

Modelo para previsão de vida útil residual utilizando perfil de cloreto com pico

Model for estimate residual service life in chloride profile forming peak

André Tavares da Cunha Guimarães¹ & Paulo Roberto do Lago Helene²

¹Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – atcg@vetorial.net

²Departamento de Construção Civil PCC/USP, São Paulo, SP – helene@pcc.usp.br

RESUMO: Estruturas de concreto em ambiente marítimo, especialmente onde há molhagem e secagem ou estruturas em zonas em que se usa sal de degelo é normal obter-se perfil de cloretos formando pico, ou seja, o teor de cloretos aumenta para o interior do concreto e depois diminui. Para permitir a previsão do comportamento em idades mais avançadas mantendo o teor no pico constante e seguindo a segunda lei de Fick, conforme sugerem NILSSON et al. [7] e ANDRADE et al. [4], essa pesquisa adapta modelo apresentado por CRANK [3], demonstrando sua aplicabilidade em um caso real. Conclui-se que o modelo está de acordo com a segunda lei de Fick e que mantém ao longo do tempo o teor no pico constante, sendo de fácil aplicação.

ABSTRACT: Concrete structures in maritime environment, especially in wetting and drying areas, or structures in zones where deicing salt is used to be spread over, is normal to get chloride profile forming peak, that is, the chloride content increases toward the interior of the concrete and after it diminishes. In order to estimate the behavior in more advanced ages keeping the content in its constant peak and following the second law of Fick, according to NILSSON et al. [7] and ANDRADE et al. [4], this research adapts itself to the model presented by CRANK [5], demonstrating its applicability in a real case. Then, it is concluded that the model is in accordance with the second law of Fick and that it keeps in a long run the content in its constant peak, being of easy application.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto em ambiente marítimo, especialmente onde há molhagem e secagem ou estruturas em zonas em que se usa sal de degelo é normal obter-se perfil de cloretos formando picos, ou seja, o teor de cloretos aumenta para o interior do concreto e depois diminui. Alguns pesquisadores [7, 4] mostram como obter modelos até a idade de inspeção da obra.

Conforme NILSSON et al. [7], o comportamento da penetração de cloretos após a formação do pico, continua com um comportamento similar a solução da segunda lei de Fick, considerando o valor do teor de cloretos no pico constante. O problema é definir o tempo a ser considerado na equação. Para contornar esse problema, por regressão, calcula-se um valor de C_s teórico para o perfil e considera-se o tempo da

idade da estrutura até a medição desse perfil (Fig. 1).

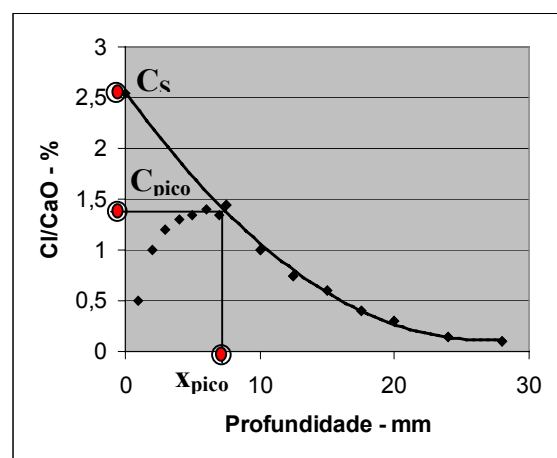


Figura 1 – Perfil teórico quando o perfil real apresenta pico [7]

Para permitir a previsão do comportamento em idades mais avançadas mantendo o teor no

pico constante e seguindo as leis de Fick, essa pesquisa tem por objetivo adaptar modelo apresentado por CRANK [5] e demonstrar sua aplicabilidade em um caso real.

2. MODELO PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL RESIDUAL

NILSSON et al. [7] e ANDRADE et al. [4] sugerem que para concreto com considerável tempo de ataque a cloretos, a concentração no pico de teor de cloretos deve ser constante e o ponto zero do eixo do x deve ser transferido para a profundidade onde forma o pico de teor de cloretos (Fig. 2).

A forma de um pico sugere um efeito equivalente a difusão no sentido das maiores profundidades, a partir desse pico, com perda de parte do material que sofre difusão na direção oposta.

CRANK [5] apresenta a seguinte equação para essa condição de difusão:

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = \alpha (C_{Seq} - C_P), \quad x' = 0 \quad (1)$$

$$\frac{C_{Cl} - C_0}{C_{Seq} - C_0} = \operatorname{erfc} \frac{x'}{2\sqrt{D.t}} - \exp(hx' + h^2 D.t) \operatorname{erfc} \left(\frac{x'}{2\sqrt{D.t}} + h\sqrt{D.t} \right) \quad (2)$$

onde:

C_{Cl} = teor de cloretos na posição x' ;

C_0 = teor inicial de cloretos na posição x' ;

x' = distância entre o pico e a posição do teor

C_{Cl} , ou seja, considerando $x' = 0$ no pico;

$h = \alpha / D$;

t = tempo, considerando $t = 0$ aquele instante em que o concreto começa a sofrer o ataque de cloretos.

$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$.

Nota-se na eq. 2 que conhecendo a curva teórica o único valor desconhecido na equação é o valor de h .

Conforme demonstra CRANK [5] é possível obter-se curvas de $(C_{Cl} - C_0) / (C_{Seq} - C_0)$ em

onde:

C_{Seq} = teor equivalente de cloretos na superfície externa do concreto;

C_P = teor de cloretos no pico;

α = constante de proporcionalidade.

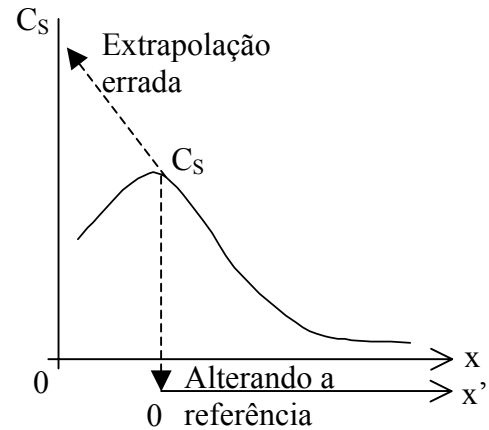


Figura 2 – Correta e errônea extrapolação dos teores do perfil de cloretos [4]

CRANK [5] apresenta a seguinte solução para a eq. 1:

relação a $(x' / 2(D.t)^{1/2})$, visto que para cada relação C_P / C_{Seq} (considerando C_0 igual a zero) tem-se um valor característico de $h(D.t)^{1/2}$ para a curva (Fig. 3).

