



## ***ESTUDO TÉCNICO***

Cliente

**PREFEITURA MUNICIPAL DE ALFREDO WAGNER**

Objeto

**DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO**

Local

**Ponte do Passo da Limeira – Alfredo Wagner – SC**

Revisão/data

**R00 – 21/02/19**

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>4</b>
1.1	APRESENTAÇÃO.....	4
1.2	JUSTIFICATIVA.....	4
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>6</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	6
2.2	PONTE DA LOCALIDADE PASSO DA LIMEIRA.....	7
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO</b> .....	<b>10</b>
3.1	DETERMINAÇÃO DE NÍVEIS DE CHEIA.....	10
3.2	ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	11
3.3	PERÍODO DE RETORNO.....	12
3.4	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA.....	12
3.5	DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO.....	14
3.6	REMANSO.....	14
<b>4</b>	<b>LEVANTAMENTO DE DADOS</b> .....	<b>17</b>
4.1	SÉRIE DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	17
4.2	SÉRIE DE VAZÕES MÁXIMAS.....	18
4.3	LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO.....	19
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
5.1	SÉRIE DE VAZÕES.....	21
5.2	DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA.....	22
5.3	VAZÃO DE PROJETO NA SEÇÃO DA PONTE.....	25
5.4	NÍVEL DE CHEIA – TR = 100 ANOS.....	25
5.5	ESTRANGULAMENTO DA SEÇÃO.....	26
5.6	EFEITO DO REMANSO.....	26
5.7	COTA DA PONTE.....	28
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>29</b>

<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE 1.....</b>	<b>32</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 APRESENTAÇÃO**

O objetivo deste Relatório Técnico é verificar as condições de escoamento do rio Itajaí do Sul na localidade de Passo da Limeira, município de Alfredo Wagner, SC, onde iniciou-se a construção de uma nova ponte, após a original ter sido destruída pelo fluxo de água em um evento de cheia recente. Pretende-se determinar, através de dimensionamento hidráulico, o nível de segurança para que os riscos de dano à estrutura da nova ponte em eventos críticos futuros sejam mínimos, considerando-se para isso um período de retorno elevado.

### **1.2 JUSTIFICATIVA**

Inundações têm acontecido com frequência e amplitude cada vez maiores, em parte devido a alterações climáticas responsáveis pelo aumento da intensidade das precipitações, mas também por conta de mudanças no uso do solo. O desmatamento e a impermeabilização de áreas promovem o aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, das vazões máximas. A ocupação de áreas alagáveis e a execução de obras de arte correntes, como bueiros e pontes, pode gerar o estreitamento das seções de fluxo em condições de cheia e conseqüente aumento dos níveis dos rios. A redução de cobertura vegetal pode amplificar os processos erosivos, aumentando a quantidade de sedimentos no fundo dos canais de drenagem e diminuindo a capacidade de escoamento.

Para o controle de cheias, várias medidas podem ser adotadas, que podem ter caráter estrutural ou não estrutural. Dentre as medidas não estruturais, pode-se destacar a educação ambiental, os sistemas de alerta e a legislação que regulamenta o uso e ocupação do solo. As medidas estruturais são aquelas que promovem alterações no sistema hídrico de forma a minimizar os impactos causados por eventos hidrológicos intensos.

Obras hidráulicas podem ser causa de represamento e elevação de níveis, e as correções tendem a ser muito dispendiosas, envolvendo, muitas vezes, a necessidade de reconstrução das estruturas existentes. É fundamental a utilização de critérios técnicos

adequados na elaboração dos projetos, de forma que as geometrias executadas interfiram minimamente sobre o regime natural das águas.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

O município de Alfredo Wagner está localizado no estado de Santa Catarina, a 120 km da capital Florianópolis, na região mais alta da bacia hidrográfica do rio Itajaí, e possui área de 732,77 km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). Sua sede urbana localiza-se nas coordenadas geográficas 27°42'04" S e 49°20'04" W. Confronta com os municípios de Chapadão do Lageado, Ituporanga, Imbuia e Leoberto Leal ao norte, Anitápolis ao sul, Rancho Queimado a leste e Bom Retiro a oeste. A população estimada é de 9.984 habitantes (IBGE, 2019), a maioria ocupando a área rural do município.

O clima que caracteriza a região é mesotérmico úmido, sem estação seca definida e com verões quentes. A temperatura média anual é de 19°C e a precipitação média anual é de 1500 mm, podendo ocorrer excedentes de 750 a 1100 mm/ano (SILVA et. al, 2013).

Os solos encontrados no município são predominantemente os Cambissolos e os Neossolos, formados por rochas de origem sedimentar, argilitos, folhelos (SANTA CATARINA, 1986). O relevo é montanhoso e escarpado, com fundos de vale extensos e estreitos, com altitudes variando entre 400 e 1700 m. Quanto ao uso e ocupação do solo, boa parcela é de florestas em estágio médio ou avançado (Floresta Ombrófila Mista e Floresta Ombrófila Densa), destacando-se ainda a grande ocorrência de pastagens e campos naturais (ROCHA e MARIMON, 2014). A agricultura também tem ocupação relevante, considerando-se que grande parte da população vive na área rural, sendo predominante o cultivo de cebola.

Nos limites do município nascem três rios, Caeté, Águas Frias e Adaga, que se encontram na região central da cidade formando o rio Itajaí do Sul. Esta junção fluvial, associada à sua localização em um fundo de vale, proporciona a ocorrência de cheias na área mais densa do município, o que ainda é potencializado pelas chuvas orográficas que ocorrem nas cabeceiras destes rios (ALVES et. al, 2019).

O rio Itajaí do Sul possui área total de bacia de contribuição de 2.026,9 km<sup>2</sup>, abrangendo a totalidade de Alfredo Wagner e também dos municípios de Imbuia, Ituporanga, Chapadão do Lageado, Atalanta e Aurora, além de partes dos municípios de Bom Retiro, Petrolândia, Agronômica e Rio do Sul, onde no encontro com o rio Itajaí do Oeste é formado o rio Itajaí Açu. A extensão total do rio Itajaí do Sul é de 110,6 km (JICA, 2011a),

com declividade média do canal de 12,6 m/km. Nos domínios da bacia, em Ituporanga, há uma barragem construída para retenção de água em eventos críticos, a fim de abrandar o efeito das cheias nos municípios a jusante.

## 2.2 PONTE DA LOCALIDADE PASSO DA LIMEIRA

A ponte em análise está localizada na área rural de Alfredo Wagner, na localidade de Passo da Limeira, e foi concebida para fazer a ligação entre a SC-350 e diversas comunidades rurais da margem esquerda do rio. Sua construção teve início em 2016, tendo sido concluídas apenas as fundações, pilares e lajes nas duas cabeceiras, para assentamento futuro dos componentes metálicos da estrutura. Tem comprimento previsto de 60 m e largura de 4,60 m (figura 1). Substituirá a antiga estrutura, localizada logo a montante, que foi destruída em um evento extremo ocorrido em 26/09/2015, quando, segundo relato de moradores do local, a mesma obstruiu a passagem de uma grande quantidade de troncos e galhos, o que foi a causa principal do seu colapso.

