

Metodologia para a Caracterização do Coeficiente de Manning Variando na Seção Transversal e ao Longo do Canal Estudo de Caso Bacia do Alto Sapucaí-MG

Artur José Soares Matos

Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

artur.matos@cprm.gov.br

André Pioltine, Frederico Fábio Mauad

EESC/USP.

pioltine@yahoo.com.br, mauadffm@sc.usp.br

Alexandre Augusto Barbosa

Instituto de Recursos Naturais, UNIFEI.

barbosa@unifei.edu.br

Recebido: 26/11/08 - revisado: 05/03/10 - aceito: 25/08/11

RESUMO

Este trabalho, baseado em estudos teóricos e práticos sobre escoamentos em canais abertos, tem por objetivo determinar o coeficiente de rugosidade ao escoamento (coeficiente de Manning), com a intenção de dar suporte a futuros trabalhos que o utilizarão tanto na seção transversal como ao longo do canal, em simulações de escoamentos não permanentes utilizando as equações de Saint-Venant. Para a caracterização da resistência na seção foram utilizados como base dados de alguns rios nos Estados Unidos, nos quais foram adimensionalizados. A partir destes foram construídas curvas que relacionam a profundidade do escoamento com o coeficiente de Manning para o Rio Sapucaí no estado de Minas Gerais. Foi também traçado o perfil longitudinal por meio de observações em campo. Estes dados são indispensáveis na calibração de modelos hidráulicos. Como resultado pode-se observar que o coeficiente de Manning calculado através da metodologia proposta se aproxima dos valores medidos em campo

Palavras-chave: Coeficiente de Manning, Escoamento Uniforme, Canais Naturais.

INTRODUÇÃO

A definição do coeficiente de Manning (coeficiente de rugosidade do escoamento), proposto pelo engenheiro Irlandês Robert Manning em 1889, ainda hoje é de difícil definição para canais naturais em locais que não possuem medições de vazão ou com poucos estudos. O coeficiente de rugosidade do escoamento normalmente é definido, como forma de simplificação, como único para uma determinada seção de um canal. Mas como demonstrado por Chow (1959), este coeficiente varia na seção de acordo com o nível d'água. Em aspectos gerais, quanto menor a profundidade d'água, maiores os efeitos das irregularidades do fundo do canal e, portanto maior o seu valor. Este artigo propõe uma metodologia para determinar o coeficiente de Man-

ning variando de acordo com a profundidade d'água na seção transversal.

O levantamento do coeficiente de Manning (n) para o Rio Sapucaí-MG, para utilização, por exemplo, nas equações de Saint-Venant, reveste-se de grande importância para os cálculos hidrodinâmicos quando da propagação de eventos extremos de cheias. As comunidades circunvizinhas na Bacia do Alto Sapucaí poderão obter grandes benefícios se os resultados obtidos nos modelos hidrodinâmicos forem compatíveis aos dados levantados nas estações fluviométricas telemetrizadas instaladas na região.

Por meio das caracterizações de rugosidade em campo, e também com base em dados de rios de outros países, foram construídas curvas que relacionam profundidade e coeficiente de Manning ao longo de todo o Rio Sapucaí. Estas caracterizações do coeficiente de rugosidade de Manning, em função tanto da profundidade da lâmina d'água, quan-

to da rugosidade ao longo do canal, são indispensáveis para a calibração de um modelo hidráulico, que se baseia em equações hidrodinâmicas.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Sapucaí integra a bacia do Rio Grande, localizando-se na região Sudeste, atravessando dois estados, São Paulo e Minas Gerais. O Rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, na cidade de Campos de Jordão-SP, a uma altitude de 1650 m, e deságua no Lago de Furnas a 780 m de altitude, e tem um comprimento aproximado de 343 km (34 km dentro do Estado de São Paulo e 309 km em Minas Gerais). De sua nascente até a seção imediatamente a jusante do Ribeirão Piranguçu, o rio percorre 66 km drenando uma área de 1.050 km² – basicamente, esta é a área da bacia a montante da cidade de Itajubá-MG. Podemos observar na Figura 1 um trecho rio Sapucaí já dentro deste município.