Para facilitar o cálculo de modelos em concreto que apresenta perfil de cloretos com pico foi desenvolvida a Tabela 1 (Anexo A), onde apresenta valores de $(C_{Cl} - C_0) / (C_{Seq} - C_0)$ em relação a $(x' / 2(D.t)^{1/2})$ para cada curva com um valor característico de $h(D.t)^{1/2}$ e relação C_P / C_{Seq} (valor para $x'/2(D.t)^{1/2}$ igual a zero na Tabela 1).

A Tabela 1 pode ser utilizada da mesma forma que hoje é bastante utilizada a tabela da função erro de Gauss. A primeira coluna da Tabela 1 é justamente o valor de $\operatorname{erfc} = 1 - \operatorname{erf}$, ou seja, para valores de $h(D.t)^{1/2}$ igual a infinito.

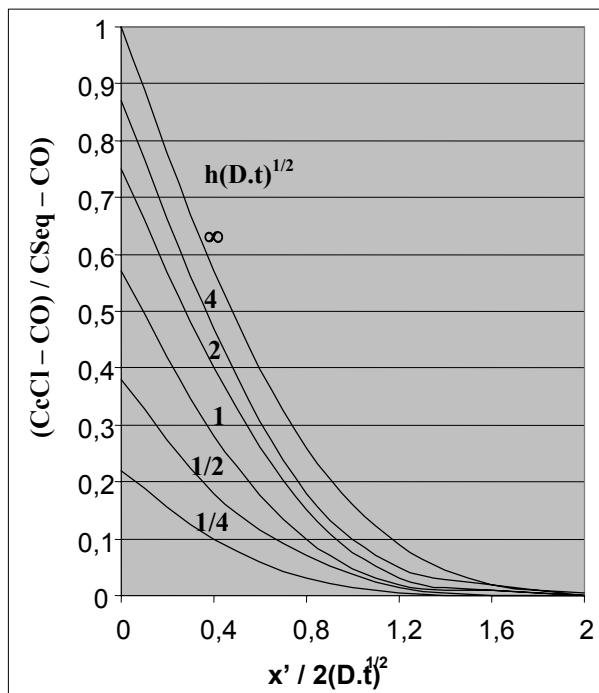


Figura 3 – Curvas de relação entre $(C_{cCl} - C_O) / C_{Seq} - C_O$ e $(x' / 2(D.t)^{1/2})$ [5]

3. APLICAÇÃO DO MODELO EM CASO REAL

3.1. Meio Ambiente

O elemento estrutural utilizado nesta pesquisa é um trecho composto de estacas pranchas do cais do Terminal de Containers-TECON, que se situa em zona de respingo. O cais está localizado em porto marítimo da cidade do Rio Grande – Brasil (Fig. 4).

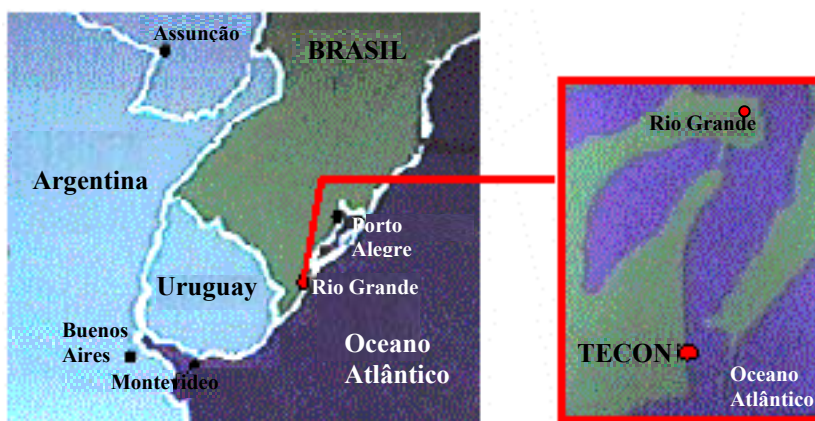


Figura 4 - Localização do cais do Terminal de Containers - TECON, RGS, Brazil.

3.2. Características do concreto

Foram extraídos testemunhos, conforme ASTM C 42 [1], e realizados ensaios de caracterização, além dos dados obtidos em

relatórios de execução da obra. Obteve-se o perfil do teor de cloretos com material extraído com furadeira a cada 5 mm de profundidade (20 furos em seis estacas, totalizando 120 furos, de um trecho de 50 m do cais).

O concreto da estrutura foi executado com agregado graúdo de origem granítica britada com diâmetro máximo ($D_{\text{máx}}$) de 38 mm e a areia é quartzosa. O aglomerante utilizado foi CP IV-25 com 34% de cinza volante com um consumo de 400 kg/m³. A relação a/c é de 0,42 obtendo-se um f_{ck} de 19 MPa. Com 22 anos de uso apresentou massa específica de 2190 kg/m³ e absorção por imersão e após fervura de 7,09 % conforme ASTM C 642 [2]. O cobrimento da grande maioria das barras de aço é igual ou superior a 60 mm.

Os teores de cloretos solúveis em água em relação a massa de concreto, conforme ASTM 1218 [3], foram de 0,33%, 0,50%, 0,60%, 0,47%, 0,35%, 0,21%, 0,13%, 0,11%, 0,08% e 0,04%, respectivamente para as profundidades de 2,5 mm, 7,5 mm, 12,5 mm, 17,5 mm, 22,5 mm, 27,5 mm, 32,5 mm, 37,5 mm, 42,5 mm e 47,5 mm. O teor de 0,07% de cloretos em relação a massa de concreto equivale a 0,4% de cloretos em relação a massa de cimento para o traço do concreto pesquisado [6].

