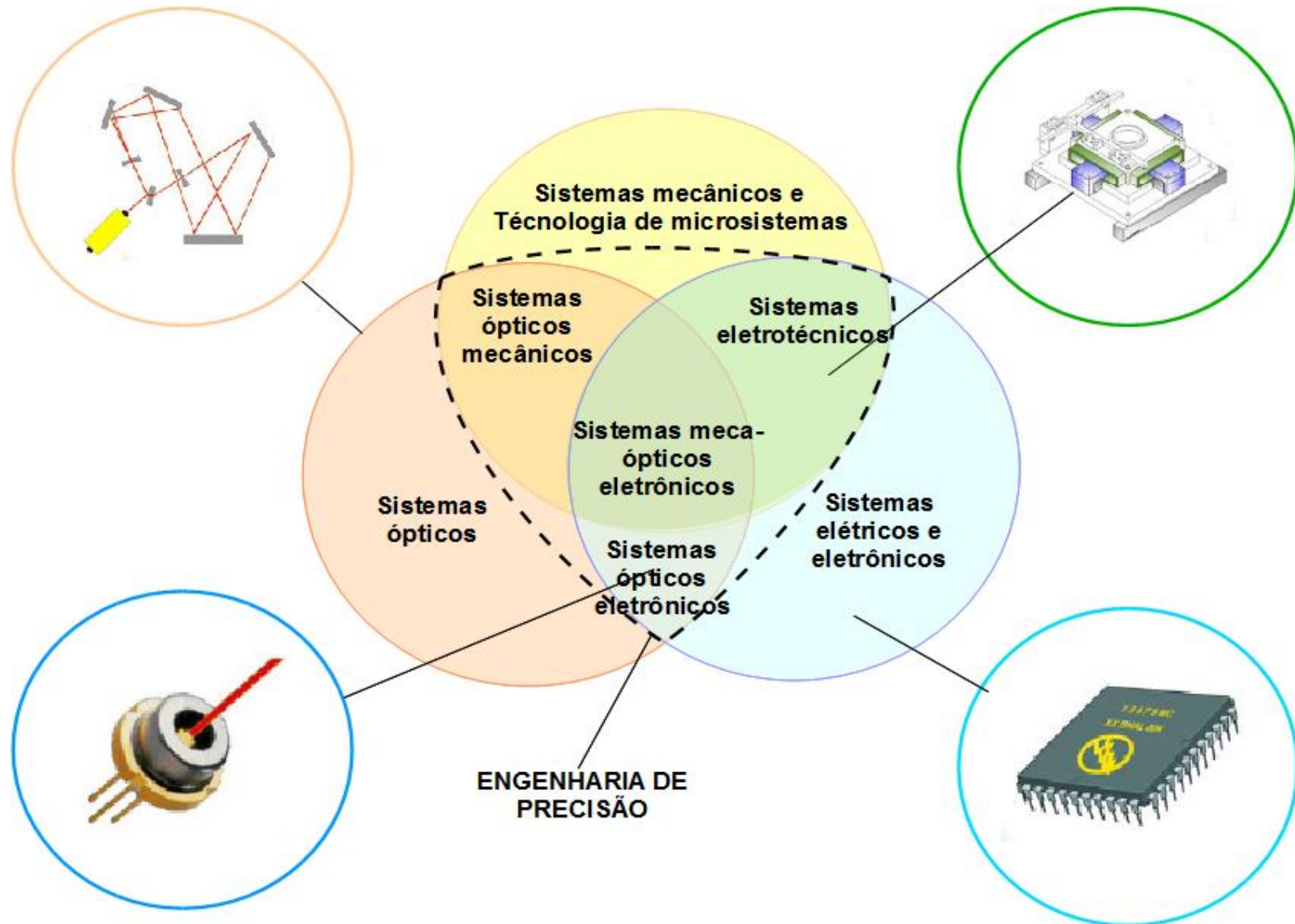
## Áreas de Conhecimento







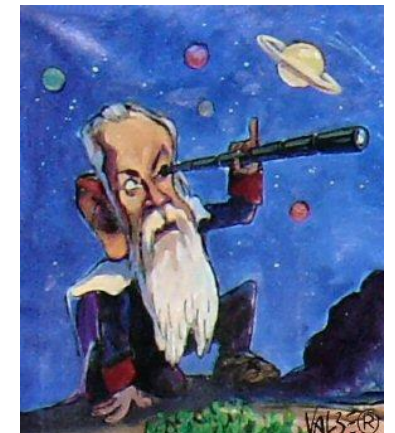
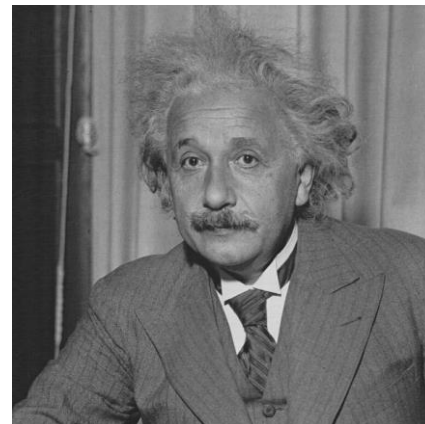
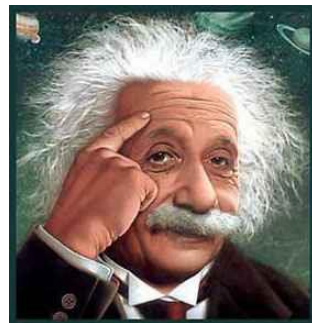
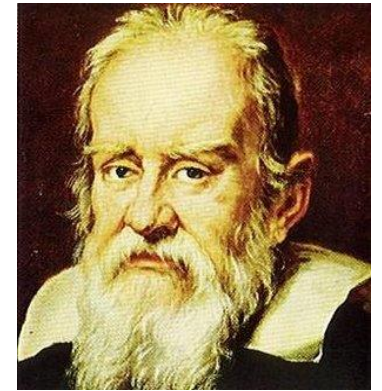
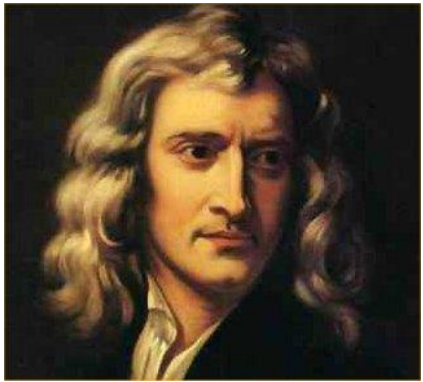
## Áreas de Conhecimento





## Fundamentos do projeto de precisão

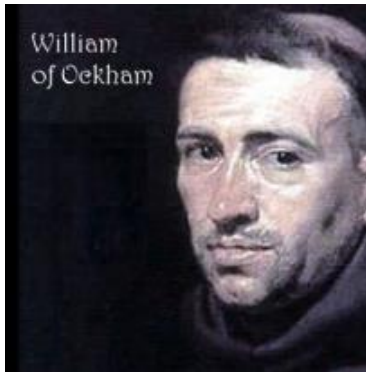
**“Um homem que deseja projetar....  
Deve inicialmente OBSERVAR, e  
PENSAR!”**





## Fundamentos do projeto de precisão

### Princípio de Ockham (Occam's) Razor



*William of Ockham* (c. 1287–1347), Frade Franciscano, estudioso, professor, filósofo e teólogo Inglês.

➤ Ockham defende que a intuição deve ser o ponto de partida para o conhecimento do universo.

➤ Ockham reescreveu o princípio Aristotélico o qual versa:

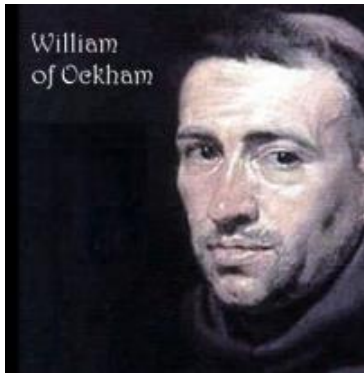
***“as entidades não devem ser multiplicadas além do necessário, ...”***

*(in Duns Scotus, Tratado Econômico).*



## Fundamentos do projeto de precisão

Princípio de Ockham (Occam's) Razor



***'All things being equal, the simplest explanation tends to be the correct one'***

### ➤ Resumindo:

- ✓ quanto mais simples melhor,
- ✓ quanto menos peças melhor, ou
- ✓ quanto menos peças móveis  
melhor.





