

**CONTROLE DE REVISÕES:**

Rev.	Data	Natureza da Revisão	Elab.	Verif.	Aprov.
0A	30/04/24	Emissão Inicial	JMC	JDSi	JDSi
0	22/08/24	Emissão Final	LVDN	JDSi	JDSi

CLIENTE:					
 ENERGIA PARA UM MUNDO SUSTENTÁVEL			IFXP00050/00-3H-RL-0201-0		
EMPREENHIMENTO:					
<b>UHE SANTA CLARA E FUNDÃO</b>					
ÁREA:					
<b>CIVIL</b>					
Data	Elaborador	Verificador	Aprovador	R. Tec.:	CREA Nº
30/04/2024	JMC	JDSi	JDSi	DDBS	PR-70939/D

<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁG.</b>
<b>1 - APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 - DESCRIÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 - UHE SANTA CLARA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 - UHE FUNDÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>3 - DADOS DE ENTRADA.....</b>	<b>8</b>
<b>4 - MODELAGEM HIDRODINÂMICA .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 - EQUACIONAMENTO.....</b>	<b>14</b>
<b>4.2 - MECANISMOS DE RUPTURA E CENÁRIOS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3 - CARACTERÍSTICAS DA BRECHA DE RUPTURA .....</b>	<b>17</b>
<b>4.4 - RESULTADOS.....</b>	<b>23</b>
<b>5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>23</b>
<b>6 - REFERÊNCIAS.....</b>	<b>24</b>

## 1 - APRESENTAÇÃO

O marco legal na segurança de barragens no Brasil é a Lei 12.334/2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), destinada a acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e a acumulação de resíduos industriais. A Lei 12.334/2010 criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Atualmente, esta legislação sofreu algumas modificações e passou a vigorar com as alterações de alguns de seus dispositivos, estabelecidos pela Lei 14.066/2020.

A entidade outorgante das barragens fica responsável por fiscalizar a segurança das barragens, bem como por manter o cadastro atualizado dessas barragens com identificação dos empreendedores, para fins de incorporação ao SNISB. No caso dos empreendimentos das Centrais Elétricas do Rio Jordão (ELEJOR), UHE Santa Clara (SCL) e UHE Fundão (FND), a entidade fiscalizadora é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual através da Resolução Normativa nº 1.064 de 02 de maio de 2023 apresenta os critérios e ações de segurança de barragens associadas a usinas hidrelétricas fiscalizadas pela ANEEL, de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

O presente documento é uma revisão de ruptura hipotética de barragens em cascata, com o objetivo de avaliar os potenciais impactos e medidas de mitigação associadas a esse cenário específico. Esta revisão visa contribuir para o aprimoramento contínuo das práticas de segurança e gestão de barragens, visando à prevenção de acidentes e à proteção das vidas e do meio ambiente.

## 2 - DESCRIÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS

### 2.1 - UHE SANTA CLARA

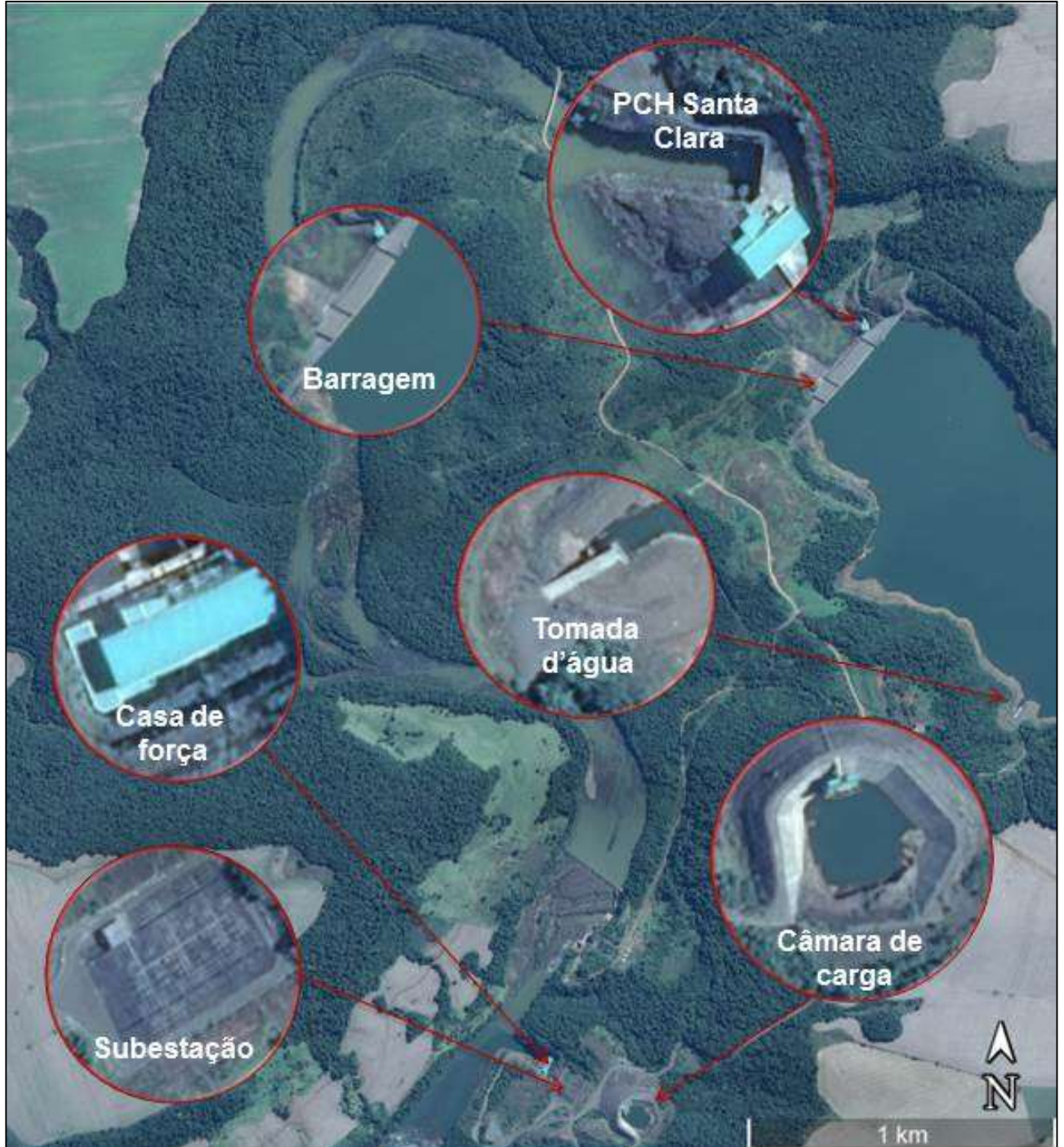
A UHE Santa Clara, em operação desde 2005, está localizada na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, sub-bacia do rio Paraná, a 38 km de distância da foz do rio Jordão. Na margem direita do empreendimento está o município de Candói, ao passo que na margem esquerda localiza-se o município de Pinhão, ambos pertencentes ao estado do Paraná. O acesso principal à barragem é feito por meio da rodovia estadual PR - 560, no sentido norte - sul, a aproximadamente 20 km da cidade de Candói.

O empreendimento foi concebido de modo a aproveitar a queda natural existente ao longo da curva em forma de “U” que o rio Jordão faz para a esquerda, com concavidade voltada para sudeste (SE), a jusante do local da barragem. O arranjo geral é dividido em dois grupos de estruturas: no primeiro está o barramento, o vertedouro em soleira livre, a tomada d’água e uma PCH instalada no pé da barragem, com potência de 3,6 MW; já o segundo grupo conta com o túnel de baixa pressão, a câmara de carga, os dois túneis de alta pressão e casa de força abrigada com duas unidades do tipo Francis de eixo vertical, com potência total de 120 MW.

A estrutura do barramento está dividida em três trechos: barragem da margem direita, vertedouro de soleira livre em degraus e barragem da margem esquerda, sendo toda a estrutura concebida em concreto compactado a rolo (CCR).

Na Figura 2.1 é apresentada a localização das estruturas da UHE Santa Clara.