3.3. Modelo para previsão de vida útil residual

Utilizando a segunda lei de Fick:

$$\frac{C_{Cl} - C_o}{C_{Seq} - C_o} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D.t}} \quad (3)$$

e considerando C_o igual a zero e os valores de C_{Cl} para x igual ou superior a 12,5 mm, obteve-se o perfil teórico por regressão, encontrando os seguintes valores característicos para a curva teórica na idade de 22 anos: $C_p = 0,60\%$ em $x_p = 12,5$ mm; $(D.t)^{1/2} = 16,27$ mm; $D = 12,02$ mm².ano⁻¹; $C_{Seq} = 1,03\%$. Obteve-se uma

correlação (R^2) de 0,9961 e erro médio (\bar{E}) de 8,19%, sendo:

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n |(M_n - T_n) / M_n|}{n} \cdot 100 \quad \text{onde:} \quad (4)$$

\bar{E} = erro médio (%);

M_n = concentração de cloreto medida;

T_n = concentração de cloreto teórica;

n = número de pontos da curva

Logo:

$$C_p/C_{Seq} = 0,58$$

Transferindo a origem do eixo do x para o ponto $x = 12,5$ mm ($x' = \text{zero}$) e utilizando a Tabela 1, pode-se resolver, por exemplo, a seguinte questão: obter a vida útil residual das estacas pranchas, sabendo que a maioria dos cobrimentos das barras de aço é de 60 mm ou superior.

Considerando C_o igual a zero temos que C_p/C_{Seq} é igual a 0,58. Considerou-se na Tabela 1 a coluna com valor de $h.(4.D.t)^{1/2}$ igual a 1,05 onde tem-se C_p/C_{Seq} igual a 0,5857 (valor de C_{Cl}/C_{Seq} para o ponto $x' = \text{zero}$).

Considerando o teor de despassivação do aço igual a 0,07% em relação a massa de concreto e considerando C_o igual a zero encontra-se o valor de C_{Cl}/C_{Seq} igual a 0,0686. Por interação dos valores da coluna $x'/(2.(D.t)^{1/2})$ e a coluna de $h.(4.D.t)^{1/2}$ igual a 1,05 chega-se ao valor de $x'/(2.(D.t)^{1/2})$ igual a 0,98. Para $(D.t)^{1/2} = 16,26$ mm aos 22 anos obtém-se D igual a 12,02 mm².ano⁻¹; dado o cobrimento (x) de 60 mm, portanto, para x' igual a 47,5 mm e $x'/(2.(D.t)^{1/2})$ igual a 0,98, tem-se o valor de t igual a 49 anos. Portanto, como a idade atual é de 22 anos, a vida útil residual das estacas pranchas é de 27 anos.

A Fig. 5 mostra os teores medidos aos 22 anos e o perfil aos 22 anos obtido por regressão que representa os teores medidos.

Caso considerasse a curva teórica da idade de inspeção (22 anos) para prever a vida útil obteria-se uma vida útil de 44 anos, ou seja, uma vida útil residual de 22 anos, cinco anos a menos que o previsto considerando o modelo proposto nesta pesquisa.

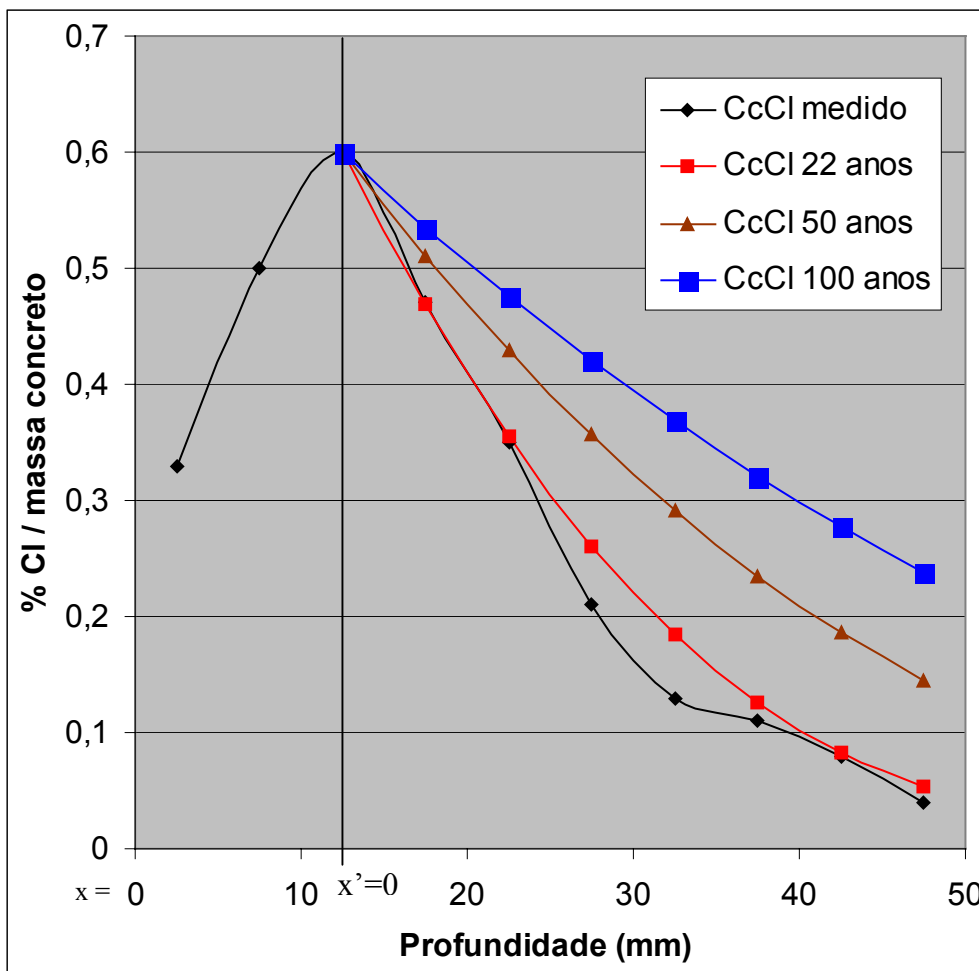


Figura 5 – Perfis de cloretos: a) medidos na idade de 22 anos; b) utilizando modelo proposto para 22 anos; c) utilizando modelo proposto para 50 anos; c) utilizando modelo proposto para 100 anos

Para prever o comportamento do perfil em idades mais avançadas foi calculado os valores de C_{cCl}/C_{seq} na eq. 5 e com esses os valores de C_{cCl} . Esses valores são representados na Fig. 5.