A área da bacia de contribuição é de 545,57 km<sup>2</sup> (figura 2), sendo que a extensão do talvegue até este ponto é de 43,85 km, com um desnível de 1300 m e declividade média de 29,6 m/km. A partir do encontro dos rios Adaga e Caeté, onde se forma o rio Itajaí do Sul, na região central do município, a extensão do talvegue até a ponte é de 15,65 km. A jusante da ponte, a 23 km, está a Barragem Sul, já no município de Ituporanga,

Figura 1 – Estrutura pronta da ponte de Passo da Limeira e projeto em perspectiva

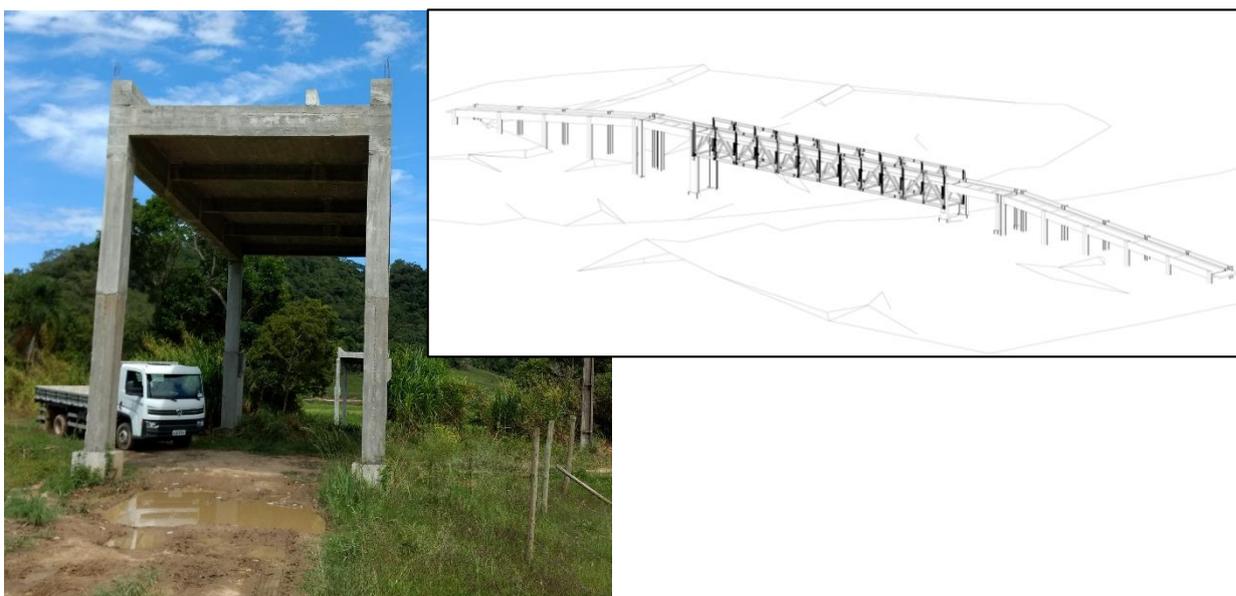


Figura 2 - Localização da área em estudo e delimitação da bacia de contribuição

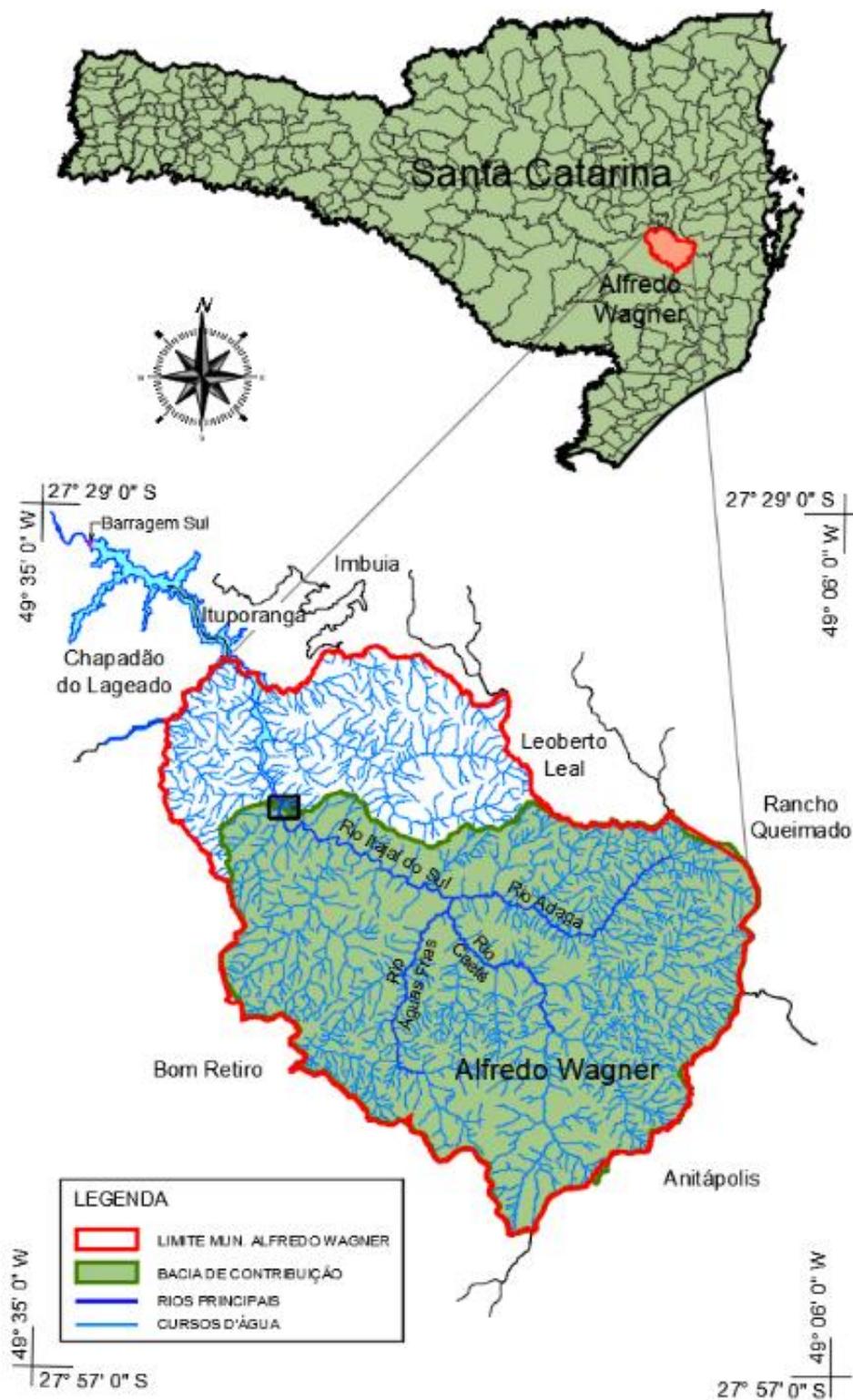


Figura 3 - Localização da ponte



## **3 FUNDAMENTAÇÃO**

### **3.1 DETERMINAÇÃO DE NÍVEIS DE CHEIA**

Para o dimensionamento hidráulico de obras de arte, é fundamental o conhecimento de níveis de cheia associados a um determinado risco de ocorrerem. Em locais próximos a postos fluviométricos com boa quantidade de dados, os níveis máximos podem ser facilmente determinados. Devido à pequena quantidade de estações de monitoramento nas bacias brasileiras, especialmente as menores, esta condição dificilmente é obtida. Os níveis são, então, normalmente associados a vazões ou descargas de projeto, que podem ser estimadas a partir de três metodologias distintas:

- a) Ajuste de uma distribuição estatística;
- b) Regionalização de vazões;
- c) Modelos chuva-vazão.