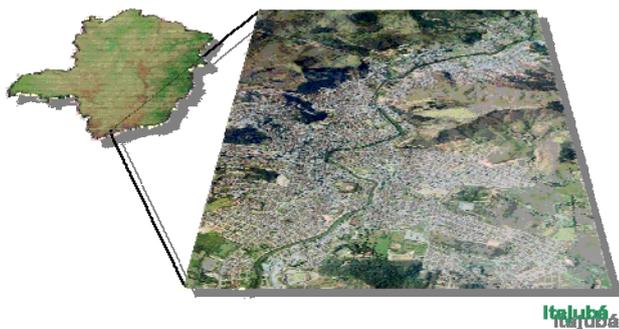


Figura 1 – Rio Sapucaí no município de Itajubá-MG

O município de Itajubá (Coordenadas UTM 453146.24 E; 7510834.60 N; Zona 23), localizado ao Sul do Estado de Minas Gerais, está inserido na planície de inundação do Rio Sapucaí, constituindo área susceptível aos eventos de cheias. A região onde se realizou o presente estudo localiza-se a montante do município de Itajubá, denominada Bacia do Alto Sapucaí.

MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE MANNING AO LONGO DO CANAL

A caracterização do coeficiente de Manning para a Bacia do Alto Sapucaí foi realizada com base

no procedimento proposto por Cowan (1944) apud Chow (1959) por meio da Equação 1.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (1)$$

Onde n_0 é o valor básico de n para um canal reto, uniforme e liso, livre de materiais naturais envolvidos, n_1 é o valor adicional a n_0 para correção dos efeitos das irregularidades da superfície, n_2 é um valor para variações na forma e tamanho do canal através da seção, n_3 é o valor para obstruções, n_4 é o valor para a vegetação e condições de escoamento, e m_5 é um fator de correção das sinuosidades do canal.

Os valores para a obtenção deste coeficiente, fornecidos por Chow (1959), encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores para a computação do coeficiente de Manning (Chow 1959).

Condições do Canal		Valores	
<i>Material Envolvido</i>	Terra	n_0	0.020
	Rocha Cortada		0.025
	Cascalho Fino		0.024
	Cascalho Grosso		0.028
<i>Grau de Irregularidade</i>	Liso	n_1	0.000
	Insignificante		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
<i>Variações na seção transversal</i>	Gradual	n_2	0.000
	Alternado Ocasionalmente		0.005
	Alternado Frequentemente		0.010-0.015
<i>Efeito Relativo das obstruções</i>	Desprezível	n_3	0.000
	Insignificante		0.010-0.015
	Apreciável		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
<i>Vegetação</i>	Baixa	n_4	0.005-0.010
	Média		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muito Alta		0.050-0.100
<i>Grau de Sinuosidade</i>	Insignificante	m_5	1.000
	Apreciável		1.150
	Severa		1.300

O levantamento de dados para a determinação do coeficiente de Manning ao longo do Rio Sapucaí abrangeu o trecho desde a sua cabeceira (Coordenadas UTM 450.000 E; 7.497.230 N; Zona 23), localizada próxima ao município de Campos do Jordão – SP, estendendo-se até o município de Santa

Rita do Sapucaí – MG (Coordenadas UTM 427.333 E; 7.538.684 N; Zona 23). Perfazendo aproximadamente 83 km de trecho estudado, divididos em 36 seções de coletas de dados, esse levantamento consistiu da observação visual dos itens relacionados na tabela 1, onde também foi elaborado um acervo fotográfico que foi analisado posteriormente em laboratório. Os resultado dos sub-valores observados, que compõem o coeficiente de Manning, são apresentados no Anexo 1.

MÉTODO PARA GERAR A CURVA QUE RELACIONA O COEFICIENTE DE MANNING COM A PROFUNDIDADE DO CANAL

A definição da variação transversal do coeficiente de Manning em uma seção é de extrema importância para a calibração e utilização de modelos hidráulicos. Pode-se observar na figura 2 que este parâmetro pode atingir índices de 50% de variação entre os níveis de vazante e o nível de transbordamento do canal.

Com o objetivo de se definir uma correlação entre o coeficiente de Manning e a profundidade utilizaram-se alguns dados apresentados por Chow (1959) e alguns conceitos apresentados por Christofletti (1981).

Neste estudo foram utilizados dados dos rios Mississippi-EUA, Tennessee-EUA e Irrawaddy-Birmanian (Figura 2) descritos por Chow (1959), que relacionam o coeficiente de Manning com o nível d’água.