Analisando a Fig. 5 observa-se que o modelo atende ao proposto por NILSSON et al. [7] e ANDRADE et al. [4]:

- Mantém o teor de cloretos constante no pico com o passar do tempo;
- Está de acordo com a segunda lei de Fick.

4. CONCLUSÕES

O modelo obtido nessa pesquisa está de acordo com a segunda lei de Fick e mantém ao longo do tempo o teor no pico constante, conforme sugerem NILSSON et al. [7] e ANDRADE et al. [4].

O modelo proposto é de fácil aplicação, permitindo prever a vida útil de estruturas em ambiente marítimo e que sofram ciclos de

secagem e molhagem, além de estruturas onde há aplicação de sais de degelo.

Este estudo deve ter continuidade, verificando a sua representatividade em estudo de estruturas em uso. Para tal está prevista a obtenção de um perfil em idade mais avançada do cais do TECON e sua comparação com a previsão obtida com o modelo exposto neste trabalho.

AGRADECIMENTO

Agradecemos a FAPESP pelo auxílio à pesquisa, o qual viabilizou a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS. Standart test method for obtaining and testing drilled cores and sawed

- beams of concrete - ASTM C 42-94. In: Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, 1994.
2. _____. Standard test method for specific gravity, absorption, and voids in hardened concrete - ASTM C 642-90. In: Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, 1990.
 3. _____. Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete - ASTM C 1218-92. In: Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia, 1993.
 4. ANDRADE, C.; SAGRERA, J. L.; SANJUÁN, M. A. Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water. In: Second International Rilem Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Paris, 2000.
 5. CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. New York, Oxford University Press, 1975.
 6. GUIMARÃES, A. T. C. *Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos*. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Engenharia Civil.
 7. NILSSON, L.; ANDERSEN, A.; LUPING, T.; UTGENANT, P. Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. In: Second International Rilem Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Paris, 2000.

ANEXO A

TABELA 1 – Valores de $(C_{cCl} - C_o) / (C_{seq} - C_o)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$ e $x'(4Dt)^{-1/2}$

$x'(4Dt)^{-1/2}$	$(C_{cCl} - C_o) / (C_{seq} - C_o)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$										
	Infinito	3,00	2,90	2,80	2,70	2,60	2,50	2,40	2,30	2,20	2,10
0,00	1,0000	0,8210	0,8154	0,8095	0,8031	0,7964	0,7892	0,7815	0,7733	0,7644	0,7549
0,05	0,9436	0,7677	0,7623	0,7566	0,7504	0,7439	0,7370	0,7296	0,7216	0,7131	0,7040
0,10	0,8875	0,7155	0,7103	0,7048	0,6989	0,6926	0,6859	0,6788	0,6712	0,6631	0,6543
0,15	0,8320	0,6646	0,6596	0,6543	0,6486	0,6427	0,6363	0,6295	0,6222	0,6144	0,6061
0,20	0,7773	0,6152	0,6104	0,6053	0,5999	0,5942	0,5881	0,5817	0,5748	0,5674	0,5594
0,25	0,7237	0,5674	0,5629	0,5580	0,5529	0,5475	0,5417	0,5356	0,5291	0,5221	0,5146
0,30	0,6714	0,5215	0,5172	0,5126	0,5078	0,5027	0,4972	0,4914	0,4853	0,4787	0,4717
0,35	0,6206	0,4775	0,4735	0,4692	0,4646	0,4598	0,4547	0,4493	0,4435	0,4374	0,4308
0,40	0,5716	0,4357	0,4318	0,4278	0,4236	0,4191	0,4143	0,4092	0,4038	0,3981	0,3920
0,45	0,5245	0,3960	0,3924	0,3887	0,3847	0,3805	0,3761	0,3714	0,3664	0,3610	0,3553
0,50	0,4795	0,3586	0,3553	0,3518	0,3481	0,3442	0,3401	0,3357	0,3311	0,3262	0,3209
0,55	0,4367	0,3234	0,3204	0,3172	0,3138	0,3102	0,3064	0,3024	0,2981	0,2936	0,2887
0,60	0,3961	0,2906	0,2878	0,2848	0,2817	0,2784	0,2749	0,2713	0,2674	0,2632	0,2588
0,65	0,3580	0,2601	0,2575	0,2548	0,2520	0,2490	0,2458	0,2424	0,2388	0,2351	0,2310
0,70	0,3222	0,2319	0,2295	0,2271	0,2245	0,2217	0,2188	0,2158	0,2125	0,2091	0,2055
0,75	0,2888	0,2059	0,2038	0,2015	0,1992	0,1967	0,1941	0,1913	0,1884	0,1853	0,1820
0,80	0,2579	0,1821	0,1802	0,1781	0,1760	0,1738	0,1714	0,1689	0,1663	0,1635	0,1606
0,85	0,2293	0,1604	0,1586	0,1568	0,1549	0,1529	0,1508	0,1486	0,1462	0,1437	0,1411
0,90	0,2031	0,1407	0,1391	0,1375	0,1358	0,1340	0,1321	0,1301	0,1280	0,1258	0,1235
0,95	0,1791	0,1229	0,1215	0,1201	0,1185	0,1170	0,1153	0,1135	0,1117	0,1097	0,1076
1,00	0,1573	0,1069	0,1057	0,1044	0,1031	0,1017	0,1002	0,0986	0,0970	0,0952	0,0934
1,05	0,1376	0,0929	0,0916	0,0904	0,0892	0,0880	0,0867	0,0853	0,0839	0,0823	0,0807
1,10	0,1198	0,0793	0,0789	0,0780	0,0769	0,0758	0,0747	0,0735	0,0722	0,0709	0,0695
1,15	0,1039	0,0696	0,0681	0,0670	0,0660	0,0651	0,0641	0,0630	0,0619	0,0608	0,0596
1,20	0,0897	0,0577	0,0575	0,0572	0,0565	0,0556	0,0548	0,0538	0,0529	0,0519	0,0508
1,25	0,0771	0,0512	0,0501	0,0489	0,0481	0,0473	0,0466	0,0458	0,0450	0,0441	0,0432
1,30	0,0660	0,0422	0,0411	0,0409	0,0407	0,0401	0,0395	0,0388	0,0381	0,0373	0,0366
1,35	0,0562	0,0357	0,0363	0,0354	0,0345	0,0338	0,0333	0,0327	0,0321	0,0315	0,0308
1,40	0,0477	0,0300	0,0296	0,0287	0,0286	0,0284	0,0280	0,0275	0,0269	0,0264	0,0258
1,45	0,0403	0,0251	0,0248	0,0252	0,0246	0,0239	0,0234	0,0230	0,0225	0,0221	0,0216
1,50	0,0339	0,0209	0,0206	0,0203	0,0197	0,0196	0,0195	0,0191	0,0187	0,0184	0,0180
1,55	0,0284	0,0173	0,0171	0,0169	0,0172	0,0167	0,0162	0,0158	0,0155	0,0152	0,0149
1,60	0,0237	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0132	0,0132	0,0131	0,0128	0,0125	0,0123
1,65	0,0196	0,0118	0,0116	0,0114	0,0113	0,0115	0,0112	0,0108	0,0105	0,0103	0,0101
1,70	0,0162	0,0096	0,0095	0,0094	0,0092	0,0091	0,0087	0,0087	0,0086	0,0084	0,0082
1,75	0,0133	0,0078	0,0077	0,0076	0,0075	0,0074	0,0076	0,0073	0,0070	0,0068	0,0067
1,80	0,0109	0,0064	0,0063	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059	0,0056	0,0056	0,0055	0,0054
1,85	0,0089	0,0051	0,0051	0,0050	0,0049	0,0048	0,0047	0,0049	0,0047	0,0045	0,0044
1,90	0,0072	0,0041	0,0041	0,0040	0,0039	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036	0,0035	0,0035
1,95	0,0058	0,0033	0,0033	0,0032	0,0032	0,0031	0,0030	0,0030	0,0031	0,0029	0,0028
2,00	0,0047	0,0026	0,0026	0,0026	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	0,0023	0,0022	0,0022