Quando houver dados históricos de cota e vazão provenientes de estações localizadas na mesma bacia da área estudada e as condições de ocupação da bacia apresentarem pouca alteração ao longo da série, a elaboração de uma distribuição estatística costumeiramente é a forma mais adequada de obtenção de vazões máximas. A regionalização de vazões é uma forma de transferir informações de um ponto a outro da bacia, ou entre bacias com características hidrológicas semelhantes. Já a transformação de precipitação em vazões máximas pode ser um bom recurso quando não houver a disponibilidade de séries de vazões, pois a presença de postos pluviométricos com boas séries é, normalmente, mais comum.

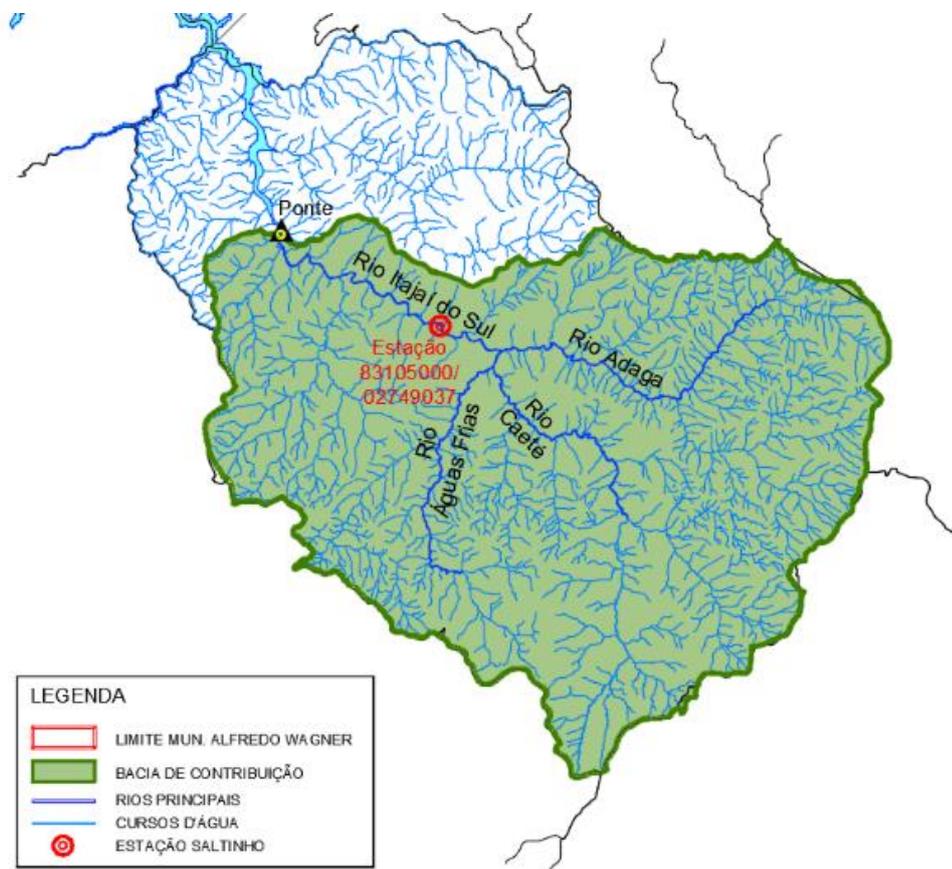
O levantamento em campo de níveis de enchente, a partir de marcas indicadas por moradores da região, é muito útil para o ajuste e verificação da confiabilidade do método adotado. Estas marcas podem ser, inclusive, um melhor indicativo do nível a adotar para a estrutura, dependendo das incertezas levantadas pelos outros métodos. Se disponível uma série de informações de nível em um mesmo local, associada a eventos de cheia diversos, é possível determinar expeditamente o período de retorno de cada cheia.

Neste estudo, será realizada a determinação de vazões máximas e níveis de cheia para períodos de retorno diversos a partir de dados estatísticos da série histórica de uma estação fluviométrica de referência.

### 3.2 ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA

A determinação das vazões máximas para diversos períodos de retorno foi feita a partir dos dados fluviométricos de vazões médias diárias da estação Saltinho (código ANA 83105000), disponíveis do período de 07/1974 a 12/2014 no formato consistido (uma ou duas medições diárias) e como cotas diárias no formato não consistido no período de 01/2015 a 06/2016 (dados telemétricos de 15 em 15 minutos).

Figura 4 - Localização da estação Saltinho



A estação Saltinho foi escolhida pela proximidade com a área de estudo (figura 4) e pela extensão da série de dados (42 anos), que pode ser considerada adequada para a determinação de vazões para períodos de retorno de até 100 anos. Uma outra opção seria a utilização da estação Ituporanga (código ANA 83250000), que possui uma série de dados bem mais extensa (1929 a 2004), porém está localizada a jusante da Barragem Sul, o que predispõe à grandes diferenças no regime hídrico e determinação de vazões máximas em

relação a seções localizadas à montante da barragem, pois em eventos de cheia quando há o fechamento das comportas, as vazões a jusantes se apresentarão amortizadas.

Para verificação da confiabilidade dos resultados, será utilizada a série de dados pluviométricos do mesmo local (estação Saltinho - código ANA 02749037), compreendendo o período de 06/1976 a 12/2000 no formato consistido e até 08/2018 no formato não consistido. Foi realizado o preenchimento dos dados faltantes através da correlação com os dados de vazão e de outra estação pluviométrica próxima, a de Lomba Alta (código ANA 02749007).

### 3.3 PERÍODO DE RETORNO

O período de retorno é definido pelo inverso da probabilidade de um determinado evento hidrológico ser igualado ou excedido em um ano qualquer. Ele é expresso por:

$$T_R = \frac{1}{P(Y \geq y)} \quad (1)$$

onde P é a frequência de ocorrência de determinado evento hidrológico.

No dimensionamento hidráulico de pontes, costuma-se adotar como chuva de projeto aquela com período de retorno de 100 anos. O nível de cheia resultante será a base para a determinação dos níveis da estrutura, que é definido a partir da adoção de um *freeboard*, ou distância entre a linha d'água e a face inferior das longarinas, de no mínimo 0,60 m, sendo comum a utilização de 1,00 m. Este valor pode ser aumentado no caso de haver a possibilidade de transporte de troncos e galhos pelo canal.