**FIGURA 2.1**  
**LOCALIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DA UHE SANTA CLARA**



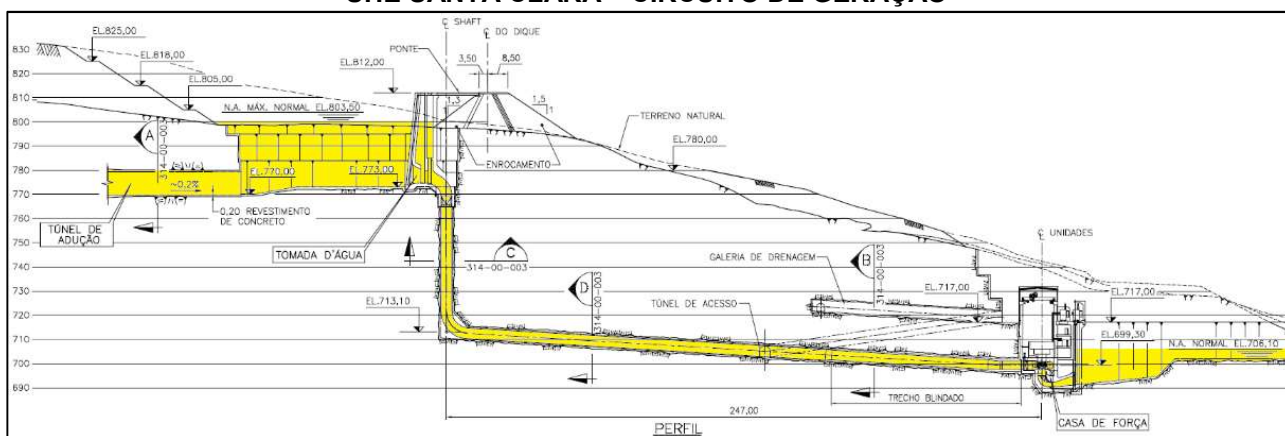
Na Figura 2.2 é apresentada à vista de jusante da barragem da UHE Santa Clara e na Figura 2.3 o circuito de geração.

**FIGURA 2.2**  
**UHE SANTA CLARA – VISTA DE JUSANTE**



Fonte: ELEJOR (2022)

**FIGURA 2.3**  
**UHE SANTA CLARA – CIRCUITO DE GERAÇÃO**



Fonte: Desenho 0123-SC-DE-314-00-002

## 2.2 - UHE FUNDÃO

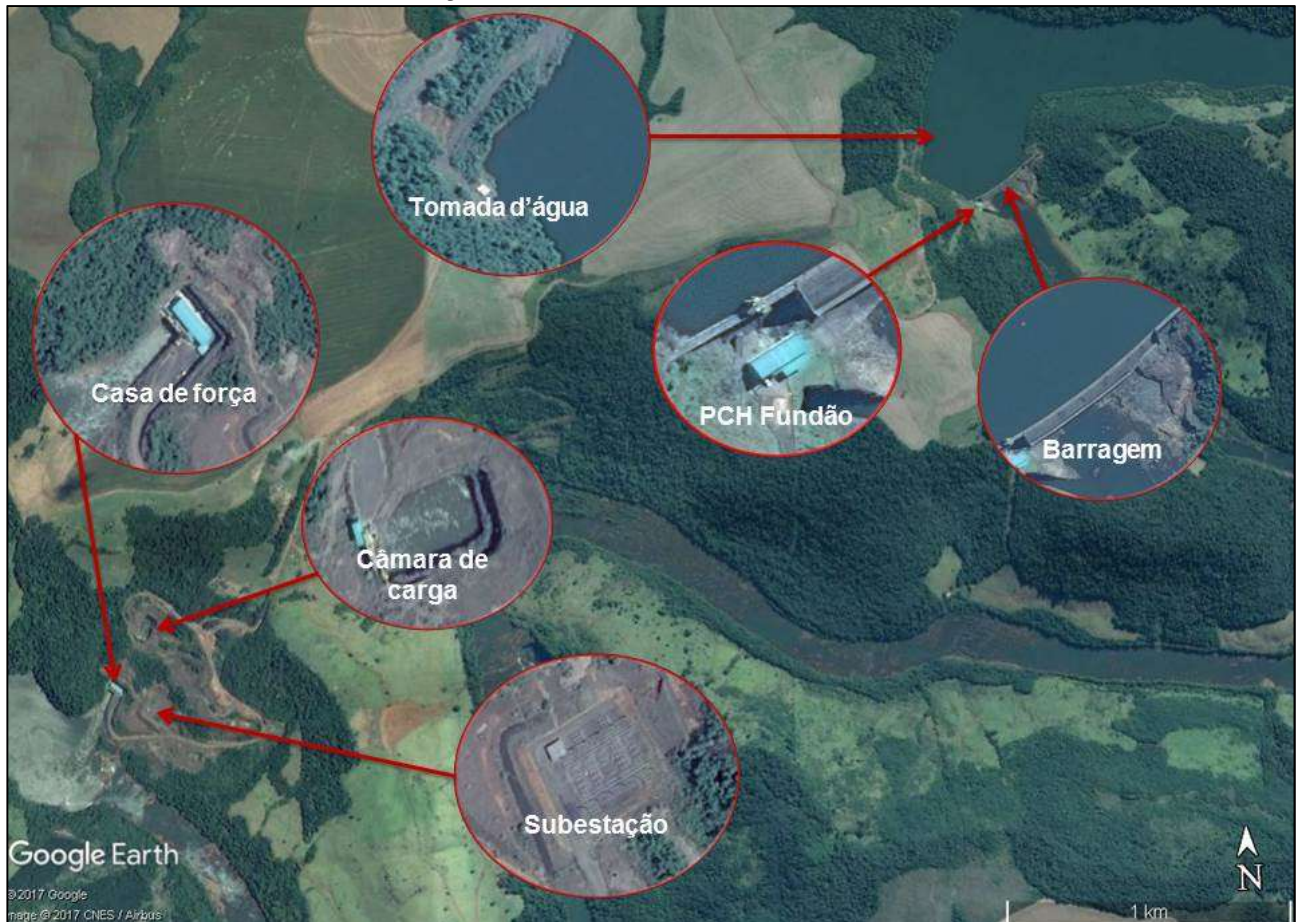
A UHE Fundão, em operação desde 2005, está localizada na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, sub-bacia do rio Paraná, a 22,7 km de distância da foz do rio Jordão. Na margem direita do empreendimento está o município de Foz do Jordão, ao passo que na margem esquerda localiza-se o município de Pinhão, ambos pertencentes ao estado do Paraná. O acesso à barragem é realizado por aproximadamente 14 km de estrada rural a partir da BR 373.

O empreendimento foi concebido de modo a aproveitar a queda natural existente ao longo da curva em forma de “U” que o rio Jordão faz para a esquerda, a jusante do local da barragem. O arranjo geral é dividido em dois grupos de estruturas: no primeiro está o barramento, o vertedouro em soleira livre, a tomada d’água e uma PCH instalada no pé da barragem, com potência de 2,5 MW; já o segundo grupo conta com o túnel de baixa pressão, a câmara de carga, os dois túneis de alta pressão e casa de força abrigada com duas unidades do tipo Francis de eixo vertical, com potência total de 120 MW.

A estrutura do barramento está dividida em três trechos: a barragem da margem direita, o vertedouro de soleira livre em degraus e a barragem da margem esquerda, sendo a estrutura toda em concreto compactado com rolo (CCR).

Na Figura 2.4 é apresentada a localização das estruturas da UHE Fundão.

**FIGURA 2.4**  
**LOCALIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DA UHE FUNDÃO**



Na Figura 2.5 é apresentada à vista de jusante da barragem da UHE Fundão.