## Fundamentos do projeto de precisão

### Pensamentos críticos

- Se você está **contente** com algo, contorne
- Se você está **descontente** com algo, contorne
- Sempre pode haver uma solução melhor, tente novas abordagens
- Você pode projetar um sistema para ser insensível ao meio, ou você pode isolar o sistema do meio
- Se você não consegue resolver um problema pelo seu começo, comece pelo fim e trabalhe no sentido reverso







REVIEW

Ultra-precision: enabling our future

By PAUL SHORE\* AND PAUL MORANTZ

Precision Engineering Institute, Cranfield University, Cranfield, Bedfordshire,  
MK43 0AL, UK

# Gráfico de Tanigushi

Review. Ultra-precision: our future

3997

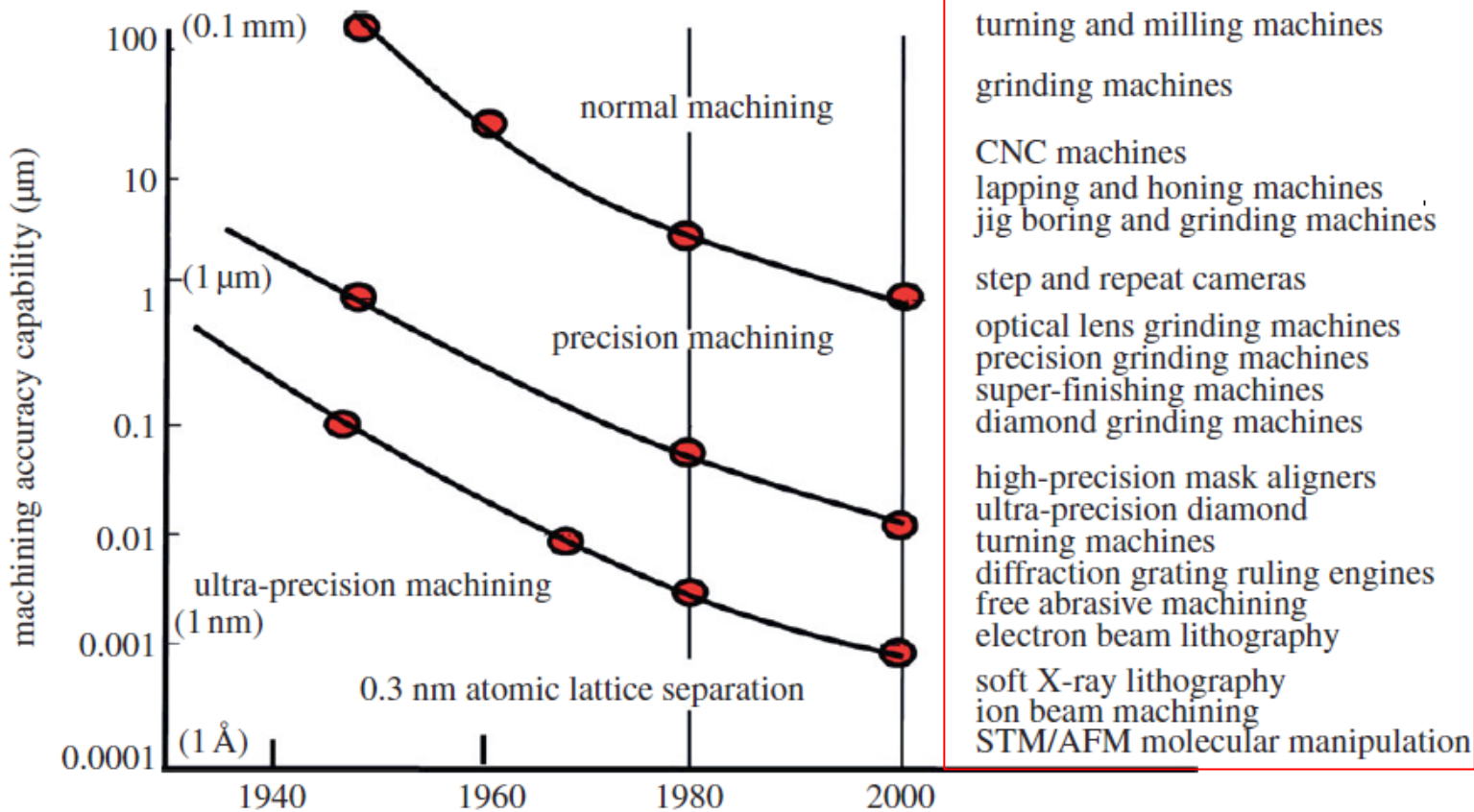


Figure 3. An interpretation of the Taniguchi curves, depicting the general improvement of machine accuracy capability with time during much of the twentieth century.