### 3.4 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA

Para a análise da frequência de ocorrência de eventos extremos máximos, será empregada a distribuição de probabilidade de tipo I, denominada de distribuição de Gumbel. Esta distribuição de probabilidade é largamente empregada para vazões máximas anuais (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Para series de máximos a função cumulativa de probabilidade do tipo I é dada por (LANNA, 1993):

$$P(Y \leq y) = e^{-e^{-\alpha(y-\mu)}} \quad (2)$$

onde  $\alpha$  e  $\mu$  são os parâmetros da distribuição. O parâmetro  $\alpha$  é de escala e  $\mu$  é de locação. Os dois primeiros momentos da distribuição de Gumbel, que deverão ser usados para estimativa dos parâmetros  $\alpha$  e  $\mu$  são:

$$E(Y) = \mu + \frac{0.577}{\alpha} \quad (3)$$

$$VAR(Y) = \frac{1.645}{\alpha^2} \quad (4)$$

A estimativa dos parâmetros  $\alpha$  e  $\mu$  é feita por suas estimativas amostrais  $\bar{x}$  (média amostral) e  $s$  (desvio padrão amostral), expressos por:

$$\hat{\alpha} = \frac{1.2826}{s} \quad (5)$$

$$\hat{\mu} = \bar{x} - 0.451s \quad (6)$$

onde as estimativas amostrais são obtidas por:

- média

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

- desvio padrão

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (8)$$

### 3.5 DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Conduitos livres ou canais são aqueles que estão sujeitos à pressão atmosférica em pelo menos um ponto de sua secção de escoamento. Normalmente, possuem uma superfície livre de água.

Cursos d'água naturais ou canais artificiais são exemplos de conduitos livres. O dimensionamento de canais artificiais ou o cálculo de vazões em canais naturais com secção regular pode ser feito através do uso de diversas equações, como as de Hazen-Williams, Ganguillet e Kutter e Bazin. Porém, a fórmula mais difundida e utilizada atualmente é a de Chézy com coeficiente de Manning, que é a seguinte:

$$Q = \frac{A \times R_h^{2/3} \times I^{1/2}}{n} \quad (9)$$

onde:

Q = vazão, em m<sup>3</sup>/s;

A = área da secção transversal, em m<sup>2</sup>;

R<sub>h</sub> = raio hidráulico, em m;

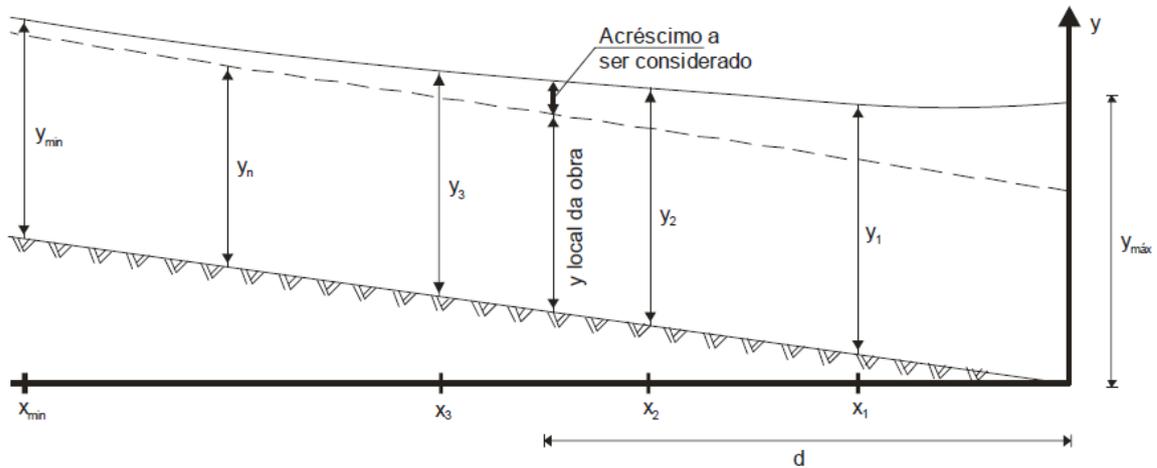
I = declividade, em m/m;

n = coeficiente de rugosidade de Manning.

### 3.6 REMANSO

Segundo a metodologia apresentada no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006), para o regime de escoamento gradualmente variado em canais, o acréscimo de cota em determinada seção causado pelo remanso, que pode ser provocado por barragens, pela maré ou pela confluência de rios, pode ser obtido a partir do desenho do perfil hidráulico teórico, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Perfil hidráulico teórico



O valor de  $y_{m\acute{a}x}$  será dado por:

$$y_{m\acute{a}x} = y_n + [Co - (Ci - I \times d)] \quad (10)$$

onde:

$Co$  = cota do obstáculo (barragens, marés, etc.), em m;

$Ci$  = cota do nível máximo provável da ponte, em m;

$I$  = declividade média do fundo do canal, em m/m;

$d$  = distância da obra ao obstáculo.

Para o traçado da curva, arbitram-se valores de  $y$  entre  $y_{m\acute{a}x}$  e  $y_{m\acute{i}n}$ . Os valores de  $x$  correspondentes ( $x_1$  a  $x_{m\acute{i}n}$ ) são determinados em sequência por um processo iterativo, a partir da seguinte expressão:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{I} \times \frac{1 - (z_c / z)^2}{1 - (k_n / k)^2} \quad (11)$$

onde:

$Z_c$  = fator de seção para o escoamento uniforme;

$Z$  = fator de seção no ponto considerado;

$k_n$  = fator de condução para o escoamento uniforme;

$k$  = fator de condução no ponto considerado.

Os fatores de seção e condução são calculados utilizando-se as equações a seguir:

$$Z_c = \frac{Q}{\sqrt{g/\alpha}} \quad (12)$$

onde:

Q = descarga de projeto, em m<sup>3</sup>/s;

$\alpha$  = coeficiente de Coriolis.

$$Z = \sqrt{\frac{A^3}{T}} \quad (13)$$

onde:

A = área molhada, em m;

T = largura da superfície livre de fluxo, em m.

$$k_n = \frac{Q}{\sqrt{I}} \quad (14)$$

$$k = \frac{AR^{2/3}}{n} \quad (15)$$

onde:

R = raio hidráulico, em m;

n = coeficiente de rugosidade.

Para cada dois valores consecutivos de dx/dy, determina-se a área sob a curva dx/dy = f(y), através da seguinte equação:

$$\Delta A = \frac{(dx/dy)_i \times (dx/dy)_j}{2} \times \Delta y \quad (16)$$

Por fim, cada valor de x é determinado pela somatória das áreas  $\Delta A$  desde  $y_{\text{máx}}$  até o ponto considerado.

## 4 LEVANTAMENTO DE DADOS

### 4.1 SÉRIE DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

A distribuição temporal das precipitações máximas diárias anuais da estação Saltinho é apresentada na Tabela 1. As precipitações máximas diárias foram convertidas em precipitações máximas de 24 horas aplicando-se o fator multiplicativo de 1,14, conforme recomendação da CETESB (1986).