**FIGURA 2.5**  
**UHE FUNDÃO – VISTA DE JUSANTE**



Fonte: ELEJOR (2022)

### **3 - DADOS DE ENTRADA**

As informações para as simulações dos cenários de ruptura hipotética das usinas foram obtidas em sua maioria das informações presentes Revisão Periódica de Segurança da Barragem (RPSB) da UHE Santa Clara (n° EGVP00511/00-10-RL-1002), elaborada pela Nova Engevix em 14/12/2022, com inspeção in loco realizada em 09 e 11 de agosto de 2022, na Revisão Periódica de Segurança da Barragem (RPSB) da UHE Fundão (n° EGVP00511/00-10-RL-2002), elaborada pela Nova Engevix em 23/12/2022, com inspeção detalhada realizada em 10 e 11 de agosto de 2022 e na Revisão Periódica de Segurança da Barragem (RPSB) da UHE Derivação do Rio Jordão (n° 2230-DJ-0-GE-G00-00-G-00-RT-0003), elaborada pelo consórcio entre a Nova Engevix e Intertechne. Informações complementares também foram verificadas no Manual de Informações Hidráulico-Operativas de 2017.

Todos os dados e informações sobre as barragens aqui utilizados foram disponibilizados pela contratada. A fim de refinar as condições de montante do estudo, tentou-se obter dados da UHE Salto Curucaca, que se encontra aproximadamente 15 km a montante do início do reservatório da UHE Santa Clara. Entretanto, nenhuma informação relevante foi obtida sobre este empreendimento.



O Quadro 3.1, Quadro 3.2 e Figura 3.1 apresentam as vazões de projeto, níveis de referência e as curvas de descarga e Cota-Volume dos reservatórios, respectivamente.

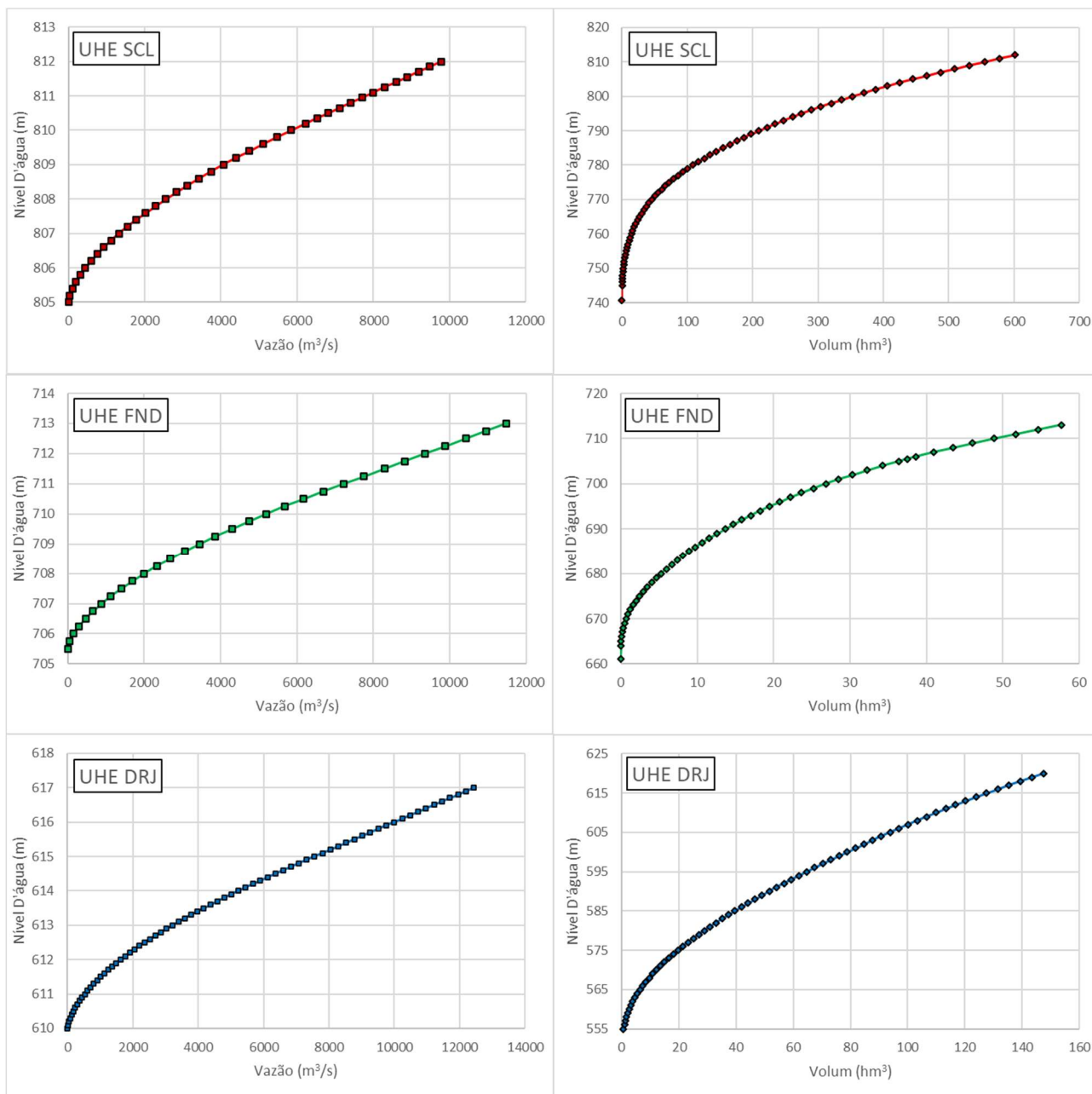
**QUADRO 3.1**  
**VAZÕES DE PROJETO**

<b>VAZÃO DE PROJETO</b>	<b>UHE SCL</b>	<b>UHE FND</b>	<b>UHE DRJ</b>
QMLT	104	109	130
TR 500 ANOS	3255	3488	5456
TR 1,000 ANOS	3581	3842	6034
TR 10,000 ANOS	4665	5017	7952

**QUADRO 3.2**  
**NÍVEIS DE REFERÊNCIA**

<b>VARIÁVEL</b>	<b>UHE SCL</b>	<b>UHE FND</b>	<b>UHE DRJ</b>
Cota de Coroamento	811,00	712,50	616,00
Nível Máximo <i>Maximorum</i>	810,15	711,00	614,80
Nível Máximo Normal	805,00	705,50	610,00
Nível Mínimo Normal	787,50	705,00	602,00
Cota da Crista do vertedor	805,00	0,00	610,00
Largura do Vertedor	251,00	705,50	300,00
Largura da Barragem	618,00	0,00	560,00
Altura da Barragem	67,00	42,50	73,00