## Fundamentos do projeto de precisão



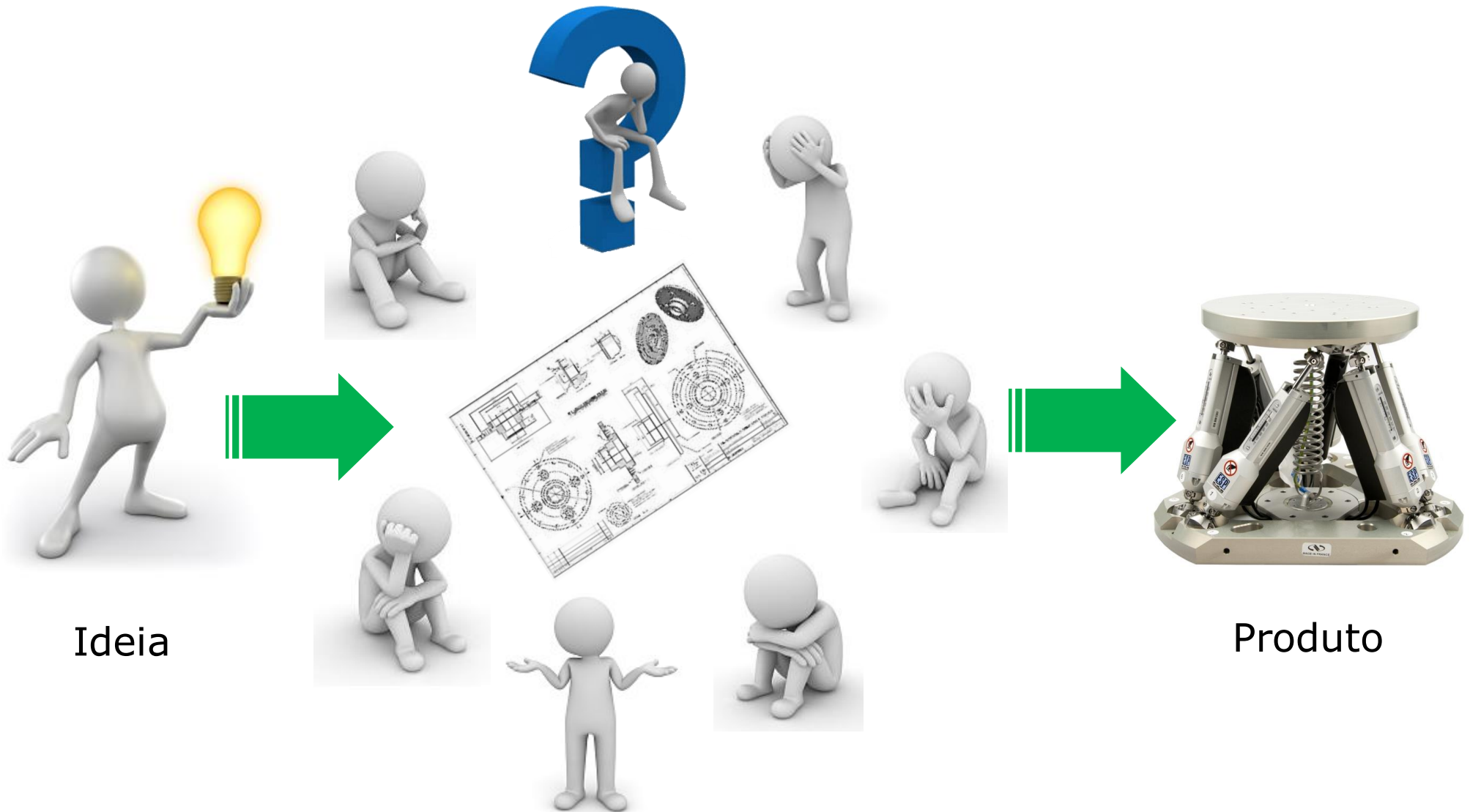
Ideia



Produto



## Fundamentos do projeto de precisão

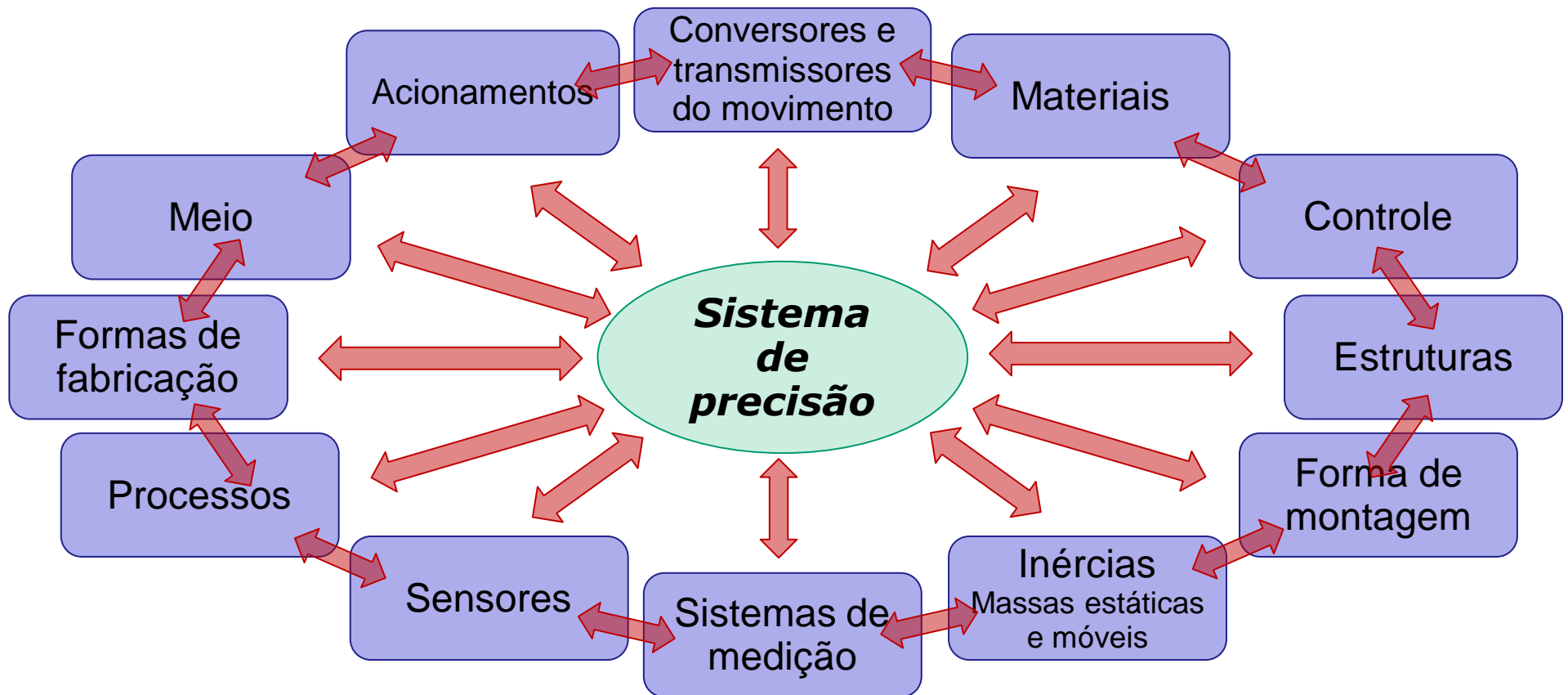


Idea

Produto



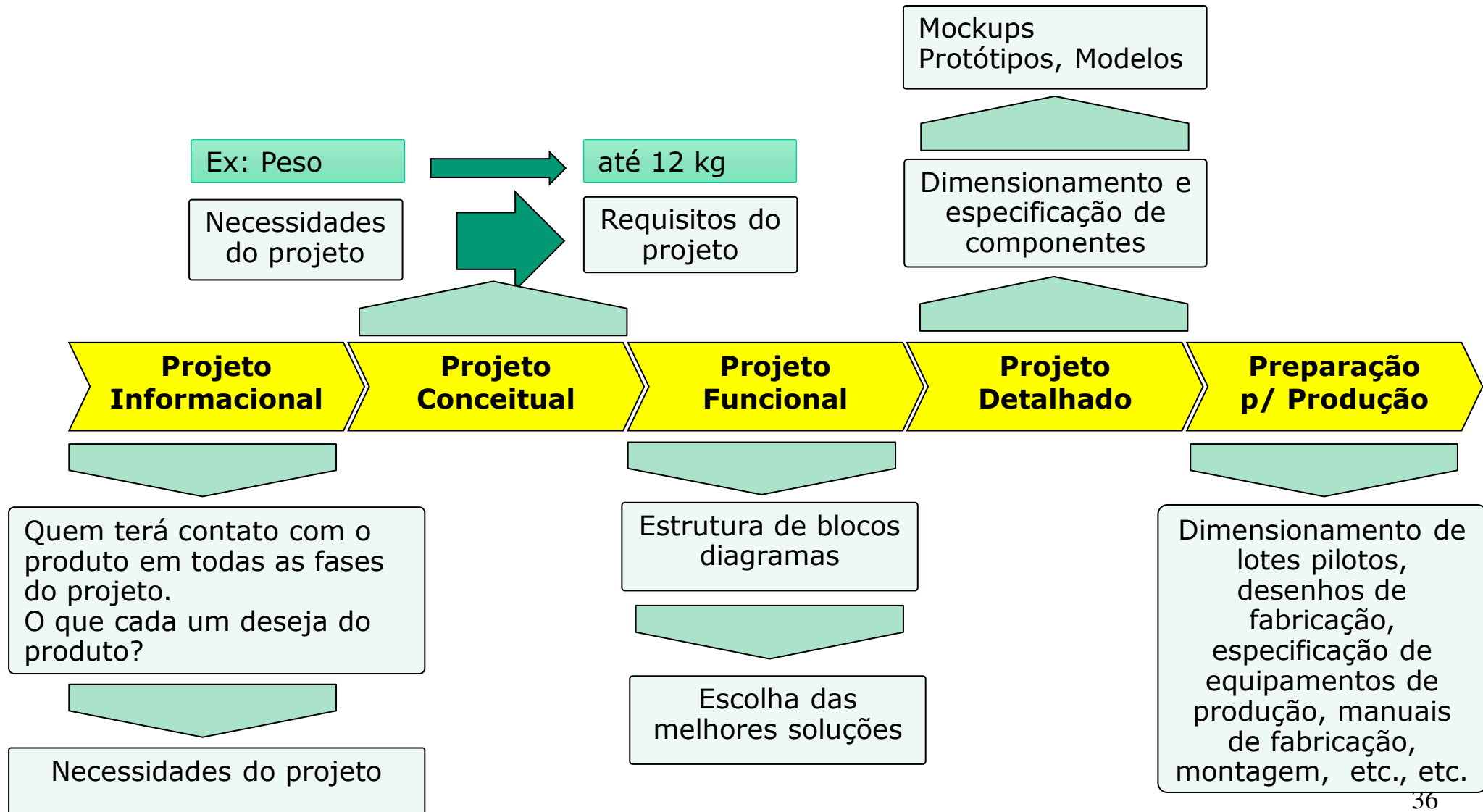
## Fatores que influênciam a precisão de um sistema