Tabela 1 – Precipitações máximas diárias anuais e de 24h da estação Saltinho (02749037)

Ano	Precipitação (mm)		Ano	Precipitação (mm)		Ano	Precipitação (mm)	
	diária	24h		diária	24h		diária	24h
2018	-	-	2004	49,4	56,3	1990	115,7	131,9
2017	114,5	130,5	2003	53,9	61,4	1989	71,0	80,9
2016	66,9	76,3	2002	50,7	57,8	1988	38,7	44,1
2015	113,7	129,6	2001	135,7	154,7	1987	84,7	96,6
2014	69,5	79,2	2000	88,2	100,5	1986	79,4	90,5
2013*	77,7	88,6	1999	67,3	76,7	1985	47,8	54,5
2012	62,0	70,7	1998	81,6	93,0	1984	83,4	95,1
2011	87,9	100,2	1997	106,3	121,2	1983	73,4	83,7
2010*	51,3	58,5	1996	52,0	59,3	1982	54,3	61,9
2009	104,3	118,9	1995	79,1	90,2	1981	49,7	56,7
2008*	64,1	73,1	1994	55,2	62,9	1980	100,5	114,6
2007*	37,3	42,5	1993	110,3	125,7	1979	87,3	99,5
2006	65,0	74,1	1992	74,2	84,6	1978	87,4	99,6
2005	94,0	107,2	1991*	65,0	74,1	1977	79,8	91,0

Obs.: em vermelho, anos com dados não consistidos; \* preenchimento de falhas.

## 4.2 SÉRIE DE VAZÕES MÁXIMAS

A distribuição temporal das vazões máximas diárias anuais (dados consistidos a partir de uma ou duas leituras diárias – 7/17h) da estação Saltinho é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Cotas e vazões diárias máximas anuais na bacia estação Saltinho (83105000)

Ano	Cota (cm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Ano	Cota (cm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Ano	Cota (cm)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
2015	713	-	2001	324	235	1987	224	87,6
2014	260	176	2000	366	288	1986	303	184
2013	206	118	1999	217	120	1985	198	73,2
2012	286	207	1998	277	181	1984	453	423
2011	411	379	1997	258	161	1983	371	281
2010	269	186	1996	158	68,6	1982	368	276
2009	319	248	1995	187	92,4	1981	168	50,5
2008	274	192	1994	159	74,6	1980	344	240
2007	152	68,8	1993	204	116	1979	237	109
2006	112	37,7	1992	184	101	1978	243	115
2005	296	219	1991	260	124	1977	482	480
2004	166	80,6	1990	290	159	1976	310	193
2003	197	109	1989	205	71	1975	270	144
2002	241	113	1988	184	54,8	1974	-	-

Importante para a análise, a vazão máxima de 2015 ocorreu durante o evento que causou a destruição da ponte antiga de Passo da Limeira, em 26 de setembro. Para este ano, os dados de cota/vazão estão disponíveis no formato não consistido, obtidos a partir de estação telemétrica com leituras a cada 15 minutos. O pico foi alcançado na cota 713 cm e não há dados estimados de vazão, o que se justifica pela dificuldade de se realizar leituras para confecção da curva chave em eventos de grande magnitude. A vazão correspondente deverá ser estimada através da determinação dos parâmetros hidráulicos da seção na estação Saltinho.

Além disso, deve-se ressaltar que os principais eventos de grande elevação de nível na bacia ocorreram de forma brusca, na forma de enxurradas, conforme indicado por CEPED

UFSC (2014). Portanto, as vazões da série obtidas de uma ou duas leituras diárias geralmente não representam as máximas instantâneas. Para estes casos, é comum utilizar-se a expressão de Füller:

$$Q_{\max} = Q_{\text{med}} \times \left( 1 + \frac{2,66}{A^{0,3}} \right) \quad (17)$$

onde:

A = área da bacia hidrográfica, em km<sup>2</sup>.

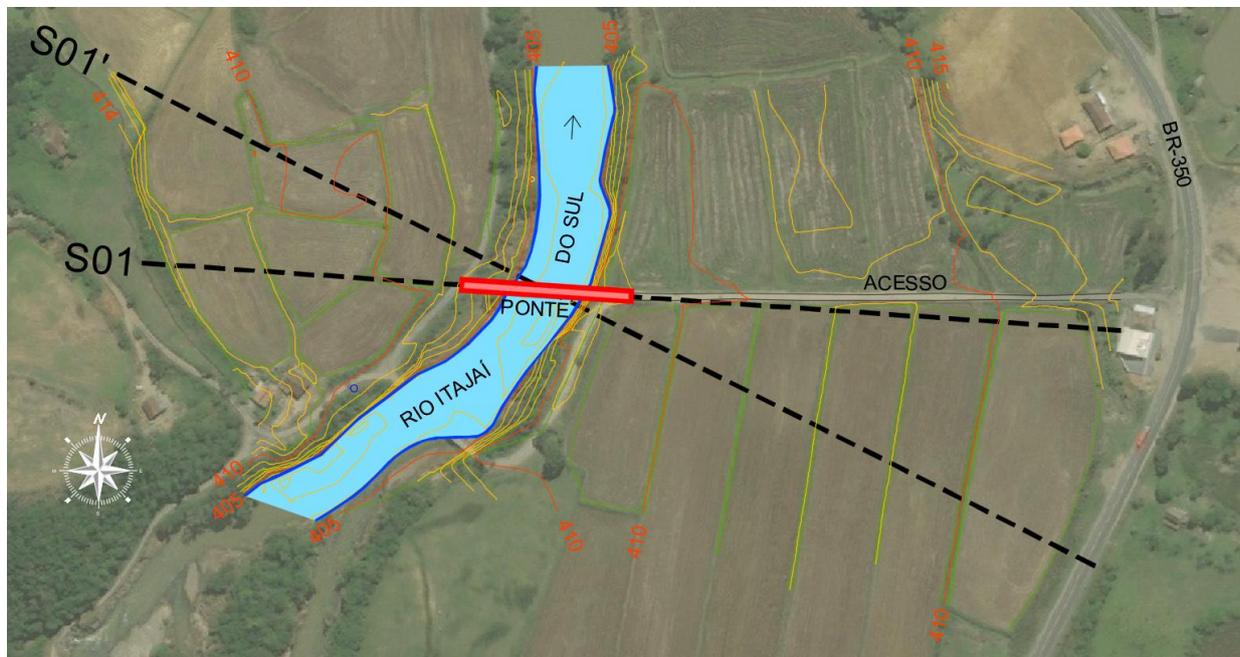
### 4.3 LEVANTAMENTO TOPOBATIMÉTRICO

Um dos requisitos do dimensionamento hidráulico de estruturas é a utilização de dados espaciais com abrangência tal que possibilite a correta caracterização geométrica para a obtenção dos parâmetros necessários. A precisão destes dados também é de fundamental importância para a confiabilidade dos resultados do dimensionamento.

Para o presente estudo, foi realizado um levantamento de campo para obtenção de seções batimétricas em trechos a montante e a jusante da ponte. Também foi levantada uma seção batimétrica no eixo da ponte, onde foram acrescentadas as características geométricas da estrutura projetada, de forma a avaliar um possível estrangulamento da seção que poderia gerar aumento dos níveis a montante. O levantamento foi executado entre os dias 13 e 20 de janeiro de 2019, onde calha e margens do rio foram levantadas por topografia convencional, utilizando-se uma Estação Total.

Foram também levantadas as cotas de inundação máxima provocada pela cheia de 2015. Este levantamento teve por base informações obtidas com moradores atingidos. Este procedimento pode gerar algumas imprecisões pois depende da memória das pessoas. O valor de referência a utilizar será a altitude ortométrica 409,87 m, medido em uma edificação na margem esquerda do rio, poucos metros a montante do eixo da ponte.