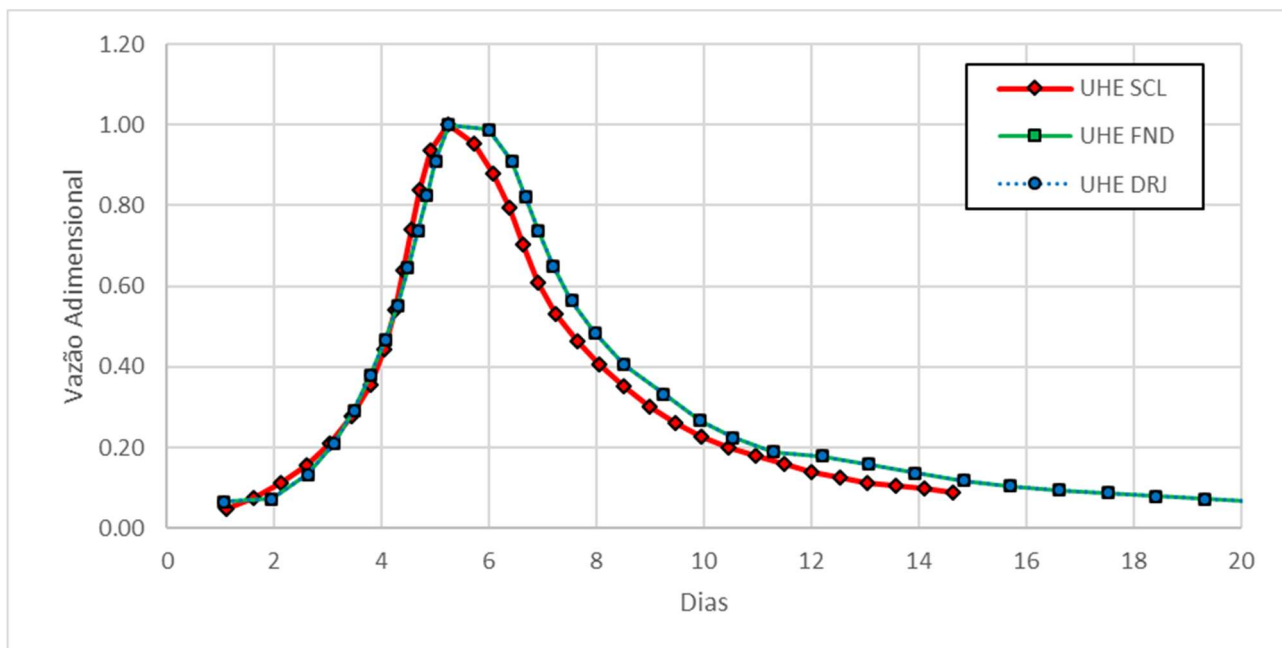
**FIGURA 3.1**  
**CURVAS DE DESCARGA E COTA-VOLUME**



Para a geração dos hidrogramas de cheia, foi utilizado o hidrograma adimensional presente nos respectivos RPSB's de cada usina. Os hidrogramas foram devidamente alinhados, a fim de ser possível estimar a vazão incremental para cada uma das usinas (Figura 3.2). Nota-se que a vazão adimensional da UHE FND é o mesmo da UHE DRJ, isso ocorre, pois as duas usinas estão muito próximas e apresentam os mesmos hidrogramas críticos para a geração do hidrograma adimensional.

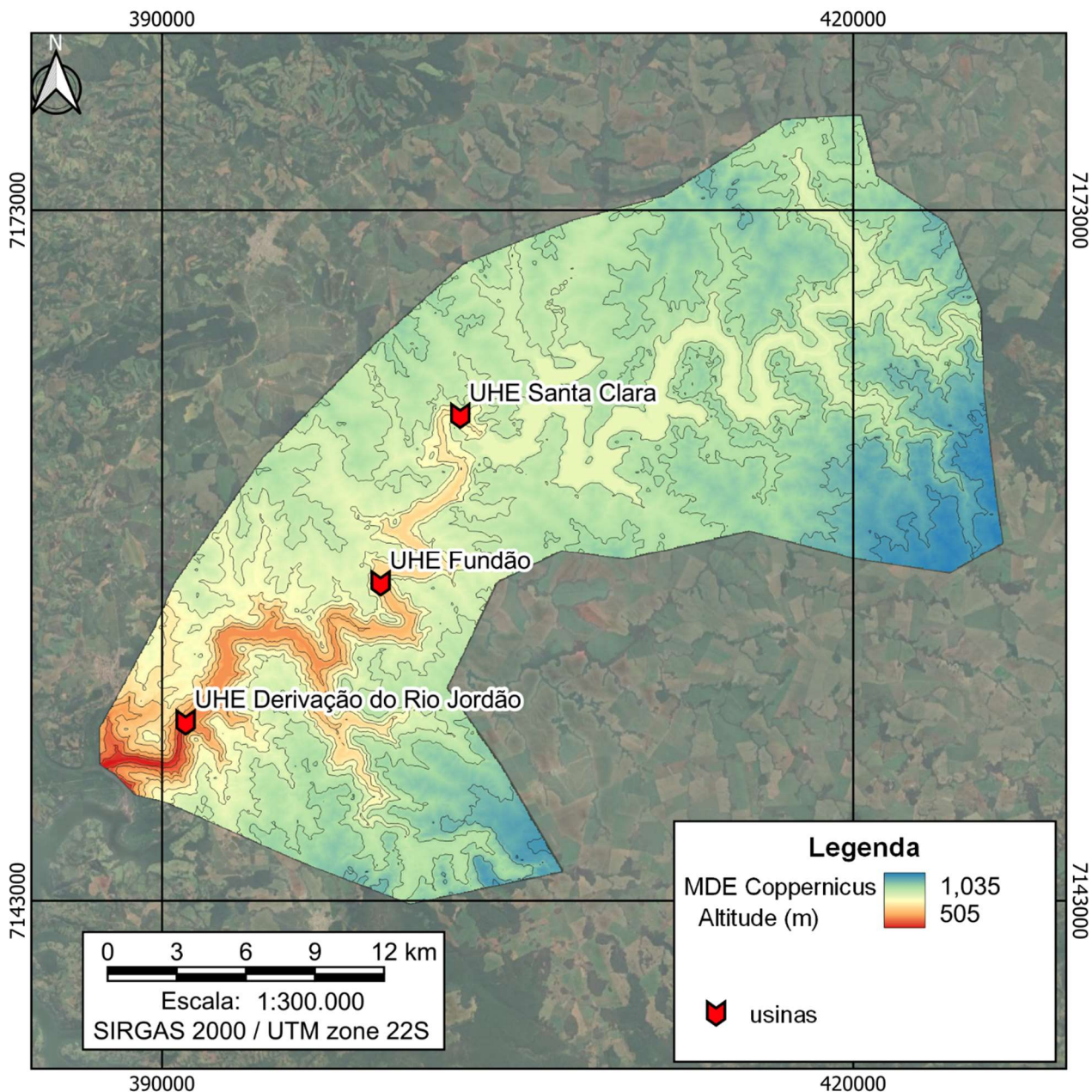
A vazão incremental foi calculada como sendo igual a diferença entre as vazões afluentes de cada usina.

**FIGURA 3.2**  
**HIDROGRAMAS ADIMENSIONAIS DAS USINAS**



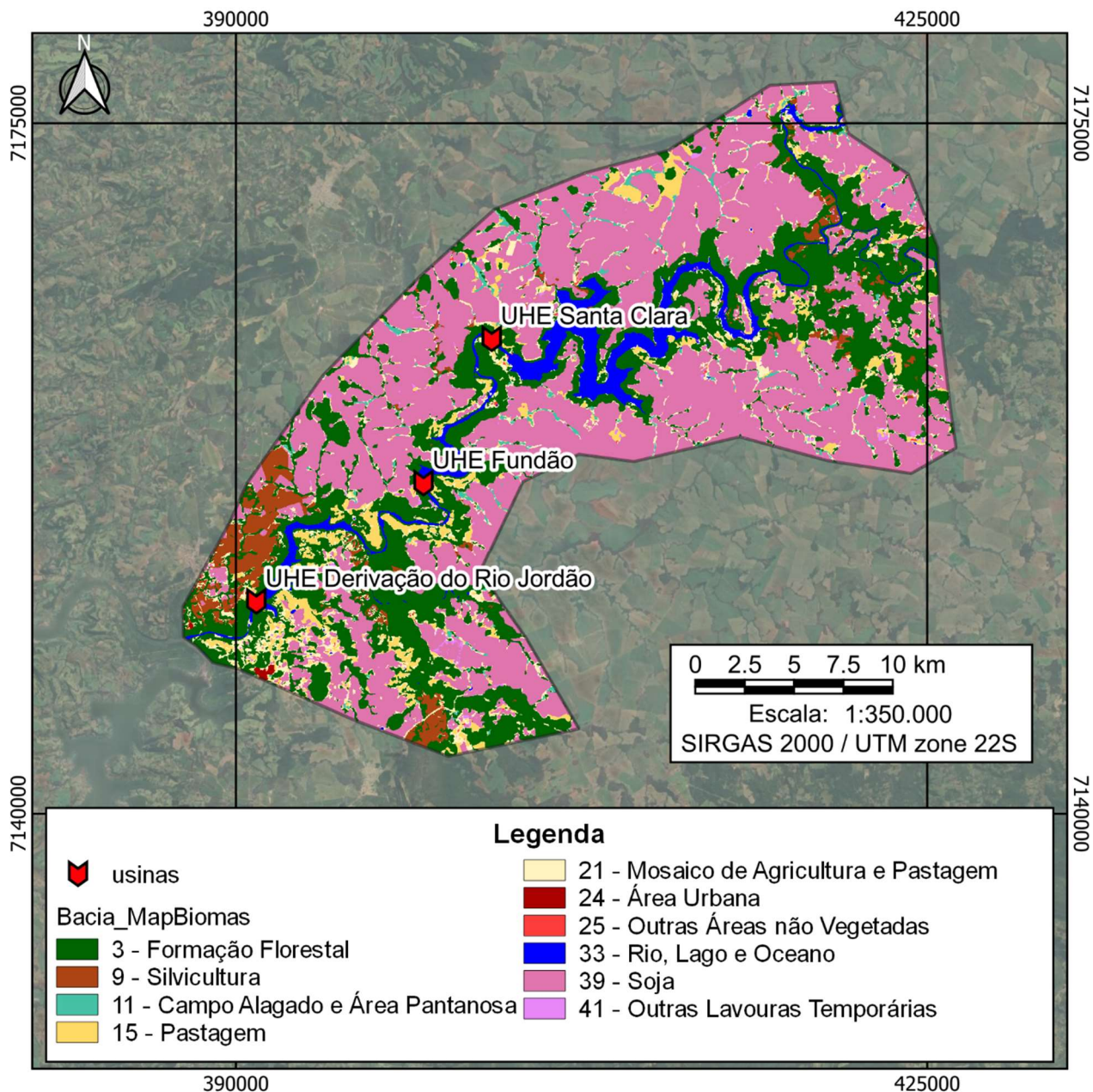
O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado como base cartográfica para a modelagem, foi o Copernicus GLO-30, com malha de resolução de 30 x 30 m, disponibilizado, tratado e consistido pela agência espacial europeia (Figura 3.3).