TABELA 1 – Valores de $(C_{cCl} - C_O) / (C_{Seq} - C_O)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$ e $x(4Dt)^{-1/2}$ (continuação)

$X^2(4Dt)^{-1/2}$	$(C_{cCl} - C_O) / (C_{Seq} - C_O)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$									
	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60	1,55
0,00	0,7446	0,7392	0,7335	0,7276	0,7214	0,7150	0,7083	0,7013	0,6940	0,6864
0,05	0,6941	0,6889	0,6834	0,6778	0,6719	0,6658	0,6594	0,6527	0,6457	0,6384
0,10	0,6449	0,6399	0,6347	0,6293	0,6237	0,6178	0,6117	0,6054	0,5988	0,5919
0,15	0,5971	0,5923	0,5874	0,5823	0,5770	0,5714	0,5657	0,5596	0,5534	0,5468
0,20	0,5509	0,5465	0,5418	0,5369	0,5319	0,5267	0,5212	0,5156	0,5097	0,5035
0,25	0,5066	0,5024	0,4980	0,4934	0,4887	0,4838	0,4786	0,4733	0,4678	0,4620
0,30	0,4641	0,4602	0,4561	0,4518	0,4474	0,4427	0,4380	0,4330	0,4278	0,4224
0,35	0,4237	0,4200	0,4162	0,4122	0,4081	0,4038	0,3993	0,3947	0,3898	0,3848
0,40	0,3854	0,3820	0,3784	0,3747	0,3708	0,3669	0,3627	0,3584	0,3540	0,3493
0,45	0,3493	0,3461	0,3428	0,3393	0,3358	0,3321	0,3283	0,3243	0,3202	0,3159
0,50	0,3153	0,3124	0,3093	0,3062	0,3029	0,2995	0,2960	0,2924	0,2886	0,2847
0,55	0,2836	0,2809	0,2781	0,2752	0,2722	0,2691	0,2659	0,2626	0,2591	0,2555
0,60	0,2541	0,2516	0,2491	0,2464	0,2437	0,2409	0,2380	0,2349	0,2318	0,2285
0,65	0,2268	0,2245	0,2222	0,2198	0,2173	0,2148	0,2121	0,2094	0,2065	0,2036
0,70	0,2016	0,1996	0,1975	0,1953	0,1931	0,1907	0,1883	0,1859	0,1833	0,1806
0,75	0,1785	0,1767	0,1748	0,1728	0,1708	0,1687	0,1666	0,1643	0,1620	0,1597
0,80	0,1574	0,1558	0,1541	0,1523	0,1505	0,1487	0,1467	0,1447	0,1427	0,1406
0,85	0,1383	0,1368	0,1353	0,1337	0,1321	0,1305	0,1288	0,1270	0,1251	0,1232
0,90	0,1210	0,1197	0,1183	0,1169	0,1155	0,1140	0,1125	0,1109	0,1093	0,1076
0,95	0,1054	0,1042	0,1031	0,1018	0,1006	0,0993	0,0979	0,0965	0,0951	0,0936
1,00	0,0914	0,0904	0,0894	0,0883	0,0872	0,0861	0,0849	0,0837	0,0824	0,0811
1,05	0,0790	0,0781	0,0772	0,0763	0,0753	0,0743	0,0733	0,0722	0,0711	0,0700
1,10	0,0680	0,0672	0,0664	0,0656	0,0647	0,0639	0,0630	0,0620	0,0611	0,0601
1,15	0,0583	0,0576	0,0569	0,0562	0,0554	0,0547	0,0539	0,0531	0,0523	0,0514
1,20	0,0497	0,0491	0,0485	0,0479	0,0473	0,0466	0,0459	0,0453	0,0445	0,0438
1,25	0,0422	0,0417	0,0412	0,0407	0,0401	0,0396	0,0390	0,0384	0,0378	0,0372
1,30	0,0357	0,0353	0,0349	0,0344	0,0339	0,0335	0,0330	0,0325	0,0319	0,0314
1,35	0,0301	0,0297	0,0294	0,0290	0,0286	0,0282	0,0277	0,0273	0,0269	0,0264
1,40	0,0252	0,0249	0,0246	0,0243	0,0239	0,0236	0,0232	0,0229	0,0225	0,0221
1,45	0,0211	0,0208	0,0205	0,0203	0,0200	0,0197	0,0194	0,0191	0,0188	0,0184
1,50	0,0175	0,0173	0,0171	0,0168	0,0166	0,0164	0,0161	0,0159	0,0156	0,0153
1,55	0,0145	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127
1,60	0,0120	0,0118	0,0116	0,0115	0,0113	0,0111	0,0110	0,0108	0,0106	0,0104
1,65	0,0098	0,0097	0,0096	0,0094	0,0093	0,0091	0,0090	0,0088	0,0087	0,0085
1,70	0,0080	0,0079	0,0078	0,0077	0,0076	0,0075	0,0073	0,0072	0,0071	0,0070
1,75	0,0065	0,0064	0,0063	0,0063	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059	0,0058	0,0057
1,80	0,0053	0,0052	0,0051	0,0051	0,0050	0,0049	0,0048	0,0047	0,0047	0,0046
1,85	0,0043	0,0042	0,0041	0,0041	0,0040	0,0040	0,0039	0,0038	0,0038	0,0037
1,90	0,0034	0,0034	0,0033	0,0033	0,0032	0,0032	0,0031	0,0031	0,0030	0,0030
1,95	0,0027	0,0027	0,0027	0,0026	0,0026	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	0,0024
2,00	0,0022	0,0021	0,0021	0,0021	0,0020	0,0020	0,0020	0,0019	0,0019	0,0019