Figura 5 – Levantamento topobatimétrico no entorno da ponte de Passo da Limeira



## 5 RESULTADOS

### 5.1 SÉRIE DE VAZÕES

Para complementar a série de vazões com o valor de 2015, correspondente à cota 713 cm, procedeu-se ao seguinte:

a) Ajuste da curva-chave

A partir dos dados de curva-chave disponibilizados pela ANA - Agência Nacional de Águas ([www.snirh.gov.br/hidroweb](http://www.snirh.gov.br/hidroweb)) para a estação Saltinho, verificou-se que o coeficiente de determinação  $R^2$  da amostra completa apresentava um valor insatisfatório, menor que 0,70. Considerando como causas prováveis as alterações do leito produzidas por erosão e assoreamento/dessoreamento, ou mesmo deficiências nos antigos métodos de medição, fez-se a verificação do ajuste utilizando dados mais recentes. Com os valores de cota e vazão de 2003 a 2014 (último ano com medições), obteve-se um coeficiente de determinação de 0,97. A maior cota desta série (106 cm –  $Q = 34,185 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e a última geometria da seção com valores consistidos, também disponibilizada pela ANA (02/07/2012), foram utilizadas para a calibração dos parâmetros hidráulicos da seção;

b) Calibração

A tabela 3 apresenta os valores adotados na calibração e, por fim, a vazão correspondente à cota 713 cm.

Tabela 3 – Calibração e determinação da vazão correspondente à cota 713 cm

<b>Cota (m)</b>	<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>P (m)</b>	<b>Rh (m)</b>	<b><math>\sqrt{l} / n</math></b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>
1,06	34,773	31,648	1,099	0,923	34,185
<b>7,13</b>	362,50	99,02	3,661	0,923	<b>794,77</b>

A série completa de vazões, aplicando-se a expressão de Füller para os anos sem telemetria, é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Vazões diárias máximas anuais (instantâneas) na bacia estação Saltinho (83105000)

Ano	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Ano	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Ano	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
2015	794,77	2001	336,09	1987	125,28
2014	251,71	2000	411,89	1986	263,15
2013	168,76	1999	171,62	1985	104,69
2012	296,04	1998	258,86	1984	604,96
2011	542,03	1997	230,26	1983	401,88
2010	266,01	1996	98,11	1982	394,73
2009	354,68	1995	132,15	1981	72,22
2008	274,59	1994	106,69	1980	343,24
2007	98,40	1993	165,90	1979	155,89
2006	53,92	1992	144,45	1978	164,47
2005	313,21	1991	177,34	1977	686,48
2004	115,27	1990	227,40	1976	276,02
2003	155,89	1989	101,54	1975	205,94
2002	161,61	1988	78,37	1974	-

## 5.2 DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA

Definindo-se como descarga de projeto a ocorrida em setembro de 2015, em um primeiro momento verificou-se, através da distribuição de probabilidade de Gumbel, o período de retorno correspondente a este evento, considerando a série de dados de 1975 a 2014. Na Tabela 5 são apresentados os parâmetros característicos desta série de vazões máximas diárias anuais para a estação fluviométrica Saltinho da bacia do rio Itajaí do Sul, e as vazões estimadas para os períodos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos.

Tabela 5 – Características da série de vazões máximas anuais na bacia do rio Itajaí do Sul, área de contribuição da estação fluviométrica Saltinho (sem o ano de 2015).

<b>Características da série</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Cota (cm)</b>
Média	237,29	
Desvio Padrão	145,82	
Yn	0,5436	
Sn	1,1559	
Período de Retorno TR (anos)		
10	452,62	542
25	572,24	607
50	660,98	669
100	749,06	699

A partir destes parâmetros apresentados, foi possível determinar o período de retorno correspondente à vazão máxima de 2015 (794,77 m<sup>3</sup>/s) na estação Saltinho, que foi de 143 anos.

Este evento, porém, deve ser incorporado à série de forma a simular com maior acerto a probabilidade de ocorrência dos eventos extremos. Desta forma, foi feita uma segunda distribuição estatística com a inclusão do ano de 2015, com os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da série de vazões máximas anuais na bacia do rio Itajaí do Sul, área de contribuição da estação fluviométrica Saltinho (com o ano de 2015).

<b>Características da série</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Cota (cm)</b>
Média	250,89	
Desvio Padrão	168,26	
Yn	0,5442	
Sn	1,1578	
Período de Retorno TR (anos)		
10	498,85	611
25	636,65	661
50	738,88	695
100	840,35	727

Verifica-se, então, que o período de retorno correspondente à vazão máxima de 2015 (794,77 m<sup>3</sup>/s) na estação Saltinho, foi de 73 anos.

De forma a avaliar a consistência destes dados, considerando as simplificações adotadas na calibração e as incertezas geradas no cálculo das vazões instantâneas, fez-se a distribuição estatística dos valores de precipitação máxima anual, adotando-se a duração de 24 horas, o que é compatível com grande parte dos eventos extremos ocorridos na bacia. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Características da série de precipitações máximas anuais de 24h da estação pluviométrica Saltinho.

<b>Características da série</b>	<b>Precip. s/2015 (mm)</b>	<b>Precip. c/2015 (mm)</b>
Média	85,1	87,5
Desvio Padrão	25,61	29,39
Yn	0,5424	0,5430
Sn	1,1518	1,1538
Período de Retorno TR (anos)		
10	123,0	130,9
25	144,1	155,1
50	159,7	173,02
100	175,3	190,8

Sabendo-se que o evento ocorrido em 2015 teve precipitação máxima em 24 horas de 178,8 mm, estima-se que o período de retorno para essa precipitação, antes de sua ocorrência, era de 115 anos. Com a inclusão de 2015 na série histórica, TR passa a ser de 63 anos. Na comparação com os valores de período de retorno obtidos para a série de vazões, verifica-se uma boa correlação entre os dois pares de distribuições. Valores de TR maiores para a vazão de projeto, se comparados com os da precipitação, indicam que esta pode estar um pouco superestimada, mas os valores serão mantidos a favor da segurança.

### 5.3 VAZÃO DE PROJETO NA SEÇÃO DA PONTE

Adotando-se a vazão da estação Saltinho para um período de retorno de 100 anos e, sabendo que a área de contribuição da bacia para a estação é de 434 km<sup>2</sup>, é possível determinar a vazão específica.

$$Q_{esp} = \frac{Q_{max}}{A} = \frac{840,35}{434} = 1,936m^3 / s.km$$

Conhecendo a área da bacia de contribuição na ponte, que é 545,57 km<sup>2</sup>, determina-se a vazão de projeto na seção da ponte.

$$Q_{max} = Q_{esp} \times A = 1,936 \times 545,57 = 1.056,22m^3 / s$$

### 5.4 NÍVEL DE CHEIA – TR = 100 ANOS

A seguir, detalham-se os passos para a calibração dos parâmetros e determinação do nível de cheia para o período de retorno de 100 anos:

a) Vazão da cheia de 2015 (TR = 73 anos – altitude ortométrica 409,87)

$$Q_{esp} = \frac{Q_{max}}{A} = \frac{794,77}{434} = 1,831m^3 / s.km$$

$$Q_{max} = Q_{esp} \times A = 1,831 \times 545,57 = 998,94m^3 / s$$

b) Calibração e nível para TR = 100 anos

A tabela 8 apresenta os valores adotados na calibração e, por fim, a cota correspondente à vazão de projeto. Como a seção apresentou duas áreas distintas de escoamento, a razão entre  $\sqrt{I}$  e  $n$  foi obtida por tentativas.