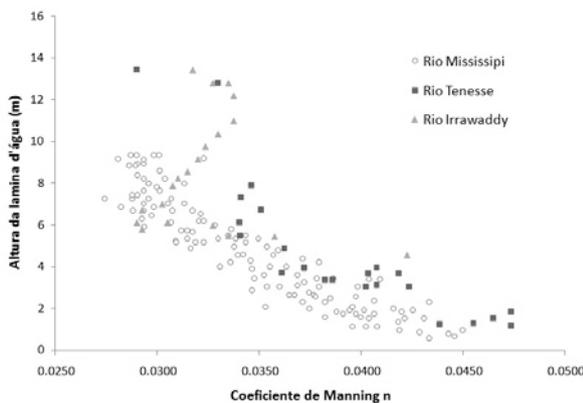


Figura 2 – Variação transversal do coeficiente de Manning nos Rios Mississippi (EUA), Tennessee (EUA) e Irrawaddy (Birmanian).
 Fonte: Adaptado de Chow (1959)

De acordo com Christofletti (1981) o símbolo “%DMP” refere-se a uma relação entre uma altura de lâmina d’água (h) e o valor correspondente ao débito de margens plenas (DMP), ou seja, valor acima do qual haverá transbordamento para a planície de inundação (equação 2). O valor correspondente a “%n” vazante representa a relação entre o valor de n para uma altura de lâmina d’água (n) e o valor de n máximo (n_{máx}), ou seja, n de vazante (equação 3).

$$\% DMP = \frac{h}{DMP} \tag{2}$$

$$\% n = \frac{n}{n_{máx}} \tag{3}$$

Por meio das equações (2 e 3) e juntamente com os dados referentes à variação transversal do coeficiente de Manning (figura 2) pode-se construir uma relação entre o “%DMP” e “%n” vazante e assim obtendo-se também uma relação entre “n” e “h”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curva que relaciona o coeficiente de Manning com a extensão do rio Sapucaí

O levantamento de dados para a determinação do coeficiente de Manning ao longo do Rio Sapucaí realizou-se desde a sua cabeceira, localizada próxima ao município de Campos do Jordão – SP, estendendo-se até o município de Santa Rita do Sapucaí – MG, contabilizando ao todo 36 trechos. Como o objeto de estudo é a influencia do rio na cidade de Itajubá—MG, por causa das enchentes, priorizou-se um maior detalhamento, considerando menores espaçamentos entre os trechos estudados até a jusante do rio no município.

Conhecendo-se as distâncias entre cada seção e os valores de coeficiente de Manning, determinados para as calhas principal e secundária, construíram-se as curvas relacionando a variação do valor de n ao longo da extensão do Rio Sapucaí em estudo (Figura 3). Os dados são mostrados nas tabelas 2 e 3 em anexo.

Verifica-se que o valor de n para a calha secundária é maior que o valor de n para a calha principal devido às diferentes condições da superfície e principalmente das diferenças de densidade e tamanho entre as vegetações encontradas em cada calha.

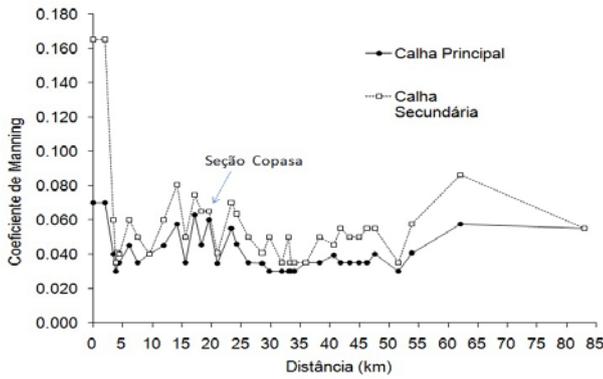


Figura 3 - Curvas relacionando o valor de n com a extensão do Rio Sapucaí.

Curva que relaciona o coeficiente de Manning com a profundidade do Rio Sapucaí

Foram utilizados os dados referentes aos rios Mississippi-EUA, Tennessee-EUA e Irrawaddy-Birmaníia (figura 2) e foi construída uma curva por meio das equações 2 e 3 e, posteriormente, definida uma equação relacionando o “%DMP” e “%n” vazante que é apresentado na Figura 4.