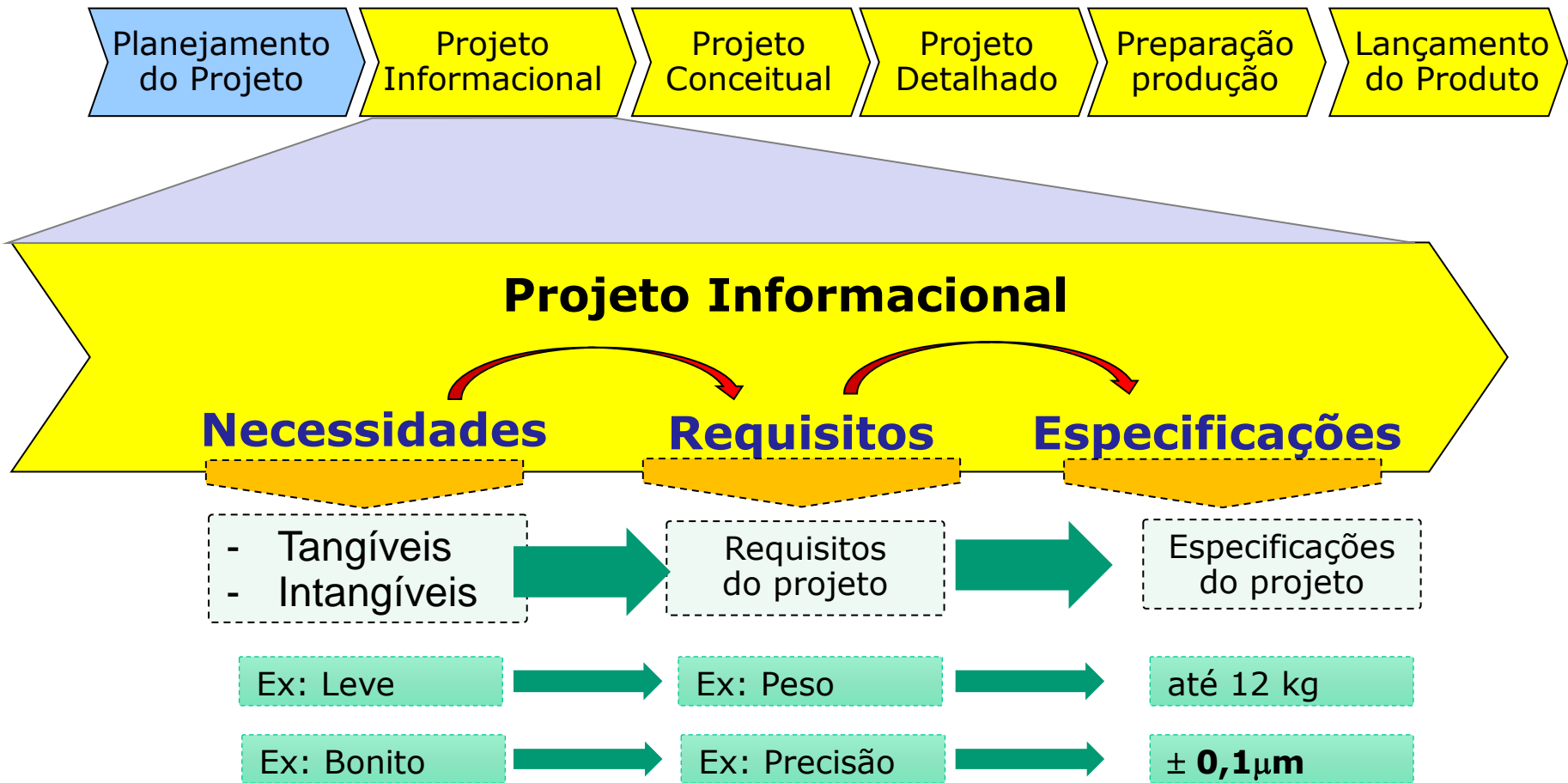
## Processo de desenvolvimento de produto