**FIGURA 3.3**  
**MDE DA REGIÃO DE ANÁLISE**



Além disso, para caracterizar a rugosidade do escoamento, foram utilizados os dados mais recentes de uso e ocupação do solo disponibilizados pelo MapBiomass, digitalizados a partir de imagens LANDSAT de 2022 com resolução de 30 m (Figura 3.4).

**FIGURA 3.4**  
**CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO DA REGIÃO DE ANÁLISE**



A partir dos dados de uso do solo, foram definidos os valores do coeficiente de manning para a modelagem hidráulica (Quadro 3.3), como referência foram utilizadas as tabelas apresentadas por Brunner (2016) e Porto (2001).

**QUADRO 3.3**  
**USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E RUGOSIDADE DE MANNING ADOTADA**

DESCRIÇÃO DO USO	RUGOSIDADE DE MANNING (S.M <sup>-1/3</sup> )
Área Urbana	0,025
Campo Alagado, e Área Pantanosa	0,035

DESCRIÇÃO DO USO	RUGOSIDADE DE MANNING (S.M <sup>-1/3</sup> )
Formação Florestal	0,150
Mosaico de Agricultura e Pastagem	0,035
Outras Áreas não Vegetadas	0,033
Outras Lavouras Temporárias	0,035
Pastagem	0,040
Rio, Lago e Oceano	0,030
Silvicultura	0,100
Soja	0,035

## 4 - MODELAGEM HIDRODINÂMICA

### 4.1 - Equacionamento

Para a elaboração do modelo hidráulico foi utilizado o *software* HEC-RAS 6.3.1 do corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos da América. Para o cálculo do escoamento em regime não permanente são utilizados os princípios de conservação de massa e momento, em um volume de controle, as quais são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial At}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Onde:

$A$  = Área do volume de controle (m<sup>2</sup>);

$Q$  = Vazão volume de controle (m<sup>3</sup>/s);

$q_1$  = Vazão lateral ao volume de controle (m<sup>3</sup>/s/m);

$V$  = Velocidade (m/s);

$S_f$  = perda de carga (m)

As equações são resolvidas por um procedimento de diferenças finitas, onde para todas as seções as equações são resolvidas simultaneamente, o que permite a utilização de intervalos de cálculo inferiores ao necessário para a solução explícita. As perdas de energia decorrentes do atrito do escoamento são calculadas utilizando a equação de Manning:

$$S_f = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

$R_h$  = raio hidráulico (m);

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning ( $\text{sm}^{-1/3}$ );

$V$  = velocidade média (m/s);

$i$  = declividade do trecho (m/m);

Para calcular a perda de energia em canais abertos, decorrentes da variação da velocidade de escoamento entre duas seções, é considerado que esta perda é proporcional à variação da energia cinética:

$$h = C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$$

$h$  = perda de carga localizada (m);

$C$  = Coeficiente de perda por contração ou expansão;

$V$  = velocidade média na seção de cálculo (m/s);

$a$  = coeficiente de energia cinética;

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}^2/\text{s}$ );

São utilizados os seguintes coeficientes:

- Coeficiente de perdas por contração do escoamento - 0,10
- Coeficiente de perdas por expansão do escoamento - 0,30

## 4.2 - Mecanismos de ruptura e Cenários

Existem muitos mecanismos que podem levar à falha de uma barragem. Estes mecanismos variam com o tipo da barragem e os materiais que foram utilizados em sua construção. A ASDSO (*Association of Dam Safety Officials*) levantou as principais causas de falhas de barragens de 1975 a 2011 (Quadro 4.1).

**QUADRO 4.1**  
**PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS EM BARRAGENS (1975-2011)**

CAUSA DA FALHA	NÚMERO DE FALHAS	PERCENTUAL
Inundação ou Galgamento	465	70,9%
Pipping ou infiltração	94	14,3%
Estrutural	12	1,8%
Humana	4	0,6%
Animal	7	1,1%
Vertedor	11	1,7%
Erosão/escorregamento/instabilidade	13	2,0%
Desconhecido	32	4,9%

CAUSA DA FALHA	NÚMERO DE FALHAS	PERCENTUAL
Outro	18	2,7%
Total	656	100,0%

Como o trecho da cascata aqui avaliado possui 3 usinas, a condição de ruptura da usina mais a montante sempre afeta a condição da usina que se encontra à jusante. Por essa razão, os cenários foram montados de modo a existir uma condição de controle sem nenhuma ruptura e 3 condições com ruptura individual das barragens, porém estas 3 últimas condições podem levar à ruptura das demais usinas, caso o nível do coroamento da usina seja superado.

Por exemplo, dado um cenário de vazão milenar (TR 1.000 anos) e a UHE Santa Clara (UHE SCL) está programada para romper durante o pico da vazão, como as UHE Fundação (UHE FND) e a UHE Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ) se encontram depois da UHE Santa Clara, caso a ruptura da UHE SCL gere níveis nos reservatórios das demais usinas acima dos seus respectivos níveis máximos *maximorum*, as respectivas usinas também rompem.

Para os cenários referentes à vazão média de longo termo (QMLT), a ruptura da barragem programa se dá por *pipping*, enquanto que nos casos de vazão com TRs mais elevados a ruptura ocorre por *overtopping*. Vale comentar, que as usinas que rompem por consequências da ruptura de outra usina, tem suas brechas calculadas a partir de um cenário de *overtopping*.

O Quadro 4.2 apresenta um resumo dos cenários simulados. Vale lembrar que o mecanismo de falha apenas indica o modo de propagação da falha durante a simulação, e não que efetivamente o barramento falhará por galgamento (*Overtopping*) ou erosão interna (*pipping*).