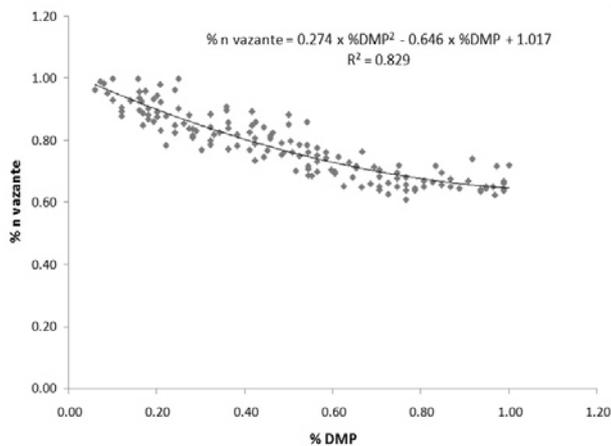


Figura 4 – Adimensionalização dos dados dos Rios Mississippi (EUA), Tennessee (EUA) e Irrawaddy (Birmaníia).

Baseando-se na equação do ajuste da curva da figura 4 podem-se extrapolar estas condições para outros rios. Esta metodologia foi utilizada para o Rio Sapucaí-MG e os valores obtidos para “n” foram comparados com dados medidos em campo.

ESTUDO DE CASO: RIO SAPUCAÍ, SEÇÃO LOCALIZADA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA COPASA – ITAJUBÁ, MG

A seção da captação da Copasa – Itajubá/MG (figura 5) foi escolhida por já haver medições de vazão e ser uma seção de referência nos estudos de monitoramento de cheias para o município. A seção indicada na figura 3, e nas tabelas 2 e 3 a seção copasa encontra-se no trecho nº 14.

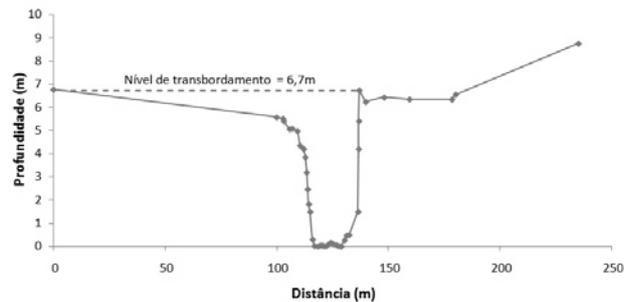


Figura 5 - Topobatimetria – Captação Copasa.

A determinação do coeficiente de Manning para as diversas alturas de lâmina d’água para calha principal foi realizada tendo-se como dados os valores do débito de margem plena (DMP) e do “n” de vazante. O valor do “DMP” não é de difícil obtenção, basta observar o nível de transbordamento do canal. Como podemos observar na figura 5 este valor é de 6,7 metros. Já a obtenção do “n” de vazante não é tão simples, neste caso foi adotado o valor de 0,075. Este valor foi obtido calibrando-se a resultados finais com medições de vazão existentes no canal (figura 6).

Calcula-se primeiro o valor do “%DMP” a partir da equação 2 para os diferentes níveis da lâmina d’água. Em seguida o “%n” vazante, ao longo da seção transversal, é obtido utilizando-se a Equação 4, na qual foi obtida pela regressão apresentada na Figura 4.

$$\% n \text{ vazante} = 0.274 \times \%DMP^2 - 0.646 \times \%DMP + 1.017 \quad (4)$$

Obtêm-se por fim os valores do coeficiente de Manning em relação ao nível de lamina d’água por meio da equação 3, mostrado na Figura 6.

Em resumo utilizando-se as Equações 2, 3 e 4 construiu-se então a curva teórica, baseado no “%DMP” relacionado o coeficiente de Manning com nível d’água. Juntamente com esta curva, plotou-se

valores do coeficiente de Manning calculados por meio de medições de vazão em campo para a estação Captação Copasa (Figura 6). A metodologia não foi aplicada nas outras seções por não haverem medições de vazão.