## Fundamentos do projeto de precisão

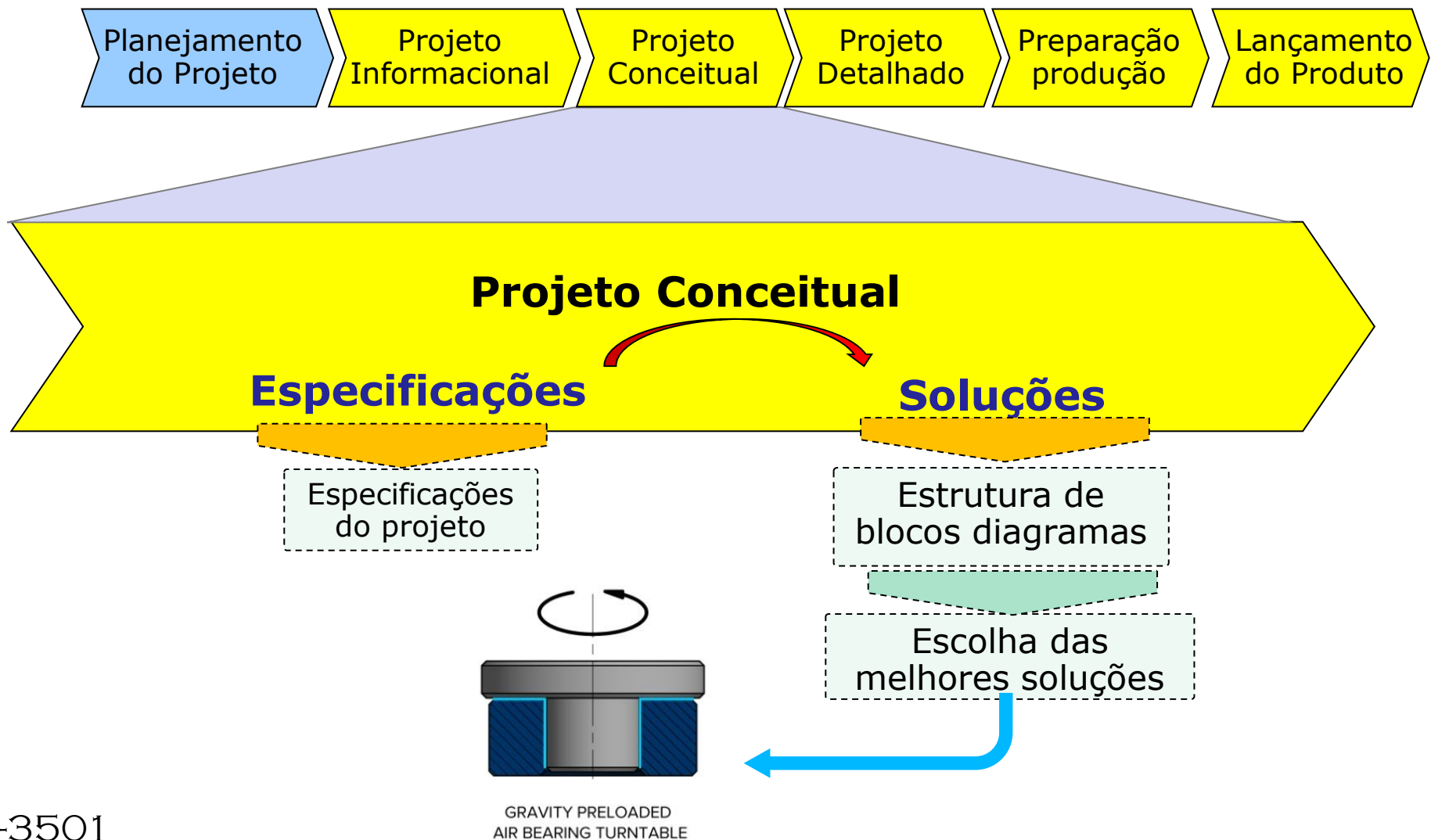
Fases do desenvolvimento de um Projeto





## Fundamentos do projeto de precisão

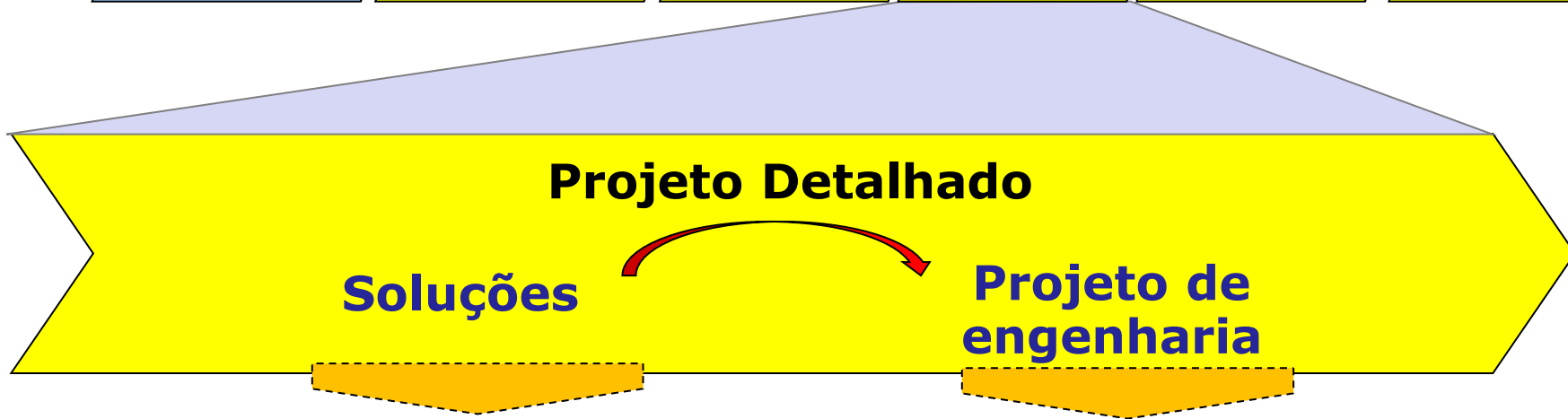
### Fases do desenvolvimento de um Projeto



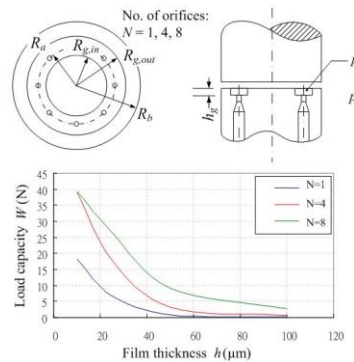


# Fundamentos do projeto de precisão

## Fases do desenvolvimento de um Projeto



Melhore solução



Pressure distribution patterns :

No. of orifices	Film thickness $h=10\mu\text{m}$	Film thickness $h=25\mu\text{m}$	Film thickness $h=50\mu\text{m}$	Film thickness $h=100\mu\text{m}$
1				
4				
8				





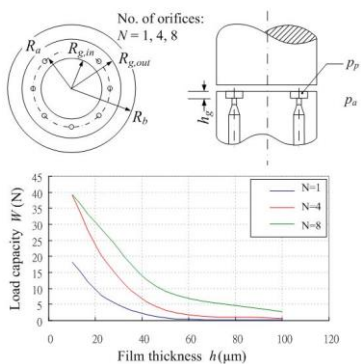
## Fundamentos do projeto de precisão

### Fases do desenvolvimento de um Projeto

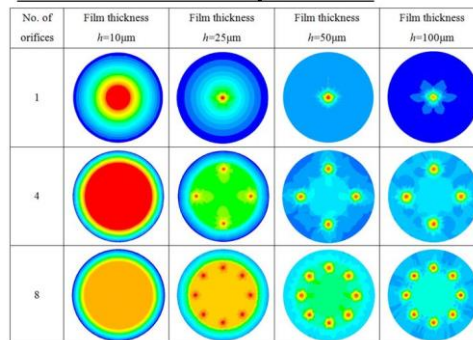


## Projeto Detalhado

### Projeto de engenharia



Pressure distribution patterns :



Dimensionamento e especificação de componentes

Mockups  
Protótipos

- Computacionais
- Analíticos
- Funcionais

Desenhos de engenharia

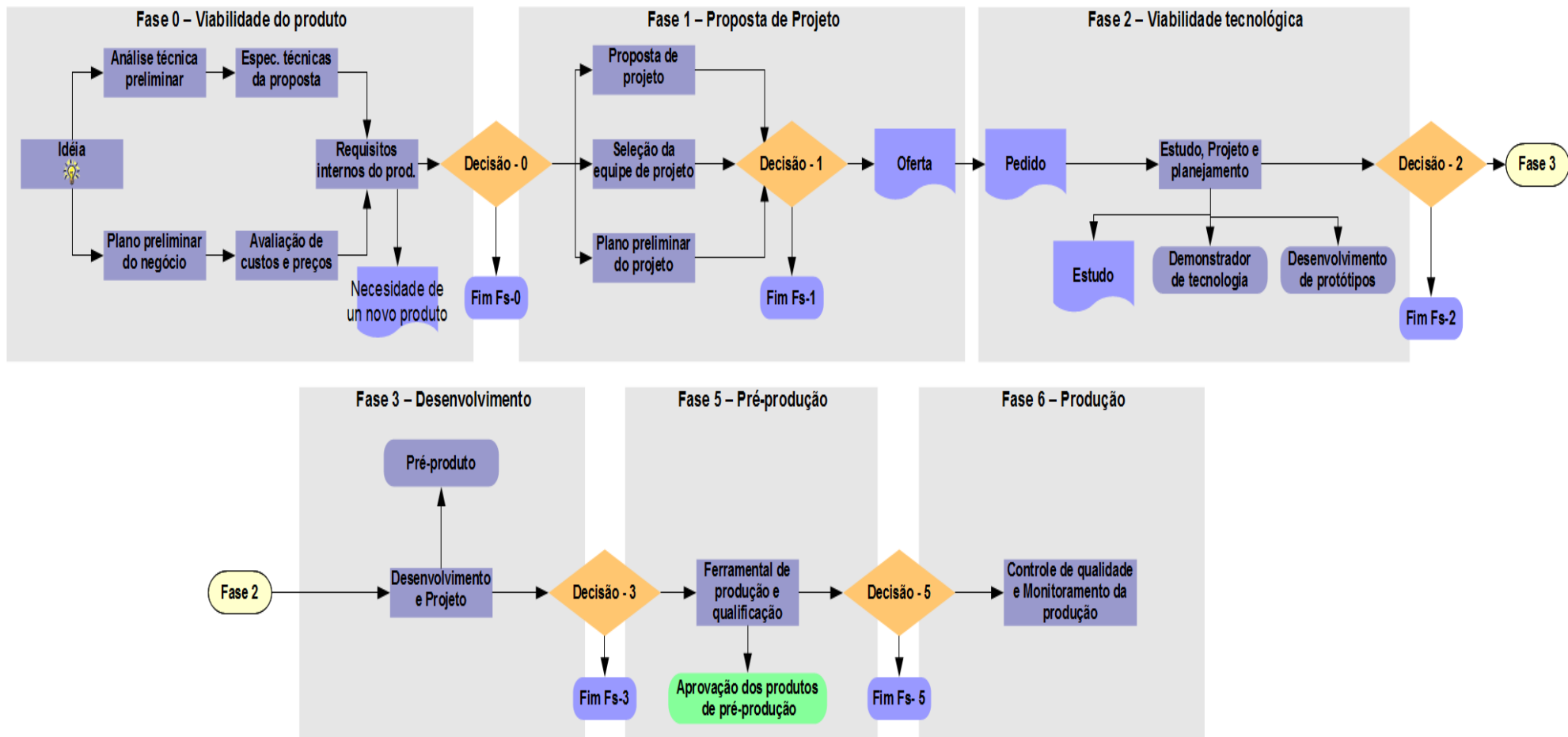
Desenhos de fabricação

Documentação total  
(montagem, manutenção, manuais, testes, etc.)



