



# 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

## Toleranciamento

- Toleranciamento dimensional
- Toleranciamento geométrico
- Toleranciamento geral

## Análise de folgas

- Folgas em montagens
- Determinação de probabilidade de montagem



# ANÁLISE DE FOLGAS E TOLERÂNCIAS

Garantia de  
montagem de  
conjuntos



# TOLERANCIAMENTO

## Garantir a inter-mutualidade entre peças similares

- É inevitável porque é impossível produzir duas peças iguais
- Tolerâncias apertadas aumentam custo de produção
- Necessidade de conciliar definição de tolerâncias com metrologia
- A evolução do estado da arte leva à redução das tolerâncias associadas às tecnologias de produção

# TOLERANCIAMENTO

Identificar os elementos que necessitam ter toleranciamento apertado

- Encaixes, elementos funcionais, elementos de fixação, etc. necessitam toleranciamento apertado
- Superfícies livres não funcionais não necessitam toleranciamento

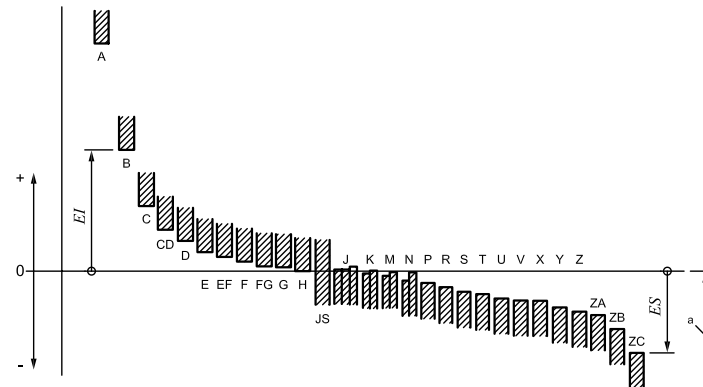
# TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL

Tolerância dimensional define-se como o erro admissível para a dimensão de elementos geométricos de uma peça

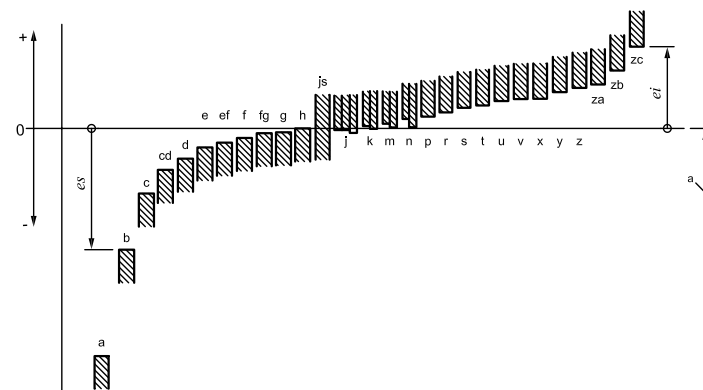
- Possibilidade de definição de tolerâncias específicas em cotas
- ex:
  - tolerâncias simétricas:  $dim \pm tol$
  - tolerâncias assimétricas:  $dim_{-tol\ inf}^{+tol\ sup}$
  - ajustamentos:  $dim(direção\ do\ desvio)IT$

# TOLERANCIAMENTO DIMENSIONAL - AJUSTAMENTOS

## ISO 286-1



a) Holes (internal features of size)



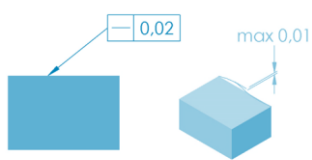
b) Shafts (external features of size)