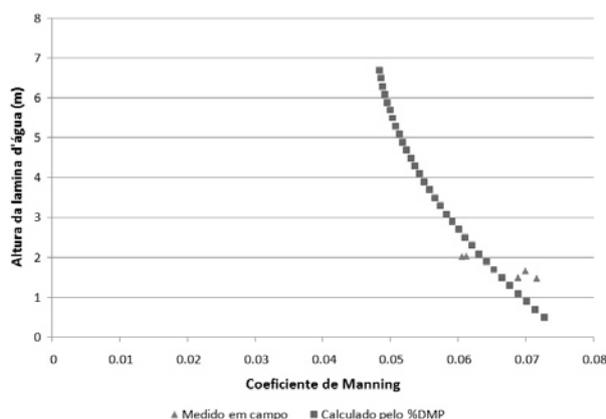


Figura 6 – Comparação da curva de n calculado e medido para a calha principal do Rio Sapucaí-MG na estação Captação Copasa.

CONCLUSÕES

A grande dificuldade encontrada ao estimar as vazões volumétricas de cursos d'água naturais por meio de equações consiste em saber se os valores de coeficientes de resistência ao escoamento são aqueles que realmente retratam o comportamento do escoamento. Em algumas estações fluviométricas utiliza-se a equação de Manning para extrapolar os cálculos de vazão para níveis d'água que não sejam o de escoamento normal. Contudo, a curva-chave obtida pode trazer resultados pouco representativos se considerarmos o coeficiente de Manning como sendo constante tanto na direção longitudinal, quanto na profundidade.

O levantamento de dados em campo possibilitou a determinação do coeficiente de Manning podendo-se conhecer o comportamento deste fator ao longo do rio Sapucaí, como visualizado na Figura 2.

Através da adimensionalização dos dados fornecidos por Chow (1959), foi possível a construção de uma curva relacionando % DMP e % *n* vazante, possibilitando a determinação de valores de coeficiente de Manning para diferentes alturas da

lâmina d'água em diversas seções do rio Sapucaí/MG.

Pode-se observar na figura 6 que o coeficiente de Manning calculado através da metodologia proposta se aproxima dos valores medidos em campo. Propõe-se, então, que outros canais sejam estudados, para que o método proposto seja validado.

As medições de vazão realizadas na estação da Captação Copasa foram de fundamental importância para a calibração do coeficiente de Manning de vazante. Uma boa avaliação desta variável é indispensável para a obtenção da relação (Cota x coeficiente de Manning) proposta nesta metodologia. Caso contrário este coeficiente poderia ter sido sub ou superestimado induzindo a um erro nos resultados finais.

Para a calha secundária e para a calha principal das outras seções não foi aplicada, nem testada, esta metodologia por não haverem medições de vazão.

O trabalho pode ter contribuição relevante, sendo indispensável para a calibração de um modelo hidráulico que se baseie nas equações de Saint-Venant.

REFERÊNCIAS

- COWAN, W. L. (1944) Estimating Hydraulic Roughness Coefficient. Agriculture Engineering, Vol 37, N 7.
- CHOW, V.T. (1959) Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co., New York.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1981) Geomorfologia Fluvial. Volume 1 – O canal fluvial, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.
- POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. (1997) Mechanics of Fluids, Second edition, Prentice Hall, New Jersey.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. (1981) Introdução a Mecânica dos Fluidos, LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro.

Methodology for the Characterization of the Variation of Manning's Coefficient Along and in the Transversal Sections of the Channel – Case Study of Alto Sapucaí Basin, State of Minas Gerais

ABSTRACT

This work aims at providing a greater theoretical and practical foundation on uniform flow in open channels, as well as roughness coefficient for flow, in order to supply the variation of Manning's coefficient for future

studies along and in the transversal sections of Sapucaí River in simulations of gradual varied non-permanent flow using Saint-Venant Equations. Data from some rivers in the United States were used to characterize resistance in the section. Based on these data, curves were built relating depth and Manning's coefficient in Sapucaí River in the state of Minas Gerais. The longitudinal profile was also traced using field observations. These data are essential for the calibration of hydraulic models. As a result we can observe that Manning's coefficient calculated by the proposed method approaches the values measured in the field.

Key-words: *Manning's Coefficient, Uniform Flow, Open channels.*

ANEXO 1

Tabela 2 – Valores de *n* para a calha principal.