## Fundamentos do projeto de precisão

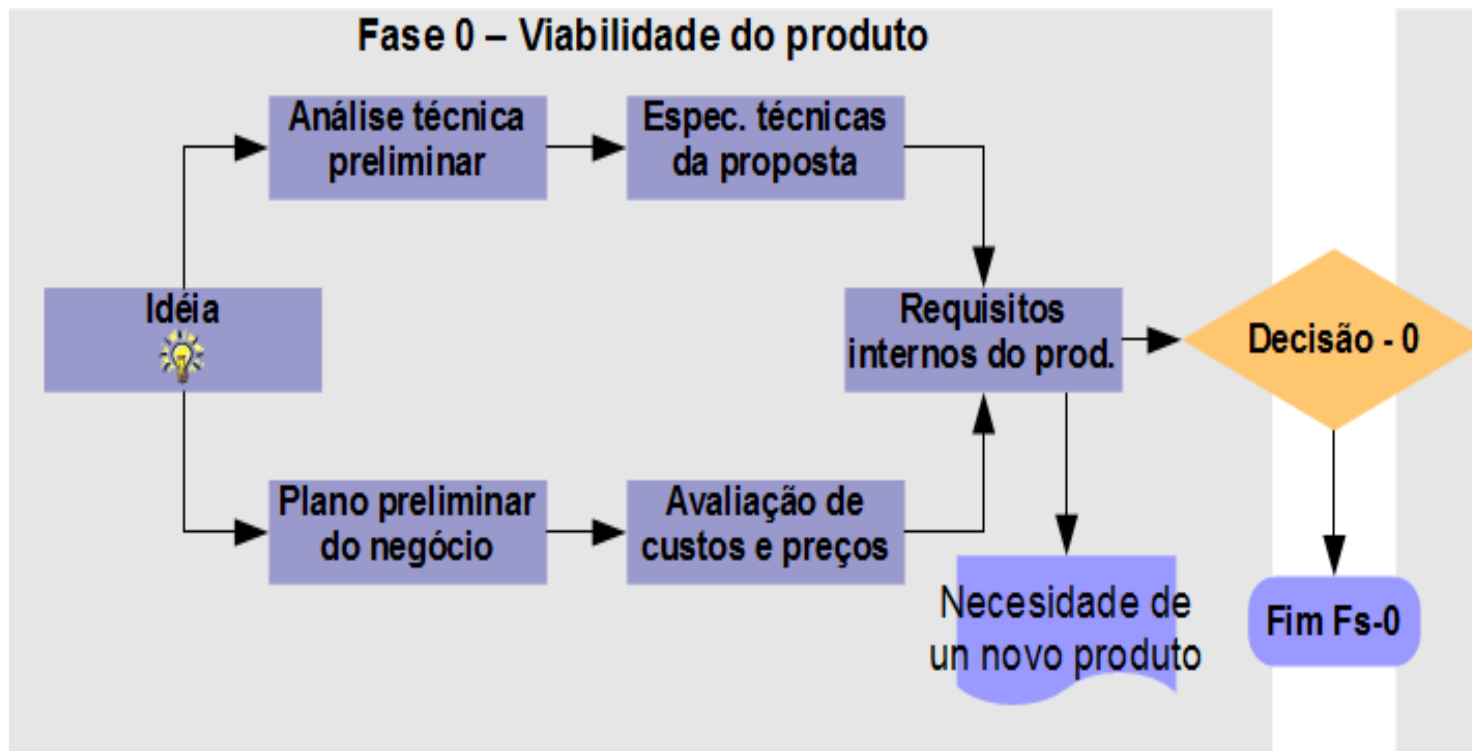
### Fases do projeto de sistemas de precisão





## Fundamentos do projeto de precisão

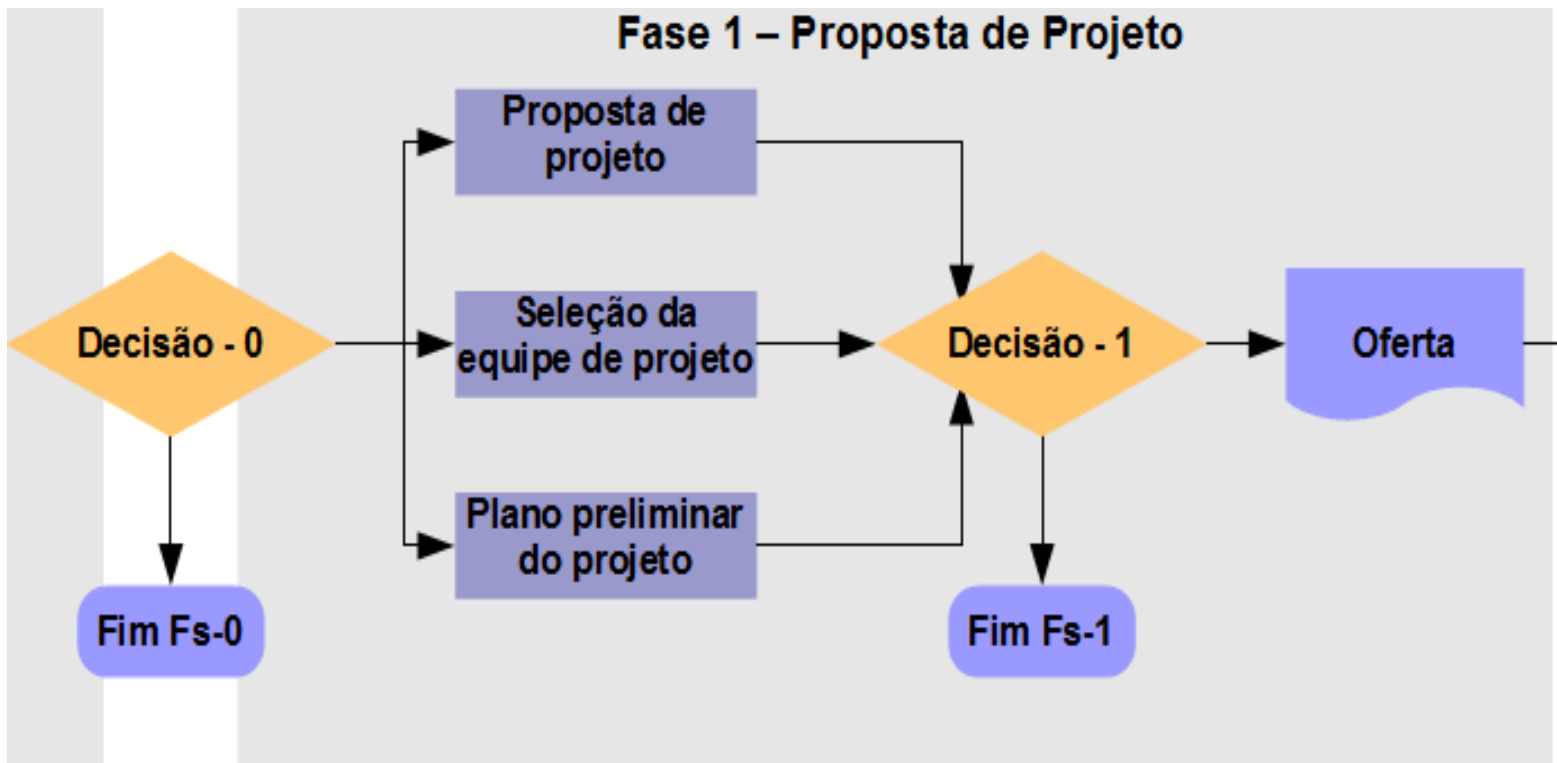
### Fases do projeto de sistemas de precisão