**QUADRO 4.2**  
**CENÁRIOS DE RUPTURA AVALIADOS**

VAZÃO AFLUENTE	UHE SCL	UHE FND	UHE DRJ	MECANISMOS DE FALHA
QMLT	Não Rompe	Não Rompe	Não Rompe	N/A
QMLT	Rompe	Pode romper	Pode romper	<i>Pipping e Overtopping</i>
QMLT	Não Rompe	Rompe	Pode romper	<i>Pipping e Overtopping</i>
QMLT	Não Rompe	Não Rompe	Rompe	<i>Pipping</i>
TR 1.000 ANOS	Não Rompe	Não Rompe	Não Rompe	N/A
TR 1.000 ANOS	Rompe	Pode romper	Pode romper	<i>Overtopping</i>
TR 1.000 ANOS	Não Rompe	Rompe	Pode romper	<i>Overtopping</i>
TR 1.000 ANOS	Não Rompe	Não Rompe	Rompe	<i>Overtopping</i>
TR 10.000 ANOS	Não Rompe	Não Rompe	Não Rompe	N/A
TR 10.000 ANOS	Rompe	Pode romper	Pode romper	<i>Overtopping</i>
TR 10.000 ANOS	Não Rompe	Rompe	Pode romper	<i>Overtopping</i>

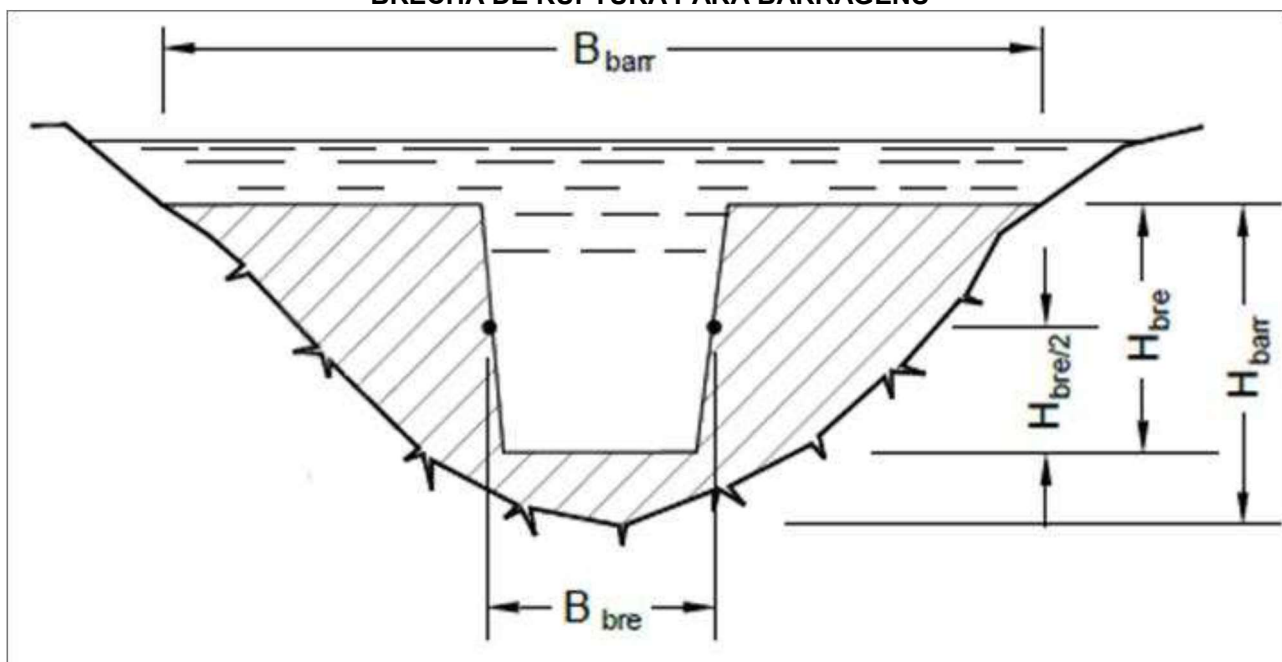


VAZÃO AFLUENTE	UHE SCL	UHE FND	UHE DRJ	MECANISMOS DE FALHA
TR 10.000 ANOS	Não Rompe	Não Rompe	Rompe	Overtopping

### 4.3 - Características da brecha de ruptura

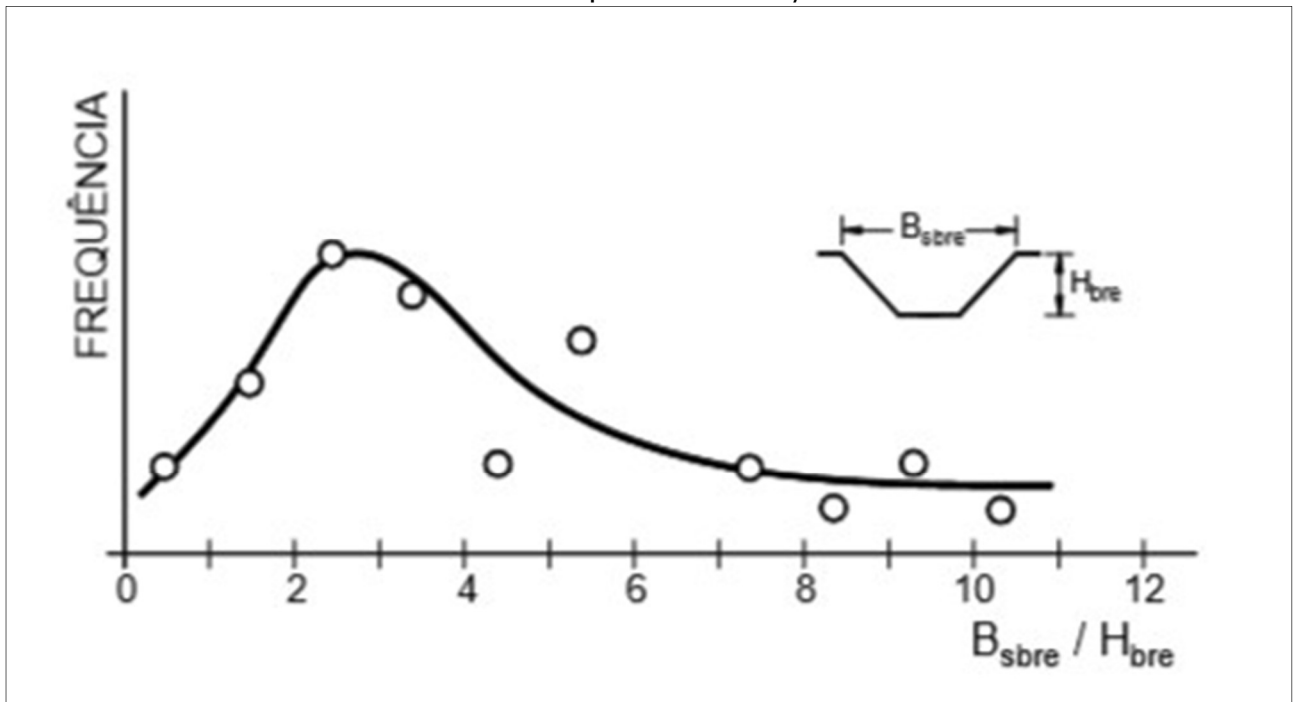
As características dinâmicas da onda de inundação provocada pelos diferentes mecanismos de ruptura de uma barragem são modeladas a partir de uma brecha de ruptura hipotética, conforme apresentado na Figura 4.1.

**FIGURA 4.1**  
**BRECHA DE RUPTURA PARA BARRAGENS**



As características principais a serem determinadas estão associadas à forma da brecha e ao tempo de formação da mesma. Existem vários modelos para se determinar as características da brecha, baseados em equações empíricas, modelos físicos ou semi-físicos para barragens de enrocamento e solo. SINGH e SCARLATOS (1988) analisaram as brechas de 52 casos históricos e verificaram que a frequência da razão entre a base superior e a altura da brecha é apresentada na Figura 4.2, onde se pode observar que a relação mais frequente entre a base superior da brecha e a altura da brecha é de aproximadamente 3, e a ruptura da barragem ocorre na cota de fundação da mesma, com a altura da brecha igual à altura da barragem.