Table 1 — Values of standard tolerance grades for nominal sizes up to 3 150 mm

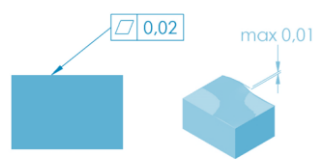
Nominal size mm		Standard tolerance grades																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Above	Up to and including	Standard tolerance values																			
		μm														mm					
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
250	315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
315	400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
400	500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	9,7
500	630			9	11	16	22	32	44	70	110	175	280	440	0,7	1,1	1,75	2,8	4,4	7	11
630	800			10	13	18	25	36	50	80	125	200	320	500	0,8	1,25	2	3,2	5	8	12,5
800	1 000			11	15	21	28	40	56	90	140	230	360	560	0,9	1,4	2,3	3,6	5,6	9	14
1 000	1 250			13	18	24	33	47	66	105	165	260	420	660	1,05	1,65	2,6	4,2	6,6	10,5	16,5
1 250	1 600			15	21	29	39	55	78	125	195	310	500	780	1,25	1,95	3,1	5	7,8	12,5	19,5
1 600	2 000			18	25	35	46	65	92	150	230	370	600	920	1,5	2,3	3,7	6	9,2	15	23
2 000	2 500			22	30	41	55	78	110	175	280	440	700	1 100	1,75	2,8	4,4	7	11	17,5	28
2 500	3 150			26	36	50	68	96	135	210	330	540	860	1 350	2,1	3,3	5,4	8,6	13,5	21	33

# TOLERÂNCIAMENTO GEOMÉTRICO

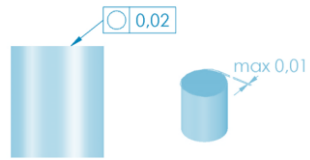
ISO 1101



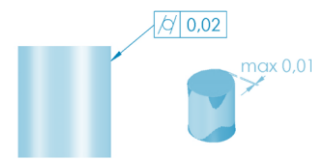
retilismo



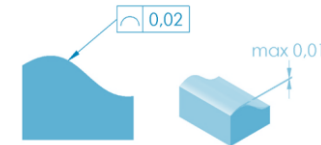
planeza



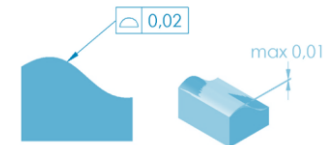
circularidade



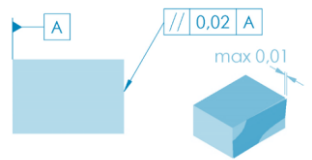
Cilindricidade



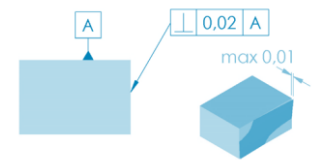
perfil de linha



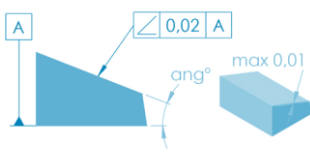
perfil de superfície



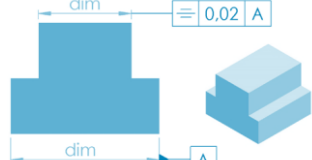
paralelismo



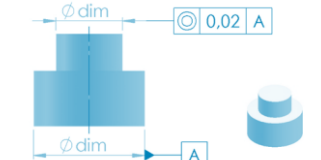
perpendicularidade



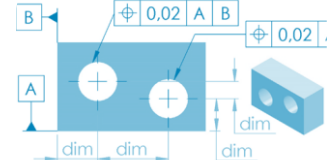
angularidade



simetria



coaxilidade



localização



# TOLERANCIAMENTO GERAL

De forma a evitar definir tolerâncias específicas para todas as dimensões e elementos geométricos, o toleranciamento geral propõe limites com base em tabelas

- ISO 2768-1 – Tolerâncias dimensionais gerais para peças maquinadas
- ISO 2768-2 – Tolerâncias geométricas gerais para peças maquinadas
- ISO 8062-3 – Tolerâncias dimensionais gerais para peças de fundição
- ISO 13920 – Tolerâncias dimensionais gerais para construção soldada
- ISO 20457 – Toleranciamento geral para peças moldadas
- DIN 16901 – Toleranciamento geral para peças moldadas

# TOLERANCIAMENTO GERAL — PEÇAS MAQUINADAS

## ISO 2768-1

**Table 1 — Permissible deviations for linear dimensions except for broken edges**  
(external radii and chamfer heights, see Table 2)

Values in millimetres

Tolerance class		Permissible deviations for basic size range							
Designation	Description	0,5 <sup>a</sup> up to 3	over 3 up to 6	over 6 up to 30	over 30 up to 120	over 120 up to 400	over 400 up to 1 000	over 1 000 up to 2 000	over 2 000 up to 4 000
f	fine	± 0,05	± 0,05	± 0,1	± 0,15	± 0,2	± 0,3	± 0,5	—
m	medium	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2
c	coarse	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 0,8	± 1,2	± 2	± 3	± 4
v	very coarse	—	± 0,5	± 1	± 1,5	± 2,5	± 4	± 6	± 8

<sup>a</sup>For nominal sizes below 0,5 mm, the deviations shall be indicated adjacent to the relevant nominal size(s).