## Fundamentos do projeto de precisão

Fases do projeto de sistemas de precisão

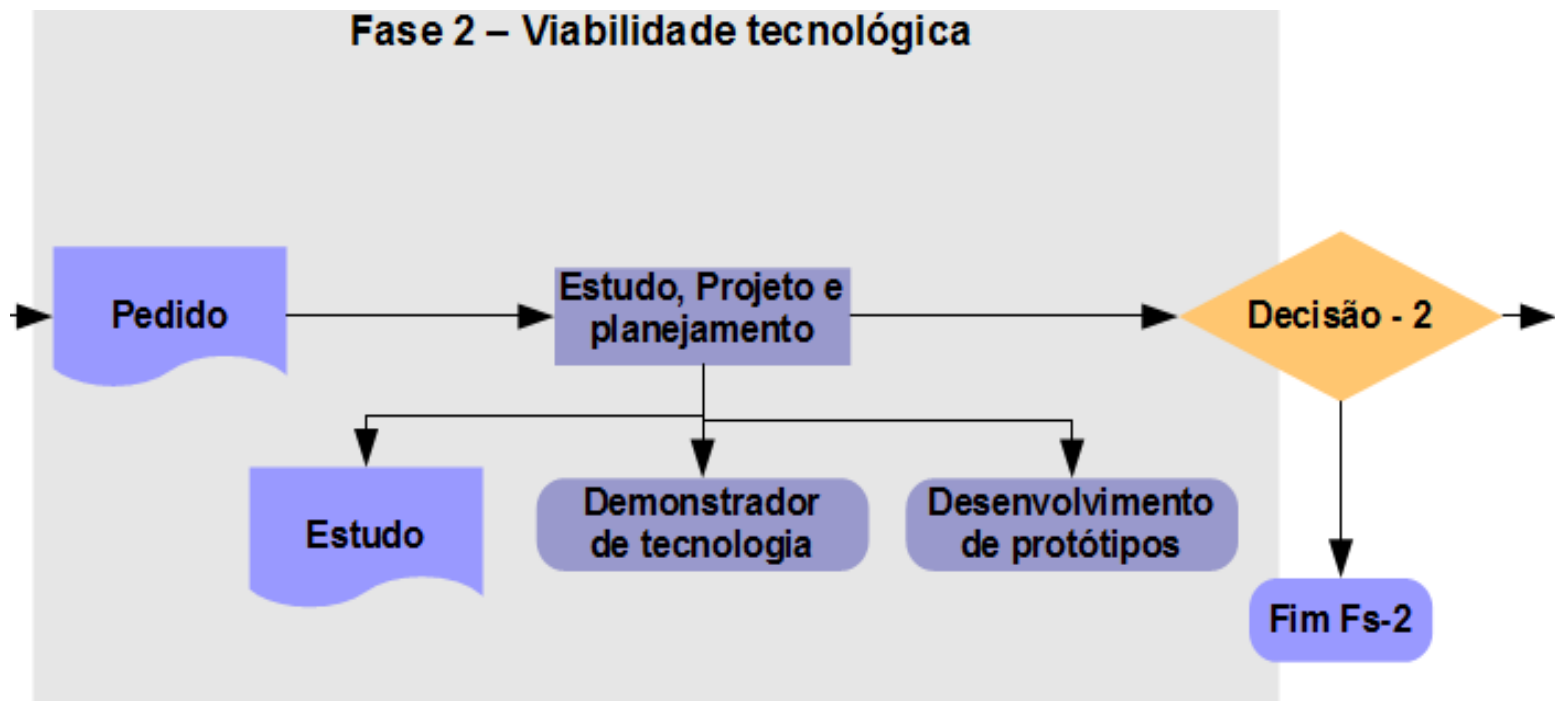






## Fundamentos do projeto de precisão

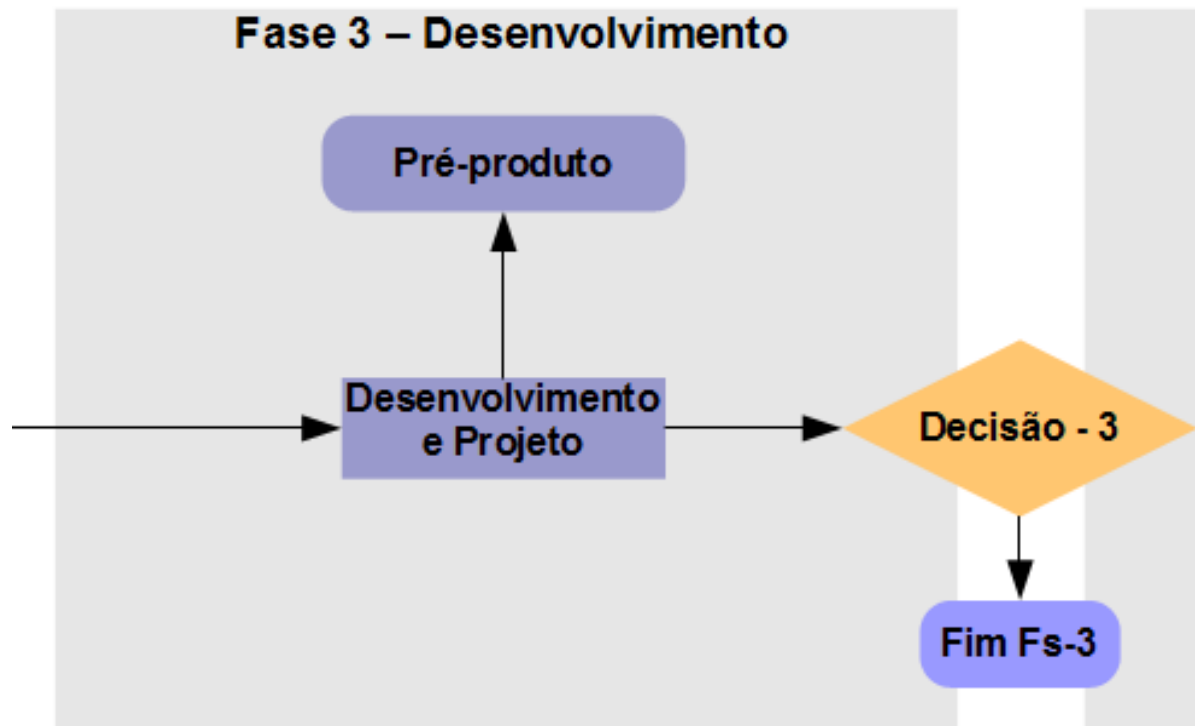
Fases do projeto de sistemas de precisão





## Fundamentos do projeto de precisão

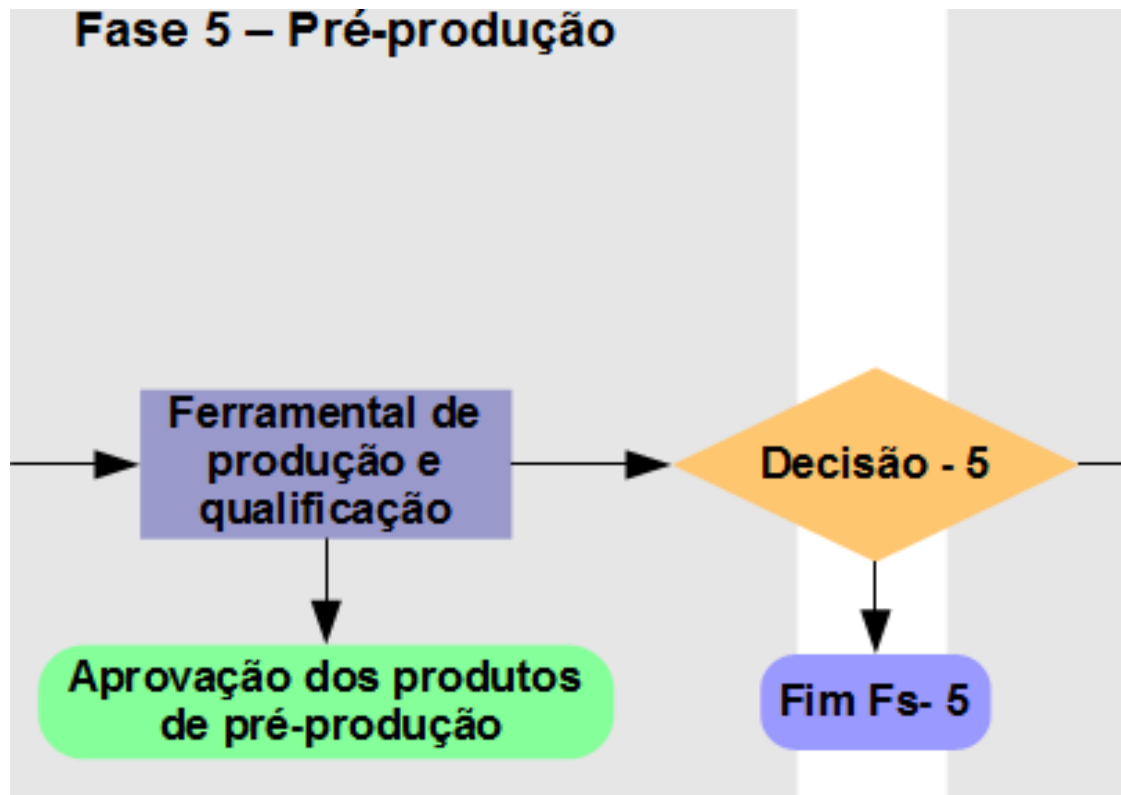
Fases do projeto de sistemas de precisão