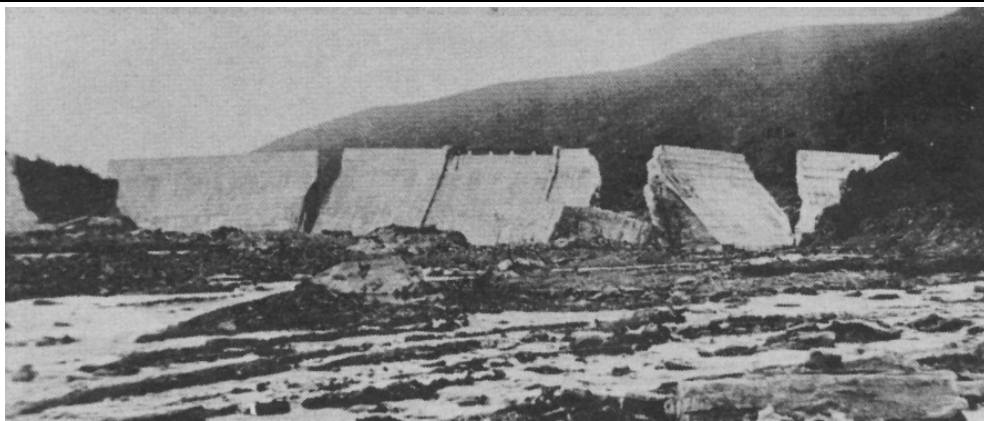
**FIGURA 4.2**  
 Curva de frequência  $B_{sbre}/H_{bre}$



Casos históricos provem informação valiosa para a identificação dos modos de falha, e da evolução da formação das brechas ao longo do tempo de ruptura. Essas informações provem os meios para a conceptualização e especificação dos fatos que levaram as barragens a falhar. Dentre os acidentes em barragens de concreto documentados está o a da Barragem *Austin Dam* na *Pennsylvania* nos Estados Unidos também conhecida como *Bayless Dam*. A barragem era de concreto gravidade, possuía reservatório com um milhão de metros cúbicos de volume rompeu em 1911 após galgamento devido a uma onda causada por um deslizamento no reservatório devido a uma nevasca. Rachaduras apareceram na região do vertedouro, levando os blocos a deslizarem e ocasionando o rompimento, resultando na morte de 78 pessoas. Na Figura 4.3 são apresentadas as fotografias da barragem antes e após o rompimento.

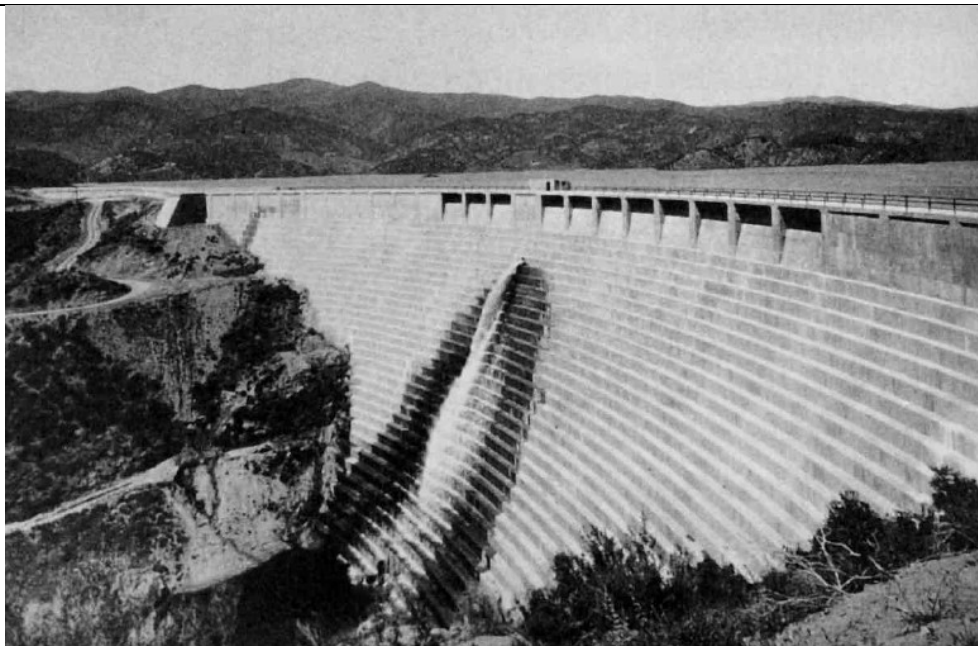
**FIGURA 4.3**  
**AUSTIN DAM PENNSYLVANIA 1911**



**Após o Rompimento**

Outro acidente em barragem de concreto bem documentado, é o rompimento da barragem de *St Francis* na Califórnia nos Estados Unidos. Construída em 1924 para o abastecimento da cidade de Los Angeles com altura de 63 m em arco de concreto gravidade. A barragem colapsou por erosão interna dois anos após sua construção. Em aproximadamente 70 minutos a barragem colapsou por completo esvaziando o reservatório de 47 hm<sup>3</sup> levando a morte de 432 pessoas. Na Figura 4.4 são apresentadas as fotografias da barragem antes e após o rompimento.

**FIGURA 4.4**  
**SANT FRANCIS DAM CALIFORNIA APÓS RUPTURA****Antes do Rompimento**

**Após o Rompimento**

As informações sobre acidentes em barragens de concreto são escassas, porém ao analisar a configuração final das falhas documentadas, nota-se em geral que independente do mecanismo de falha a configuração final de brecha de ruptura tende a ser ao longo de quase toda sua extensão e o desenvolvimento da falha se estende por alguns minutos.

Para a estimativa das condições de ruptura das barragens, foi utilizado o método de Froehlich (2008), sendo que o autor estudou 74 rupturas de barragens com alturas variando aproximadamente 3 e 90 m, para a parametrização dos parâmetros de brechas de ruptura de barragens.

No Quadro 4.3, Quadro 4.4, Quadro 4.5 e Quadro 4.6 são apresentadas as características da brecha de ruptura das usinas para o caso de ruptura em situação normal de operação (*piping*), situação de passagem da cheia milenar/decamilenar (*overtopping*) e situação onde a ruptura de uma barragem de montante causa o galgamento do nível de coroamento de uma barragem a jusante.

Os blocos centrais são mais leves e possuem maior coluna d'água, sendo os mais suscetíveis à ocorrência de falhas durante um galgamento por isto foram selecionados para a formação da brecha. O final da brecha foi considerado como sendo, aproximadamente, igual à diferença entre a cota de coroamento e a altura da barragem.

**QUADRO 4.3**  
**CARACTERÍSTICAS DAS BRECHAS – ROMPIMENTO CONSIDERANDO QMLT (PIPPING)**

BRECHA	UHE SCL	UHE FND	UHE DRJ
Coroamento da barragem (m)	811,00	712,50	616,00
NA do Reservatório na Falha (m)	805,00	705,50	610,00
Largura no fundo da brecha (m)	140	53	69
Cota final da falha (m)	744,00	670,00	543,00
Tempo de formação da brecha (horas)	1,77	0,81	0,81

**QUADRO 4.4**  
**CARACTERÍSTICAS DAS BRECHAS – DURANTE PASSAGEM DA VAZÃO MILENAR (OVERTOPPING)**

BRECHA	UHE SCL	UHE FND	UHE DRJ
Coroamento da barragem (m)	811,00	712,50	616,00
NA do Reservatório na Falha (m)	808,70	709,23	614,71
Largura no fundo da brecha (m)	194	74	90
Cota final da falha (m)	744,00	670,00	543,00
Tempo de formação da brecha (horas)	2,07	0,90	0,86

**QUADRO 4.5**  
**CARACTERÍSTICAS DAS BRECHAS – DURANTE PASSAGEM DA VAZÃO DECAMILENAR (OVERTOPPING)**

BRECHA	UHE SCL	UHE FND	UHE DRJ
Coroamento da barragem (m)	811,00	712,50	616,00
NA do Reservatório na Falha (m)	809,35	709,90	615,87
Largura no fundo da brecha (m)	196	75	92
Cota final da falha (m)	744,00	670,00	543,00
Tempo de formação da brecha (horas)	2,10	0,92	0,88