TABELA 1 – Valores de $(C_{Cl} - C_0) / (C_{Seq} - C_0)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$ e $x(4Dt)^{-1/2}$ (continuação)

$X^2(4Dt)^{-1/2}$	$(C_{Cl} - C_0) / (C_{Seq} - C_0)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$									
	1,50	1,45	1,40	1,35	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05
0,00	0,6784	0,6700	0,6613	0,6520	0,6424	0,6322	0,6215	0,6102	0,5983	0,5857
0,05	0,6308	0,6228	0,6145	0,6057	0,5965	0,5869	0,5767	0,5660	0,5548	0,5429
0,10	0,5846	0,5771	0,5692	0,5609	0,5522	0,5430	0,5335	0,5234	0,5128	0,5016
0,15	0,5400	0,5329	0,5254	0,5176	0,5094	0,5008	0,4918	0,4823	0,4724	0,4619
0,20	0,4971	0,4904	0,4833	0,4760	0,4683	0,4603	0,4518	0,4430	0,4337	0,4239
0,25	0,4560	0,4497	0,4431	0,4363	0,4291	0,4216	0,4137	0,4055	0,3968	0,3877
0,30	0,4168	0,4109	0,4048	0,3984	0,3918	0,3848	0,3775	0,3698	0,3618	0,3534
0,35	0,3796	0,3742	0,3685	0,3626	0,3564	0,3499	0,3432	0,3361	0,3287	0,3209
0,40	0,3445	0,3395	0,3342	0,3288	0,3231	0,3171	0,3109	0,3044	0,2976	0,2904
0,45	0,3115	0,3069	0,3020	0,2970	0,2918	0,2863	0,2806	0,2747	0,2684	0,2619
0,50	0,2806	0,2764	0,2719	0,2673	0,2626	0,2576	0,2524	0,2469	0,2412	0,2353
0,55	0,2518	0,2479	0,2439	0,2397	0,2354	0,2308	0,2261	0,2211	0,2160	0,2106
0,60	0,2251	0,2216	0,2180	0,2142	0,2102	0,2061	0,2018	0,1973	0,1927	0,1878
0,65	0,2005	0,1973	0,1940	0,1906	0,1870	0,1833	0,1794	0,1754	0,1712	0,1668
0,70	0,1779	0,1750	0,1720	0,1689	0,1657	0,1624	0,1589	0,1553	0,1515	0,1476
0,75	0,1572	0,1546	0,1519	0,1492	0,1463	0,1433	0,1402	0,1370	0,1336	0,1301
0,80	0,1383	0,1360	0,1337	0,1312	0,1286	0,1260	0,1232	0,1204	0,1174	0,1143
0,85	0,1213	0,1192	0,1171	0,1149	0,1127	0,1103	0,1079	0,1053	0,1027	0,0999
0,90	0,1059	0,1041	0,1022	0,1003	0,0983	0,0962	0,0940	0,0918	0,0895	0,0871
0,95	0,0921	0,0905	0,0889	0,0872	0,0854	0,0836	0,0817	0,0797	0,0777	0,0755
1,00	0,0797	0,0784	0,0769	0,0754	0,0739	0,0723	0,0706	0,0689	0,0671	0,0653
1,05	0,0688	0,0676	0,0663	0,0650	0,0637	0,0623	0,0608	0,0593	0,0578	0,0562
1,10	0,0591	0,0580	0,0569	0,0558	0,0546	0,0534	0,0522	0,0509	0,0495	0,0481
1,15	0,0505	0,0496	0,0487	0,0477	0,0467	0,0457	0,0446	0,0435	0,0423	0,0411
1,20	0,0430	0,0423	0,0414	0,0406	0,0397	0,0388	0,0379	0,0370	0,0360	0,0349
1,25	0,0365	0,0358	0,0351	0,0344	0,0337	0,0329	0,0321	0,0313	0,0305	0,0296
1,30	0,0308	0,0303	0,0297	0,0291	0,0284	0,0278	0,0271	0,0264	0,0257	0,0249
1,35	0,0259	0,0254	0,0249	0,0244	0,0239	0,0233	0,0228	0,0222	0,0216	0,0209
1,40	0,0217	0,0213	0,0209	0,0204	0,0200	0,0195	0,0190	0,0185	0,0180	0,0175
1,45	0,0181	0,0178	0,0174	0,0170	0,0166	0,0163	0,0159	0,0154	0,0150	0,0146
1,50	0,0150	0,0147	0,0144	0,0141	0,0138	0,0135	0,0131	0,0128	0,0124	0,0121
1,55	0,0124	0,0122	0,0119	0,0117	0,0114	0,0111	0,0109	0,0106	0,0103	0,0100
1,60	0,0102	0,0100	0,0098	0,0096	0,0094	0,0092	0,0089	0,0087	0,0084	0,0082
1,65	0,0084	0,0082	0,0080	0,0079	0,0077	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0067
1,70	0,0068	0,0067	0,0066	0,0064	0,0063	0,0061	0,0060	0,0058	0,0056	0,0054
1,75	0,0055	0,0054	0,0053	0,0052	0,0051	0,0050	0,0048	0,0047	0,0046	0,0044
1,80	0,0045	0,0044	0,0043	0,0042	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
1,85	0,0036	0,0035	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0030	0,0029
1,90	0,0029	0,0028	0,0028	0,0027	0,0026	0,0026	0,0025	0,0024	0,0024	0,0023
1,95	0,0023	0,0023	0,0022	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019	0,0019	0,0018
2,00	0,0018	0,0018	0,0018	0,0017	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014