**Table 2 — Permissible deviations for broken edges** (external radii and chamfer heights)

Values in millimetres

Tolerance class		Permissible deviations for basic size range		
Designation	Description	0,5 <sup>a</sup> up to 3	over 3 up to 6	over 6
f	fine	± 0,2	± 0,5	± 1
m	medium			
c	coarse	± 0,4	± 1	± 2
v	very coarse			

<sup>a</sup>For nominal sizes below 0,5 mm, the deviations shall be indicated adjacent to the relevant nominal size(s).

**Table 3 — Permissible deviations of angular dimensions**

Tolerance class		Permissible deviations for ranges of lengths, in millimetres, of the shorter side of the angle concerned				
Designation	Description	up to 10	over 10 up to 50	over 50 up to 120	over 120 up to 400	over 400
f	fine	± 1°	± 0°30'	± 0°20'	± 0°10'	± 0°5'
m	medium					
c	coarse	± 1°30'	± 1°	± 0°30'	± 0°15'	± 0°10'
v	very coarse	± 3°	± 2°	± 1°	± 0°30'	± 0°20'

# TOLERANCIAMENTO GERAL — PEÇAS SOLDADAS

## ISO 13920

Table 1: Tolerances for linear dimensions

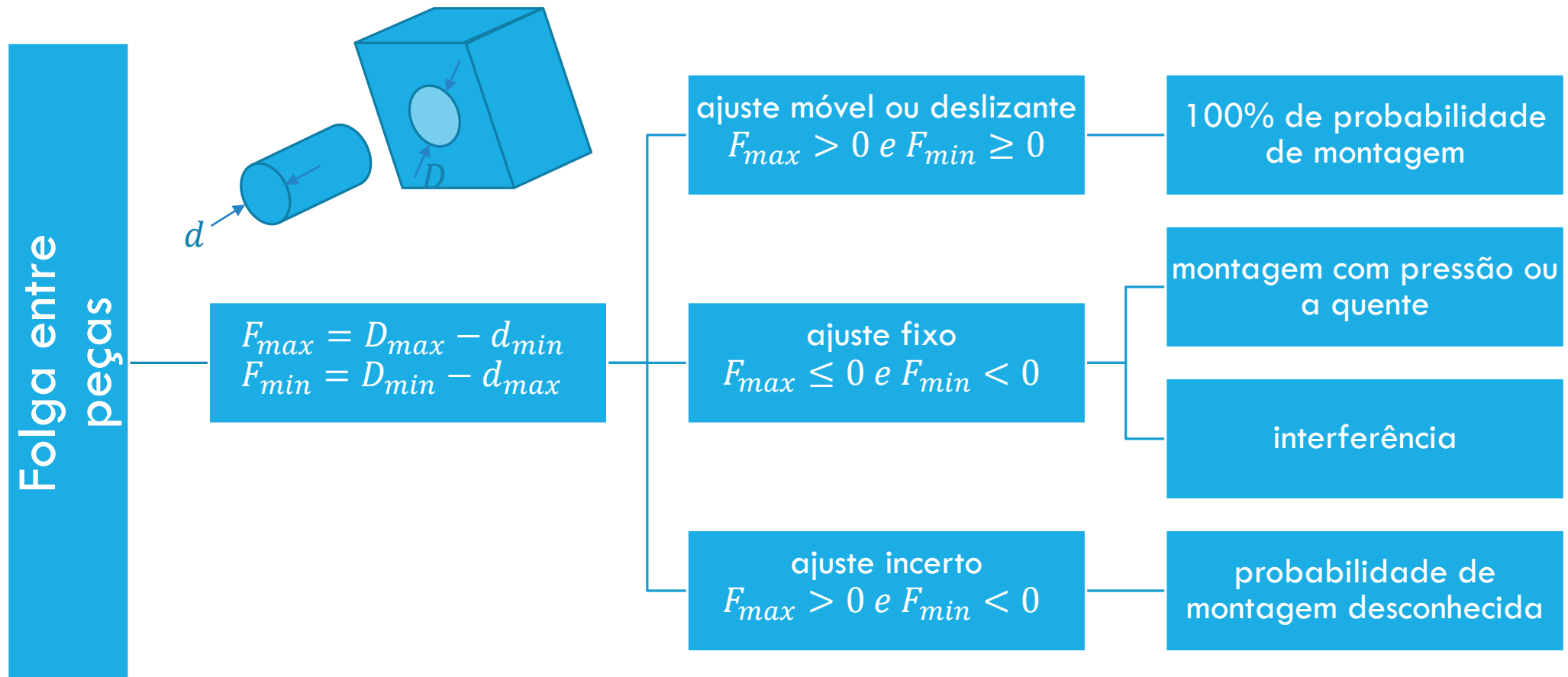
Tolerance class	Range of nominal sizes, $l$ , in mm										
	2 to 30	Over 30 up to 120	Over 120 up to 400	Over 400 up to 1000	Over 1000 up to 2000	Over 2000 up to 4000	Over 4000 up to 8000	Over 8000 up to 12000	Over 12000 up to 16000	Over 16000 up to 20000	Over 20000
	Tolerances, $t$ , in mm										
A	± 1	± 1	± 1	± 2	± 3	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	± 9
B		± 2	± 2	± 3	± 4	± 6	± 8	± 10	± 12	± 14	± 16
C		± 3	± 4	± 6	± 8	± 11	± 14	± 18	± 21	± 24	± 27
D		± 4	± 7	± 9	± 12	± 16	± 21	± 27	± 32	± 36	± 40