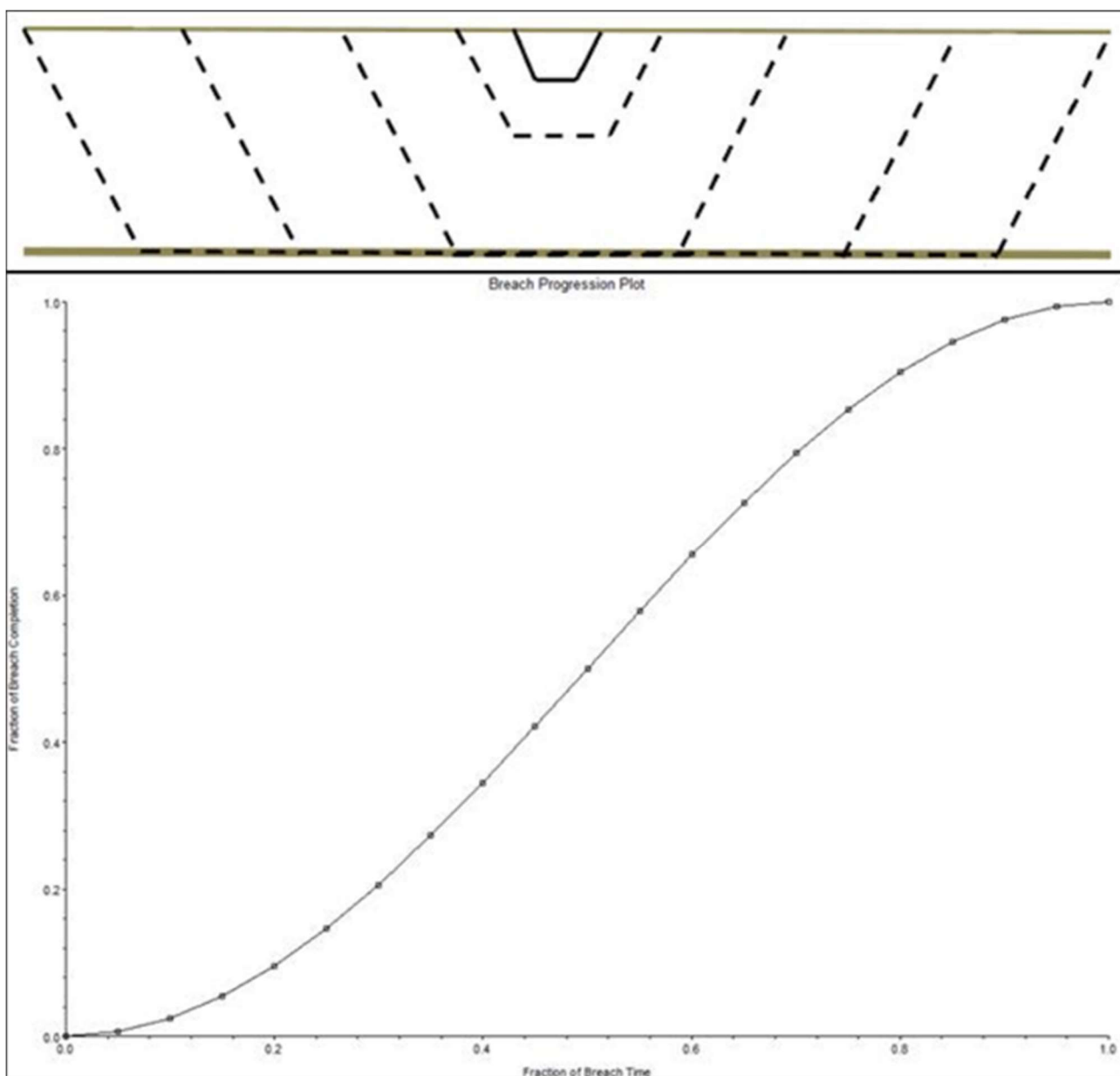
**QUADRO 4.6**  
**CARACTERÍSTICAS DAS BRECHAS – CASO A RUPTURA A MONTANTE CAUSE RUPTURA A JUSANTE**

BRECHA	UHE SCL	UHE FND	UHE DRJ
Coroamento da barragem (m)	N/A	712,50	616,00
NA do Reservatório na Falha (m)	N/A	712,50	616,00
Largura no fundo da brecha (m)	N/A	80	92
Cota final da falha (m)	N/A	670,00	543,00

Tempo de formação da brecha (horas)	N/A	0,98	0,88
-------------------------------------	-----	------	------

Além da geometria da brecha é informada a progressão da brecha no tempo, informando a taxa de crescimento entre as dimensões horizontal e vertical. Essa progressão foi simulada com meia onda seno, que apresenta um crescimento lento e um desenvolvimento rápido, a Figura 4.5 apresenta o esquema de evolução da brecha no tempo utilizado na simulação.

**FIGURA 4.5**  
**PROGRESSÃO DA BRECHA NO TEMPO**



#### 4.4 - Resultados

Independentemente do tipo de cenário de vazão simulado (QMLT, Milenar ou Decamilenar), a pior situação observada sempre ocorre a partir do rompimento da barragem da UHE Santa Clara. Nos cenários avaliados, o rompimento da barragem da UHE SCL sempre causou o galgamento das demais barragens, e conseqüentemente também os seus rompimentos.

Dado o volume e altura da barragem da UHE SCL, é possível observar que a sua ruptura é uma situação catastrófica não só para as UHE FND e UHE DRJ, como também para as demais usinas que se encontram a jusante de SCL, no rio Jordão.

O Quadro 4.7 apresenta o tempo aproximado que o pico da cheia resultante das rupturas leva para atravessar cada trecho de rio. O comprimento do trecho de rio considerado, representa a região que interliga a barragem que inicialmente rompeu na simulação, até a junção do rio Jordão com o rio Iguaçu.

Nota-se que o tempo entre o início do rompimento e da saída do pico da onda de cheia do sistema diminui gradativamente, à medida que o hidrograma afluente aumenta.

**QUADRO 4.7**  
**TEMPO DE TRÁFEGO DO PICO DA ONDA DE CHEIA A PARTIR DA RUPTURA DAS BARRAGENS**

CENÁRIO	COMPRIMENTO DO TRECHO (KM)	TEMPO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA (horas)	VELOCIDADE MÉDIA DA ONDA (M/S)
QMLT e Rompimento da UHE SCL	36,6	2:30	4,07
QMLT e Rompimento da UHE FND	22,6	1:50	3,42
QMLT e Rompimento da UHE DRJ	4,7	1:00	1,31
TR 1,000 ANOS e Rompimento da UHE SCL	36,6	2:05	4,88
TR 1,000 ANOS e Rompimento da UHE FND	22,6	1:43	3,66
TR 1,000 ANOS e Rompimento da UHE DRJ	4,7	0:47	1,67
TR 10,000 ANOS e Rompimento da UHE SCL	36,6	2:00	5,08
TR 10,000 ANOS e Rompimento da UHE FND	22,6	1:30	4,19
TR 10,000 ANOS e Rompimento da UHE DRJ	4,7	0:50	1,57

#### 5 - CONCLUSÕES

Neste relatório foi apresentada as considerações e resultados gerais da simulação da ruptura em cascata das usinas UHE SCL, FND e DRJ, onde foram avaliados os cenários de ruptura em condições normais de operação e vazão média de longo termo, e também de uma condição de cheia de evento extremo com tempo de retorno de 1.000 anos e 10.000 anos.

A simulação foi feita para a região entre o reservatório da UHE SCL e a junção do rio Jordão com o rio Iguaçu. Como não foram encontrados dados sobre a UHE Salto Curucaca, que se encontra a montante da UHE SCL, esta usina não foi considerada na simulação. Entretanto, dado o seu porte e pequeno volume armazenado, entende-se que ela não impacta significativamente os empreendimentos aqui analisados.

Todos os cenários envolvendo a ruptura de qualquer uma das barragens, resultou também no galgamento das barragens que se encontram a jusante, e conseqüentemente na sua ruptura.

Como o vale do rio Jordão é bem encaixado, todas as cheias simuladas ocorrem de forma bem definida ao longo do eixo principal do rio Jordão. Por esta razão as cheias simuladas não apresentam grandes vales de inundação, entre tanto possuem velocidades e profundidades altas.

## **6 - REFERÊNCIAS**

BRUNNER, Gary W. Using HEC-RAS for Dam Break Studies. US Army Corps of Engineers–Hydrologic Engineering Center, v. 547, 2014.

FROEHLICH, David C. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering, v. 134, n. 12, p. 1708-1721, 2008.