TABELA 1 – Valores de $(C_{Cl} - C_O) / (C_{Seq} - C_O)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$ e $x(4Dt)^{-1/2}$ (continuação)

$X(4Dt)^{-1/2}$	$(C_{Cl} - C_O) / (C_{Seq} - C_O)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$									
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55
0,00	0,5724	0,5584	0,5435	0,5277	0,5109	0,4931	0,4741	0,4538	0,4322	0,4091
0,05	0,5304	0,5171	0,5031	0,4882	0,4725	0,4557	0,4380	0,4190	0,3988	0,3772
0,10	0,4898	0,4774	0,4642	0,4503	0,4355	0,4199	0,4033	0,3856	0,3668	0,3468
0,15	0,4509	0,4392	0,4269	0,4139	0,4002	0,3856	0,3702	0,3538	0,3363	0,3178
0,20	0,4136	0,4028	0,3913	0,3792	0,3665	0,3530	0,3387	0,3235	0,3074	0,2902
0,25	0,3781	0,3681	0,3575	0,3463	0,3345	0,3220	0,3088	0,2948	0,2800	0,2642
0,30	0,3445	0,3352	0,3254	0,3151	0,3042	0,2927	0,2806	0,2677	0,2541	0,2397
0,35	0,3128	0,3042	0,2952	0,2857	0,2757	0,2652	0,2541	0,2423	0,2299	0,2167
0,40	0,2829	0,2751	0,2668	0,2582	0,2490	0,2394	0,2293	0,2186	0,2072	0,1953
0,45	0,2550	0,2479	0,2403	0,2324	0,2241	0,2154	0,2062	0,1964	0,1862	0,1753
0,50	0,2290	0,2225	0,2157	0,2085	0,2010	0,1930	0,1847	0,1759	0,1666	0,1568
0,55	0,2049	0,1990	0,1928	0,1864	0,1795	0,1724	0,1649	0,1569	0,1486	0,1398
0,60	0,1827	0,1774	0,1718	0,1659	0,1598	0,1534	0,1466	0,1395	0,1320	0,1242
0,65	0,1622	0,1574	0,1524	0,1472	0,1417	0,1360	0,1299	0,1236	0,1169	0,1099
0,70	0,1435	0,1392	0,1348	0,1301	0,1252	0,1201	0,1147	0,1090	0,1031	0,0969
0,75	0,1265	0,1227	0,1187	0,1145	0,1102	0,1056	0,1008	0,0958	0,0906	0,0851
0,80	0,1110	0,1076	0,1041	0,1004	0,0966	0,0925	0,0883	0,0839	0,0793	0,0744
0,85	0,0971	0,0941	0,0910	0,0877	0,0843	0,0808	0,0771	0,0732	0,0691	0,0649
0,90	0,0845	0,0819	0,0792	0,0763	0,0733	0,0702	0,0670	0,0636	0,0600	0,0563
0,95	0,0733	0,0710	0,0686	0,0661	0,0635	0,0608	0,0580	0,0550	0,0519	0,0487
1,00	0,0633	0,0613	0,0593	0,0571	0,0548	0,0525	0,0500	0,0474	0,0447	0,0419
1,05	0,0545	0,0528	0,0510	0,0491	0,0471	0,0451	0,0429	0,0407	0,0384	0,0360
1,10	0,0467	0,0452	0,0436	0,0420	0,0403	0,0386	0,0367	0,0348	0,0328	0,0307
1,15	0,0399	0,0386	0,0372	0,0358	0,0344	0,0329	0,0313	0,0296	0,0279	0,0262
1,20	0,0339	0,0328	0,0316	0,0304	0,0292	0,0279	0,0265	0,0251	0,0237	0,0222
1,25	0,0287	0,0277	0,0267	0,0257	0,0247	0,0236	0,0224	0,0212	0,0200	0,0187
1,30	0,0242	0,0234	0,0225	0,0217	0,0208	0,0198	0,0189	0,0179	0,0168	0,0157
1,35	0,0203	0,0196	0,0189	0,0182	0,0174	0,0166	0,0158	0,0150	0,0141	0,0132
1,40	0,0169	0,0164	0,0158	0,0152	0,0145	0,0139	0,0132	0,0125	0,0117	0,0110
1,45	0,0141	0,0136	0,0131	0,0126	0,0121	0,0115	0,0110	0,0104	0,0097	0,0091
1,50	0,0117	0,0113	0,0109	0,0104	0,0100	0,0095	0,0091	0,0086	0,0081	0,0075
1,55	0,0096	0,0093	0,0090	0,0086	0,0082	0,0079	0,0075	0,0071	0,0066	0,0062
1,60	0,0079	0,0076	0,0074	0,0071	0,0068	0,0064	0,0061	0,0058	0,0054	0,0051
1,65	0,0065	0,0062	0,0060	0,0058	0,0055	0,0053	0,0050	0,0047	0,0044	0,0041
1,70	0,0053	0,0051	0,0049	0,0047	0,0045	0,0043	0,0041	0,0038	0,0036	0,0034
1,75	0,0043	0,0041	0,0040	0,0038	0,0036	0,0035	0,0033	0,0031	0,0029	0,0027
1,80	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0029	0,0028	0,0027	0,0025	0,0024	0,0022
1,85	0,0028	0,0027	0,0026	0,0025	0,0024	0,0022	0,0021	0,0020	0,0019	0,0018
1,90	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019	0,0018	0,0017	0,0016	0,0015	0,0014
1,95	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0014	0,0014	0,0013	0,0012	0,0011
2,00	0,0014	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0010	0,0009	0,0009