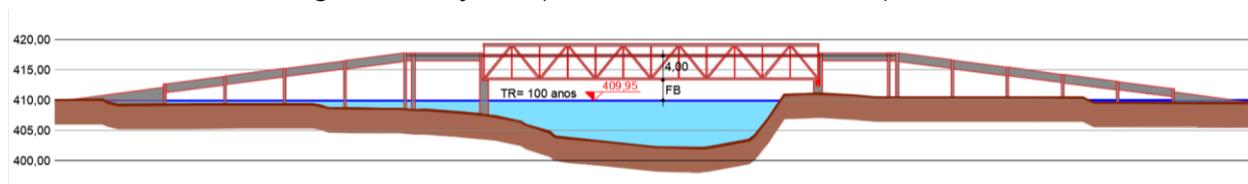
Tabela 8 – Calibração e determinação da cota correspondente à vazão de projeto

Q (m <sup>3</sup> /s)	A <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>1</sub> (m)	Rh <sub>1</sub> (m)	A <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>2</sub> (m)	Rh <sub>2</sub> (m)	$\sqrt{l/n}$	Altitude ortom. (m)
998,94	346,82	115,29	3,008	116,10	162,07	0,716	1,225	409,87
<b>1.056,22</b>	355,71	115,57	3,078	129,04	162,38	0,795	1,225	<b>409,95</b>

## 5.5 ESTRANGULAMENTO DA SEÇÃO

Como é possível observar na Figura 6, a construção da ponte terá pouca influência sobre o escoamento. A ponte será executada em estrutura metálica apoiada sobre pilares de concreto e terá vão livre sobre o canal. A redução de área da seção causada pelos pilares e por duas pequenas contenções nas cabeceiras é de somente 4%. Desta forma, entende-se ser desnecessária uma investigação mais aprofundada através de modelagem hidráulica.

Figura 6 – Seção topobatimétrica no eixo da ponte



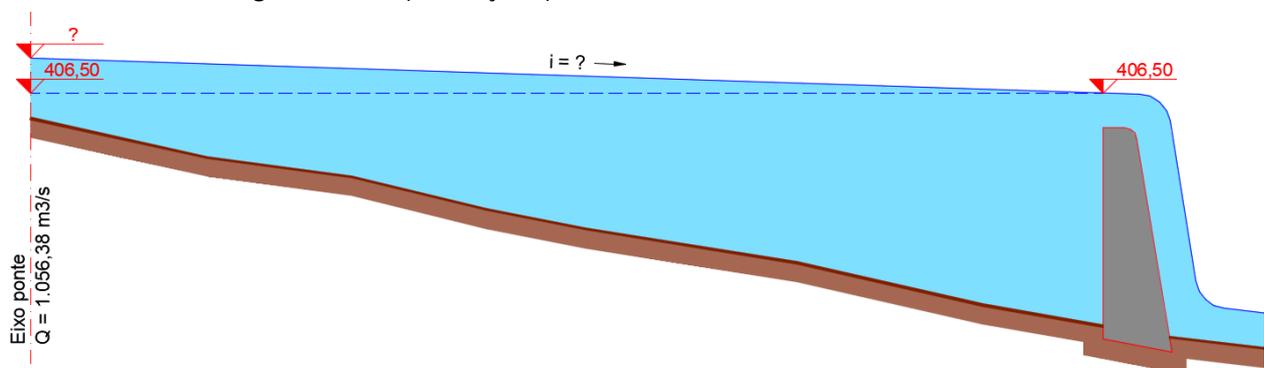
## 5.6 EFEITO DO REMANSO

Segundo o relatório produzido pela Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA, 2011b), a vazão para um período de retorno de 10.000 anos na Barragem Sul é de 2.706 m<sup>3</sup>/s, atingindo a elevação 406 m, isto é, 7 metros acima do vertedor. O relatório ainda demonstra que na cheia ocorrida em setembro de 2011, com período de retorno previsto entre 30 e 40 anos, a lâmina d'água superou o vertedor da barragem em 5,08 m, atingindo então a cota 404,08.

Recentemente, a partir dos estudos e recomendações da Agência Japonesa, a barragem teve a cota do vertedor elevada em 2 metros, passando de 399,00 para 401,00. Considerando estas informações, será adotado o valor de 406,50 para verificação do remanso sobre o escoamento na seção da ponte de Passo da Limeira.

Por conta da falta de dados para uma análise mais aprofundada, será adotado um procedimento simplificado, a favor da segurança, para determinação do nível que permitirá o escoamento da vazão de projeto na seção da ponte, considerando o prolongamento da linha d'água desde a barragem até a seção da ponte, na cota de extravasamento adotada (406,50). Esta simulação considera a possibilidade de ocorrer um evento extremo de curta duração durante um evento de cheia mais prolongado. A Figura 7 ilustra a solução que será apresentada.

Figura 7 – Simplificação para cálculo da influência do remanso



O coeficiente de Manning para a seção da ponte será determinado a partir da razão entre  $\sqrt{I}$  e  $n$  pré-estabelecida, conforme apresentado no item 5.4. A declividade adotada para o cálculo de  $n$  será determinada a partir de medições topográficas da linha d'água na seção da ponte e em um ponto localizado 7.420 m a jusante.

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{404,44 - 391,51}{7.420} = 0,00174 \text{ m/m}$$

$$\frac{\sqrt{I}}{n} = 1,225 \therefore n = \frac{\sqrt{I}}{1,225} = \frac{\sqrt{0,00174}}{1,225} = 0,034$$

Este valor de  $n$  é coerente com os valores apresentados pela bibliografia para canais naturais com características similares ao rio em análise.

A tabela 9 apresenta a determinação, feita por tentativas, do nível e correspondente declividade necessários para que haja capacidade de escoamento da vazão de projeto, de 1.056,22 m³/s.

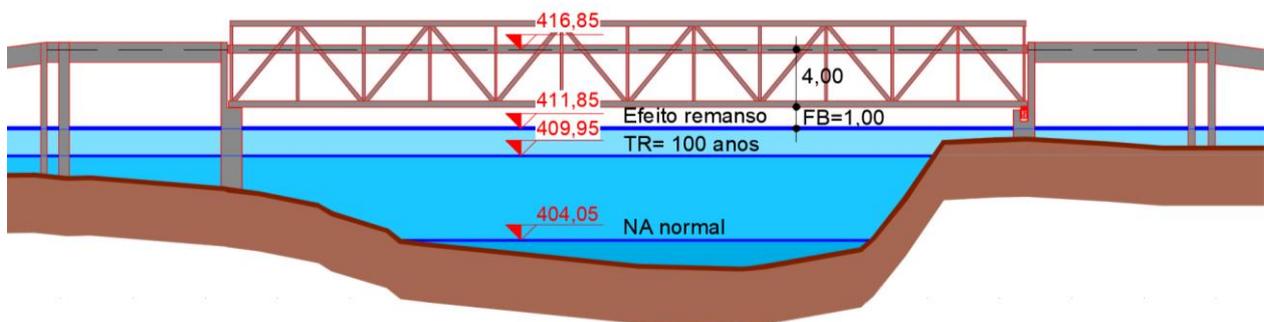
Tabela 9 – Determinação da cota considerando a influência do remanso