Condições do Canal	n0	n1	n2	n3	n4	m5	Valor n (COWAN)	Distância acumulada (m)
Trechos								
Partida	0,025	0	0	0,04	0,005	1	0,070	0,0
1	0,025	0	0	0,04	0,005	1	0,070	2008,5
2	0,02	0,005	0	0,01	0,005	1	0,040	3386,6
3	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	3794,5
4	0,02	0,005	0	0	0,005	1,15	0,035	4068,0
5	0,02	0,005	0,005	0	0,005	1	0,035	4396,7
6	0,02	0,005	0	0,01	0,01	1	0,045	6127,3
7	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	7471,9
8	0,02	0,005	0,005	0	0,01	1	0,040	9505,6
9	0,02	0,005	0,01	0	0,01	1	0,045	11872,7
10	0,02	0,01	0,005	0,01	0,005	1,15	0,058	14122,9
11	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	15573,9
12	0,02	0,005	0,005	0,02	0,005	1,15	0,063	17102,3
13	0,02	0,005	0	0	0,01	1,3	0,046	18294,6
14	0,02	0,005	0,005	0,01	0,02	1	0,060	19536,1
15	0,02	0,005	0	0	0,005	1,15	0,035	20955,4
16	0,02	0,005	0,01	0,01	0,01	1	0,055	23421,6
17	0,02	0,005	0,005	0	0,01	1,15	0,046	24162,1
18	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	26246,4
19	0,02	0,005	0	0	0,005	1,15	0,035	28666,4
20	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	29773,8
21	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	31875,0
22	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	33003,9
23	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	33474,7
24	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	33932,2
25	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	36033,4
26	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	38267,0
27	0,02	0,005	0	0	0,005	1,3	0,039	40647,5
28	0,02	0,005	0,005	0	0,005	1	0,035	41824,2
29	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	43294,1
30	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	44845,2
31	0,02	0,005	0,005	0	0,005	1	0,035	46362,8
32	0,02	0,005	0,005	0	0,01	1	0,040	47606,6
33	0,02	0,005	0	0	0,005	1	0,030	51503,4
34	0,02	0,005	0	0	0,01	1,15	0,040	53828,3
35	0,02	0,005	0	0	0,025	1,15	0,058	62065,3
36	0,02	0,005	0,005	0	0,025	1	0,055	82964,6

Tabela 3 – Valores de n para a calha secundária.

Condições do Canal Trechos	n0	n1	n2	n3	n4	m5	Valor n (COWAN)	Distância acumulada(m)
Partida	0,02	0,005	0	0,04	0,1	1	0,165	0,0
1	0,02	0,005	0	0,04	0,1	1	0,165	2008,5
2	0,02	0,005	0	0,01	0,025	1	0,060	3386,6
3	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	3794,5
4	0,02	0,005	0	0	0,01	1,15	0,040	4068,0
5	0,02	0,005	0,005	0	0,01	1	0,040	4396,7
6	0,02	0,005	0	0,01	0,025	1	0,060	6127,3
7	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	7471,9
8	0,02	0,005	0,005	0	0,01	1	0,040	9505,6
9	0,02	0,005	0,01	0	0,025	1	0,060	11872,7
10	0,02	0,01	0,005	0,01	0,025	1,15	0,081	14122,9
11	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	15573,9
12	0,02	0,005	0,01	0,02	0,01	1,15	0,075	17102,3
13	0,02	0,005	0	0	0,025	1,3	0,065	18294,6
14	0,02	0,005	0,005	0,01	0,025	1	0,065	19536,1
15	0,02	0,005	0	0	0,01	1,15	0,040	20955,4
16	0,02	0,005	0,01	0,01	0,025	1	0,070	23421,6
17	0,02	0,005	0,005	0	0,025	1,15	0,063	24162,1
18	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	26246,4
19	0,02	0,005	0	0	0,01	1,15	0,040	28666,4
20	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	29773,8
21	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	31875,0
22	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	33003,9
23	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	33474,7
24	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	33932,2
25	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	36033,4
26	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	38267,0
27	0,02	0,005	0	0	0,01	1,3	0,046	40647,5
28	0,02	0,005	0,005	0	0,025	1	0,055	41824,2
29	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	43294,1
30	0,02	0,005	0	0	0,025	1	0,050	44845,2
31	0,02	0,005	0,005	0	0,025	1	0,055	46362,8
32	0,02	0,005	0,005	0	0,025	1	0,055	47606,6
33	0,02	0,005	0	0	0,01	1	0,035	51503,4
34	0,02	0,005	0	0	0,025	1,15	0,058	53828,3
35	0,02	0,005	0	0	0,05	1,15	0,086	62065,3
36	0,02	0,005	0,005	0	0,025	1	0,055	82964,6