TABELA 1 – Valores de $(C_{cCl} - C_O) / (C_{Seq} - C_O)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$ e $x(4Dt)^{-1/2}$ (continuação)

$X^2(4Dt)^{-1/2}$	$(C_{cCl} - C_O) / (C_{Seq} - C_O)$ para valores de $h(D.t)^{1/2}$									
	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05
0,00	0,3843	0,3577	0,3292	0,2985	0,2654	0,2297	0,1910	0,1491	0,1035	0,0540
0,05	0,3542	0,3295	0,3030	0,2745	0,2439	0,2109	0,1752	0,1366	0,0948	0,0494
0,10	0,3254	0,3025	0,2780	0,2517	0,2234	0,1930	0,1602	0,1249	0,0866	0,0451
0,15	0,2980	0,2768	0,2542	0,2300	0,2040	0,1761	0,1461	0,1137	0,0788	0,0410
0,20	0,2720	0,2525	0,2318	0,2095	0,1857	0,1602	0,1328	0,1033	0,0715	0,0372
0,25	0,2474	0,2296	0,2106	0,1903	0,1685	0,1453	0,1203	0,0935	0,0647	0,0336
0,30	0,2244	0,2081	0,1907	0,1722	0,1524	0,1313	0,1087	0,0844	0,0583	0,0303
0,35	0,2027	0,1879	0,1721	0,1553	0,1374	0,1183	0,0978	0,0759	0,0524	0,0272
0,40	0,1826	0,1691	0,1548	0,1396	0,1234	0,1062	0,0878	0,0681	0,0470	0,0243
0,45	0,1638	0,1517	0,1388	0,1251	0,1105	0,0950	0,0785	0,0608	0,0419	0,0217
0,50	0,1465	0,1356	0,1240	0,1117	0,0986	0,0847	0,0699	0,0541	0,0373	0,0193
0,55	0,1305	0,1207	0,1103	0,0993	0,0876	0,0752	0,0621	0,0480	0,0331	0,0171
0,60	0,1159	0,1071	0,0978	0,0880	0,0776	0,0666	0,0549	0,0425	0,0292	0,0151
0,65	0,1025	0,0947	0,0864	0,0777	0,0685	0,0588	0,0484	0,0374	0,0257	0,0133
0,70	0,0903	0,0834	0,0761	0,0684	0,0602	0,0516	0,0425	0,0328	0,0226	0,0116
0,75	0,0793	0,0732	0,0667	0,0599	0,0528	0,0452	0,0372	0,0287	0,0197	0,0102
0,80	0,0693	0,0639	0,0583	0,0523	0,0461	0,0394	0,0324	0,0250	0,0172	0,0088
0,85	0,0604	0,0557	0,0507	0,0455	0,0401	0,0343	0,0282	0,0217	0,0149	0,0077
0,90	0,0524	0,0483	0,0440	0,0395	0,0347	0,0297	0,0244	0,0188	0,0129	0,0066
0,95	0,0453	0,0417	0,0380	0,0341	0,0299	0,0256	0,0210	0,0162	0,0111	0,0057
1,00	0,0390	0,0359	0,0327	0,0293	0,0257	0,0220	0,0180	0,0139	0,0095	0,0049
1,05	0,0334	0,0308	0,0280	0,0251	0,0220	0,0188	0,0154	0,0119	0,0081	0,0042
1,10	0,0286	0,0263	0,0239	0,0214	0,0188	0,0160	0,0131	0,0101	0,0069	0,0036
1,15	0,0243	0,0223	0,0203	0,0182	0,0160	0,0136	0,0112	0,0086	0,0059	0,0030
1,20	0,0206	0,0189	0,0172	0,0154	0,0135	0,0115	0,0094	0,0072	0,0050	0,0025
1,25	0,0174	0,0160	0,0145	0,0130	0,0114	0,0097	0,0079	0,0061	0,0042	0,0021
1,30	0,0146	0,0134	0,0122	0,0109	0,0095	0,0081	0,0067	0,0051	0,0035	0,0018
1,35	0,0122	0,0112	0,0102	0,0091	0,0080	0,0068	0,0056	0,0043	0,0029	0,0015
1,40	0,0102	0,0093	0,0085	0,0076	0,0066	0,0056	0,0046	0,0035	0,0024	0,0012
1,45	0,0084	0,0078	0,0070	0,0063	0,0055	0,0047	0,0038	0,0029	0,0020	0,0010
1,50	0,0070	0,0064	0,0058	0,0052	0,0045	0,0039	0,0032	0,0024	0,0016	0,0008
1,55	0,0057	0,0053	0,0048	0,0043	0,0037	0,0032	0,0026	0,0020	0,0014	0,0007
1,60	0,0047	0,0043	0,0039	0,0035	0,0030	0,0026	0,0021	0,0016	0,0011	0,0006
1,65	0,0038	0,0035	0,0032	0,0028	0,0025	0,0021	0,0017	0,0013	0,0009	0,0005
1,70	0,0031	0,0029	0,0026	0,0023	0,0020	0,0017	0,0014	0,0011	0,0007	0,0004
1,75	0,0025	0,0023	0,0021	0,0019	0,0016	0,0014	0,0011	0,0009	0,0006	0,0003
1,80	0,0020	0,0019	0,0017	0,0015	0,0013	0,0011	0,0009	0,0007	0,0005	0,0002
1,85	0,0016	0,0015	0,0013	0,0012	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006	0,0004	0,0002
1,90	0,0013	0,0012	0,0011	0,0010	0,0008	0,0007	0,0006	0,0004	0,0003	0,0002
1,95	0,0010	0,0009	0,0009	0,0008	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0002	0,0001
2,00	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0001