Q (m <sup>3</sup> /s)	A <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>1</sub> (m)	Rh <sub>1</sub> (m)	A <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>2</sub> (m)	Rh <sub>2</sub> (m)	I (m/m)	n	Altitude ortom. (m)
1.178,86	1457,71	545,45	2,6725	-	-	-	0,00021	0,034	412
<b>1.058,47</b>	1376,92	544,53	2,5286	-	-	-	0,00020	0,034	<b>411,85</b>
803,29	1188,92	542,38	2,1920	-	-	-	0,00019	0,034	411,5
519,43	579,27	272,81	2,1233	342,63	261,26	1,3115	0,00017	0,034	411
380,84	454,84	195,24	2,3296	218,56	164,53	1,3284	0,00015	0,034	410,5
299,48	361,26	115,74	3,1213	137,14	162,58	0,8435	0,00013	0,034	410

## 5.7 COTA DA PONTE

Caso seja considerado um *freeboard* de 1,00 m, valor geralmente recomendado, a cota (altitude ortométrica) no topo da laje da ponte deverá ser 416,85 m, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Níveis da cheia com TR de 100 anos, influência do remanso e laje da ponte



A estrutura já executada encontra-se na cota 418,10 m, 1,25 m acima do recomendado (*freeboard* total de 2,25 m), o que poderia ser justificado pela possibilidade de transporte no canal de matéria vegetal de grande porte, que foi o que ocasionou a queda da ponte antiga.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A elaboração de dimensionamento hidráulico das obras de arte a partir da utilização de uma metodologia adequada e da determinação ou adoção de parâmetros confiáveis é de fundamental importância para a estabilidade das estruturas e a segurança de seus usuários. Apesar da grande quantidade de incertezas associadas aos diversos métodos disponíveis, é possível, a partir da utilização de critérios bem definidos de observação e verificação, melhorar a precisão na determinação dos níveis de projeto das estruturas.

Neste estudo, os níveis máximos para períodos de retorno diversos foram determinados a partir de dados estatísticos da série histórica de uma estação fluviométrica próxima à área em questão, com o apoio da observação in loco do nível de uma cheia recente. Este método costuma ser preferencialmente utilizado em detrimento de modelos chuva-vazão ou à regionalização hidrológica.

A verificação da influência do remanso sobre os níveis de água na seção da ponte se tornou necessária, pois a área de estudo é diretamente afetada pela elevação de água causada pelo represamento da Barragem Sul, no município de Ituporanga. Foi adotado um procedimento simplificado para verificação do acréscimo de lâmina d'água resultante, que foi de +1,90 m em relação ao nível determinado para a vazão com período de retorno de 100 anos. Já a verificação da influência do estreitamento da seção pelas cabeceiras e pilares se mostrou desnecessária devido às características geométricas destes elementos, que causam uma redução em área de seção de apenas 4%.

A cota de topo de laje sugerida para a ponte é de 416,85 m considerando-se um *freeboard* de 1,00 m, valor comumente adotado. Porém, é admissível a execução em nível mais elevado, por conta da grande possibilidade de transporte de galhos e troncos grandes quando da ocorrência de eventos extremos, fato já verificado no local e decisivo para a destruição da estrutura antiga.



---

H3W ENGENHARIA LTDA  
Emerson Lubitz  
Eng. Civil / M.Sc. Eng. Ambiental  
CREA/SC 44.749-7  
CREA Nacional 250505672-2

## 7 REFERÊNCIAS

ALVES, A. et al. *Análise de dados hidrológicos na região do município de Alfredo Wagner/SC*. In: 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul – I Simpósio de Águas da AUGM. Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005%20Sul%20%28Alexandre%29.pdf>>. Acesso em 25 de janeiro de 2019.

Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres (CEPED). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) - Laboratório de Tecnologias Sociais em Gestão de Riscos e Desastres. *Metodologia de avaliação de vulnerabilidade para mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos e inundações: proposta piloto em Santa Catarina*. [Coordenação Janaína Rocha Furtado]. Florianópolis: CEPED UFSC, 2014. 57 p.

CETESB. *Drenagem urbana – manual de projeto*. 3. ed. São Paulo: Cetesb, 1986.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). *Manual de drenagem de rodovias*. 2ª ed., Rio de Janeiro, 2006. 333 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/alfredo-wagner/panorama>>. Acesso em 25 de janeiro de 2019.

JICA (Agência de Cooperação Internacional do Japão). Estudo preparatório para o projeto de prevenção e mitigação de desastres na bacia do rio Itajaí (preliminar) – Relatório Final. Vol I. Set. 2011. Disponível em: <[http://www.aguas.sc.gov.br/base-documental-rio-itajai/noticias-rio-itajai/item/download/174\\_8d461ef185bbe1dfe99c70e1507bf082](http://www.aguas.sc.gov.br/base-documental-rio-itajai/noticias-rio-itajai/item/download/174_8d461ef185bbe1dfe99c70e1507bf082)>. Acesso em 25 de janeiro de 2019.

JICA (Agência de Cooperação Internacional do Japão). Estudo preparatório para o projeto de prevenção e mitigação de desastres na bacia do rio Itajaí (preliminar) – Relatório Final. Vol III. Nov. 2011.

LANNA, A.E. Elementos de Estatística e Probabilidade, in TUCCI, C.E.M. *Hidrologia Ciência e Aplicações*, Porto Alegre, EDUSP-ABRH, p. 79-176, 1993.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte, CPRM, 2007, 561 p.

PINHEIRO, A. Enchentes e inundações. In: Santos, R. F. dos (Org.). *Vulnerabilidade Ambiental*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007, p. 97-108.

PORTO, R.L., Escoamento superficial direto, in Tucci C.E.M., Porto R.L.L. e Barros M.T. de, (org), 1995, *Drenagem Urbana*, ABRH-UFRGS, Porto Alegre, 107-166, 1995.

RIGHETTO, A. M., *Hidrologia e Recursos Hídricos*, São Carlos, EESC USP, 819 p, 1998.

ROCHA, I. O.; MARIMON, M. P. C. (org). *Diagnóstico socioambiental e proposições de planejamento territorial: Alfredo Wagner e Bom Retiro (Santa Catarina)*. Florianópolis: Editora UDESC, 2014. 182 p.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Atlas do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro. 1986.

SILVA, A. C. et al. Caracterização fitossociológica e fitogeográfica de um trecho de floresta ciliar em Alfredo Wagner, SC, como subsídio para restauração ecológica. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 579-593, out-dez 2013.

SILVA, R. C. V.; MASCARENHAS, F.; MIGUEZ, M. G. *Hidráulica Fluvial I*. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2003. 305 p.

TOMAZ, P. *Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais*. São Paulo, Navegar Editora, 2002, 475 p.

TUCCI, C. E. M; PORTO, R.L., Barros, M. T. (org). *Drenagem urbana*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1995. 428p.

TUCCI C.E.M., *Hidrologia ciência e aplicação*, 3º. ed. Revisada, ABRH-Edusp, Porto Alegre, 2004, 943 p.

## 8 APÊNDICE 1