Table 2: Tolerances for angular dimensions

Tolerance class	Range of nominal sizes, $l$ , in mm (length or shorter leg)		
	Up to 400	Over 400 up to 1000	Over 1000
	Tolerances, $\Delta\alpha$ , (in degrees and minutes)		
A	± 20	± 15	± 10
B	± 45	± 30	± 20
C	± 1°	± 45	± 30
D	± 1°30	± 1°15	± 1°
Calculated and rounded tolerances, $t$ , in mm/m <sup>1)</sup>			
A	± 6	± 4,5	± 3
B	± 13	± 9	± 6
C	± 18	± 13	± 9
D	± 26	± 22	± 18

<sup>1)</sup> The value indicated in mm/m corresponds to the tangent value of the general tolerance. It is to be multiplied by the length, in m, of the shorter leg.

# MONTAGEM ENTRE PEÇAS – ANÁLISE DE FOLGAS



# MONTAGEM ENTRE PEÇAS — ANÁLISE DE FOLGAS

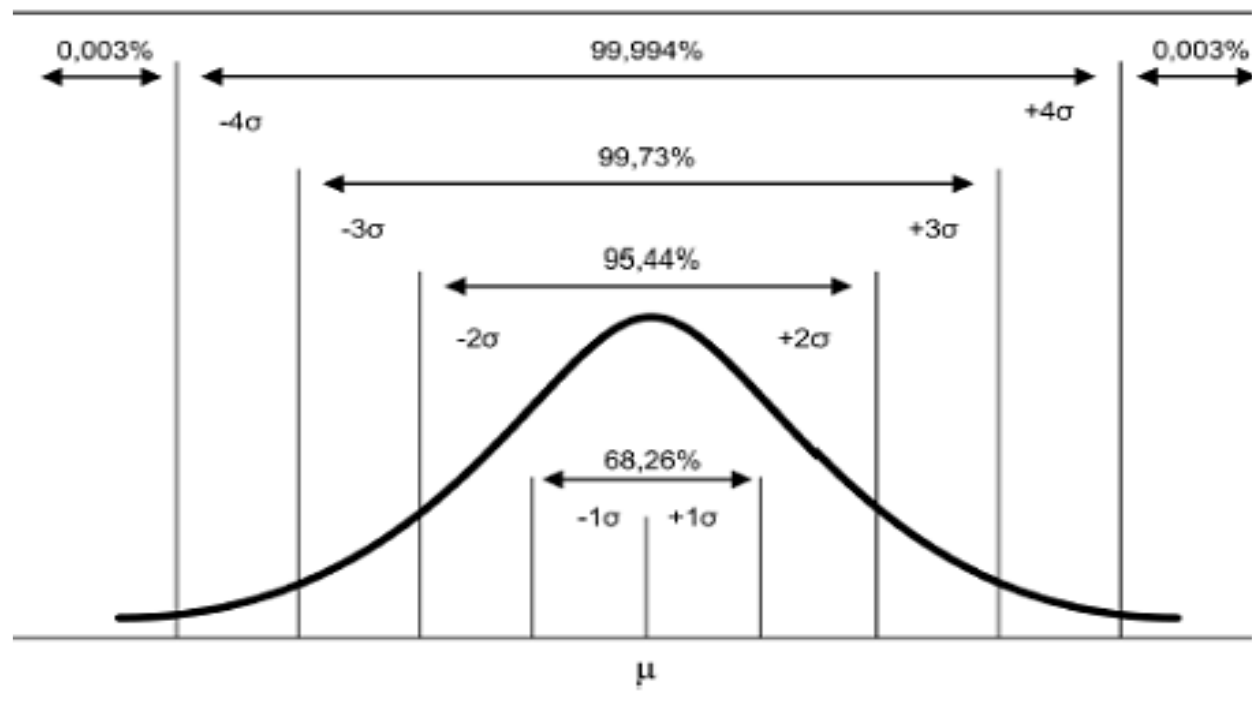
## Método do pior caso

- Propões tolerâncias e folgas que garantem 100% de probabilidade de montagem - ajuste móvel ou deslizante
- Por consequência, possibilita folgas médias grandes

## Método estatístico

- Propõe tolerâncias e folgas mais apertadas e determina a probabilidade de montagem - ajuste incerto
- Permite folgas médias (nominal) mais apertadas

# ANÁLISE DE FOLGAS – MÉTODO ESTATÍSTICO



Considera que as peças fabricadas têm uma distribuição normal dentro da tolerância dimensional definida



# ANÁLISE DE FOLGAS — MÉTODO ESTATÍSTICO

○ valor médio da folga estimado através da soma do valor médio da dimensão de cada peça, valor nominal

$$\bullet \bar{x} = \sum x_i$$

○ desvio padrão da tolerância de cada dimensão é obtida por  $\sigma_3$

$$\bullet s = \frac{tol}{3}$$

○ desvio padrão da dimensão da folga é estimada através da combinação do desvio padrão de cada dimensão

$$\bullet S = \sqrt{\sum s_i^2}$$

Transformando a variável folga na distribuição normal padrão z, obtém-se  $Z^*$ , onde  $x^*$  é a folga mínima desejada

$$\bullet Z^* = \frac{x^* - \bar{x}}{S}$$

# ANÁLISE DE FOLGAS – MÉTODO ESTATÍSTICO

A probabilidade de interferência entre as peças é o resultado da normal padrão e pode ser consultada a partir da tabela de distribuição normal

TABELA A		Probabilidades da normal padrão								
z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
-3,3	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
-3,2	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005
-3,1	0,0010	0,0009	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007
-3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010
-2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
-2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
-2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
-2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
-2,5	0,0063	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048

# ANÁLISE DE FOLGAS – MÉTODO ESTATÍSTICO

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
-3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
-3,3	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
-3,2	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005
-3,1	0,0010	0,0009	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007
-3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010
-2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
-2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
-2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
-2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
-2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
-2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
-2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
-2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
-2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
-2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
-1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
-1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
-1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
-1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
-1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
-1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
-1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
-1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
-1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
-1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
-0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
-0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
-0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
-0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
-0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
-0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
-0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
-0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
-0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
-0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641

# ANÁLISE DE FOLGAS — MÉTODO ESTATÍSTICO

ex: calcular probabilidade de interferência das peças fabricadas com tolerância geral ISO 2768f