## Fundamentos do projeto de precisão

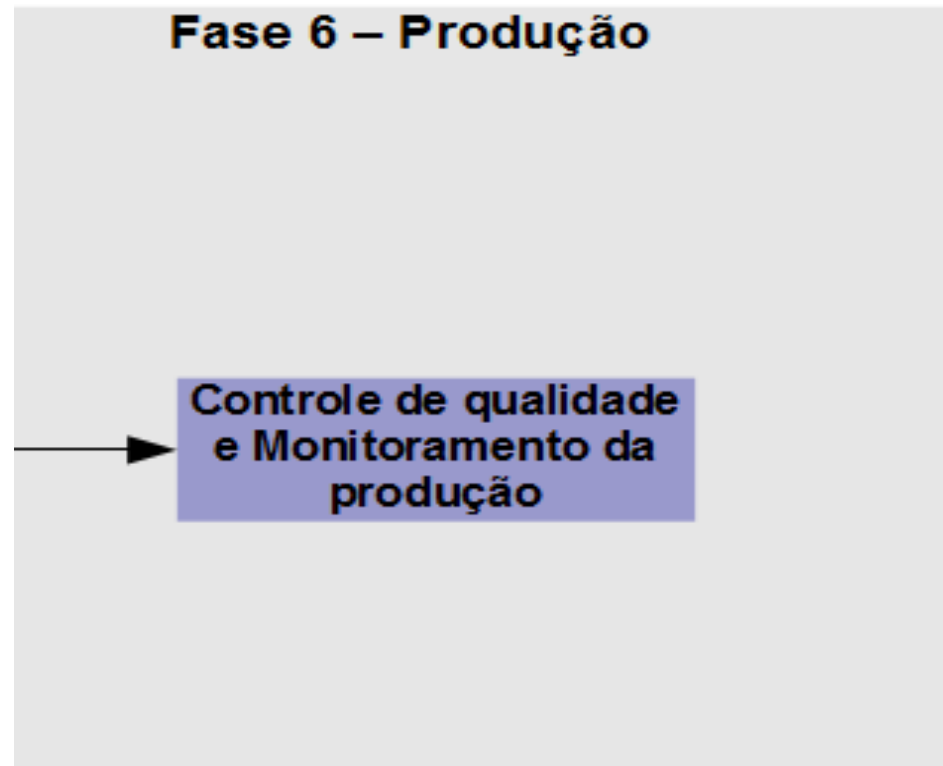
Fases do projeto de sistemas de precisão





## Fundamentos do projeto de precisão

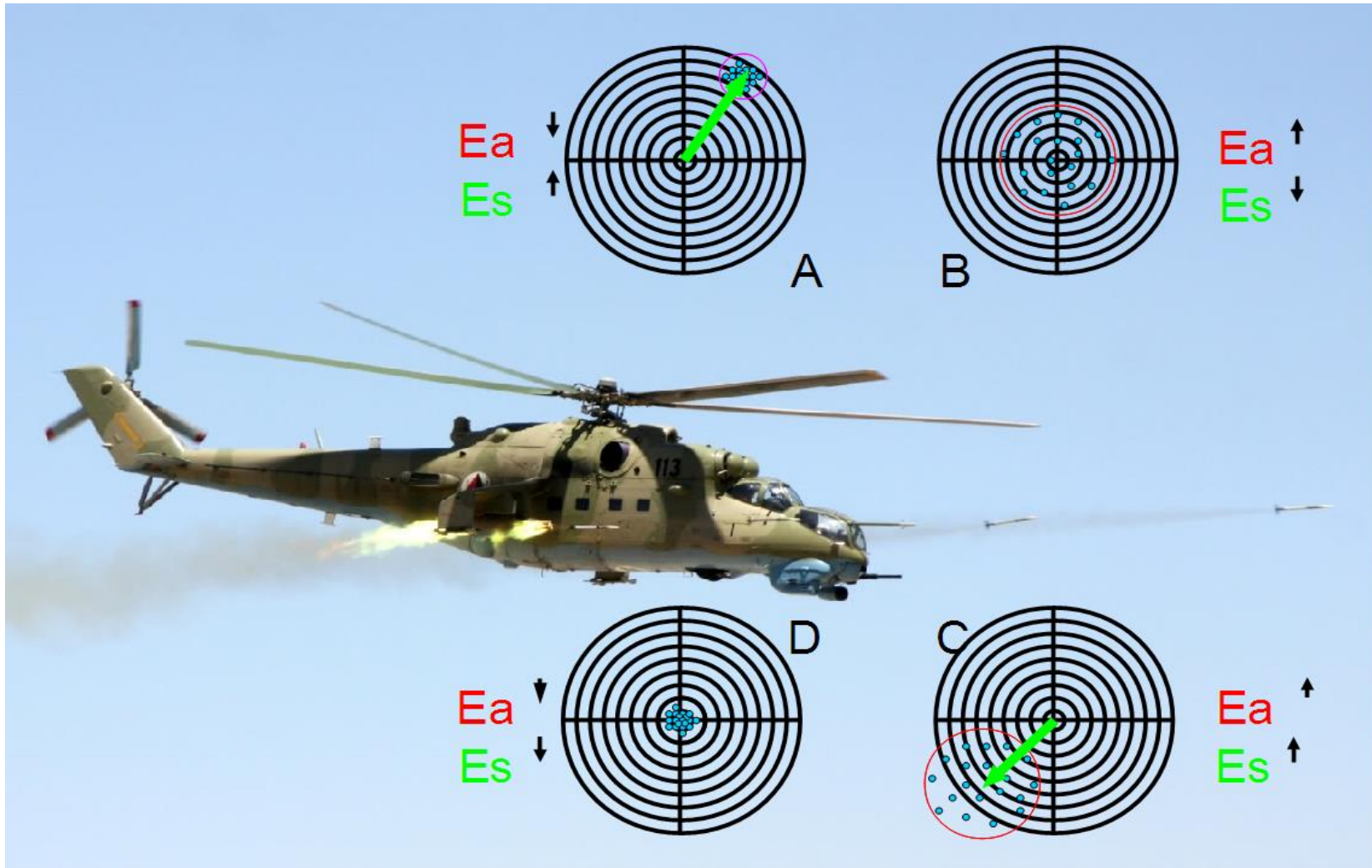
Fases do projeto de sistemas de precisão







## Precisão e acurácia (ou exatidão)





## Questionamentos

- 1 - Por quê alta precisão?
- 2 - O que é ultra preciso hoje será amanhã?
- 3 - Porque é um conhecimento estratégico?
- 4 - As soluções de projeto convencionais podem ser aplicada em sistemas de precisão? Quais as consequências?
- 5 - As soluções de projeto de precisão podem ser aplicados em problemas convencionais? Quais as consequências?
- 6 - Porque um problema que envolva precisão precisa de uma abordagem holística?



**FIM DA AULA 01**