

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

TRABALHO DE FORMATURA II

2014



Proposta de interligações da hidrovia dos rios Paraná-Tietê com as dos rios Paraguai e Araguaia

Cenáriopós - Plano HidroviárioEstratégico (após 2030)

Maxime COURTOT
Ségolène DEGA
Vincent COLLETTE

São Paulo .04/12/2014

Maxime COURTOT
Ségolène DEGA
Vincent COLLETTE

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

TRABALHO DE FORMATURA II
2014

Engenharia Civil

**Proposta de interligações da hidrovia dos
rios Paraná-Tietê com as dos rios Paraguai e
Araguaia**

Cenáriopós - Plano HidroviárioEstratégico (após 2030)

Projeto de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, no âmbito do Curso de
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Titular Paolo ALFREDINI

São Paulo 04/12/2014

Catálogo-na-publicação

Courtot, Maxime Jean Alexis

Proposta de interligações da hidrovía dos rios Paraná e Tietê com as dos rios Paraguai e Araguaia: cenário pó Plano Hidroviário Estratégico (após 2030) / M.J.A. Courtot; V.J.M. Collette; S.M.C. Dega. -- São Paulo, 2014.

88 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1.Transportes hidroviário 2.Hidrovias 3.Canais fluviais 4.Bacia hidrográfica I.Collette, Vincent Jean Marie II.Dega, Segolène Marie Caroline III.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental IV.t.

AGRADECIMENTOS

Aos funcionários do Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Universidade de São Paulo, especialmente os da biblioteca pela ajuda durante as pesquisas bibliográficas.

A funcionária da biblioteca do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pela disponibilização de numerosas mapas.

Ao Roch de Hédouville pelas explicações sobre os cálculos de movimentos de terra.

Ao engenheiro Luiz Roberto Corrêa e a sua equipe do Departamento Hidroviário da Secretaria de Logística e Transportes pela ajuda e os conselhos sobre os métodos construtivos.

Muito especialmente, desejamos agradecer ao nosso orientador Prof. Titular Paolo Alfredini, pela disponibilidade, conselhos, sugestões, dedicação e revisão deste trabalho.

Resumo

Este trabalho de formatura cujo assunto é “proposta de interligações da hidrovia dos rios Tietê e Paraná com as dos rios Paraguai e Araguaia” trata do tema dos canais e obras de transposição permitindo ligar os rios. Assim tentamos responder à pergunta: Como vencer os desníveis que separam duas bacias hídricas?

Neste trabalho o objetivo é de propor uma solução para permitir às embarcações navegar sobre o Araguaia ou o Paraguai tendo a possibilidade de ligar o Tietê. Mais precisamente, o trabalho é focalizado sobre os canais e as obras que vão permitir vencer a linha de partilha entre as bacias.

Para fazer este trabalho, um estudo do uso presente e futuro das hidrovias foi feita para justificar o assunto. Depois, foi traçadas várias possibilidades de ligações com proposta de obras de transposição. Para concluir este trabalho, um orçamento foi calculado para escolher qual alternativa é a melhor.

No final, este trabalho propõe ligar o Rio Araguaia com o Rio Taquari passando pelo córrego Vermelho, assim o Rio Araguaia e Paraguai são ligados porque o Rio Taquari faz parte da bacia hídrica do Paraguai. Depois, este trabalho propões às embarcações navegar sobre o rio Coxim e ligar o Rio Prado passando pelo córrego Capim-Branco. O Rio Prado se joga no Rio Paraná, uma vez neste rio é fácil de chegar até o Rio Tietê.

SUMÁRIO

Introdução	11
Objetivos	12
Métodologia	13
Justificativa	14
Revisão Bibliográfica.....	15
I. Dimensionamento e determinação de alternativas de traçado	16
II.1. Concepção do projeto	16
II.1.1. Embarcação tipo.....	16
II.1.2. Projeto do canal.....	16
II.1.3.O alinhamento.....	17
II.1.4. Considerações sobre largura	19
II.2. Definição das alternativas de traçado	24
II.2.1 Regras a considerar para a definição do traçado	24
II.2.2. Tentativas de traçado e sua seleção	26
II.3. Dimensionamento da seção transversal do canal.....	44
II.3.1. Escolha da embarcação tipo.....	44
II.3.2. Dimensionamento da seção transversal	44
II.3.3 Considerações sobre a profundidade: relação velocidade/calado	45
II.3.4 Estabilidade das margens	46
II.3.5 Geologia.....	46
II.3.6 Análise da estabilidade.....	48
II. Análise e orçamento.....	54
III.1. Soluções para cruzamento de estradas.....	54
III.1.1. Alternativa 1: Ponte-canal.....	54
III.1.2. Alternativa 2: Ponte rodoviária	58
III.1.3. Aplicação ao estudo	60
III.2. Cubagens	71
III.2.1. Método do volume do prismóide.....	71
III.2.2. O modelo usado	72

III.2.3. A planilha do cálculo da cubagem	73
III.2.4. Casos particulares.....	75
III.2.5. Os resultados	77
III.3 Estimativa dos preços.....	77
III.3.1 Grandes estruturas.....	77
III.3.2 Movimentos de terra.....	80
III.3.3 Total.....	81
III.4. Problemáticas encontradas devido à água	81
III. Conclusão	87
IV. Referências	88

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Dimensões da embarcação tipo</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 2: Faixa básica de manobra.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 3: Larguras adicionais para seções reta de canais.</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 4: Largura adicional para distância de passagem em tráfego nos dois sentido..</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 5: Largura adicional para distância de margens.</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 6: Dimensões da embarcação tipo</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 7: Determinação da largura da seção transversal</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 8: Dimensões da seção transversal</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 9: Parâmetros geotécnicos do solo Bauru</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 10: Parâmetros geotécnicos do solo Botucatu</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 11: Parâmetros geotécnicos do solo Serra Geral.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 12: Fatores de segurança para a estabilidade de taludes.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 13: Resultados da planilha</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 14: Resultados obtidos para as 3 interligações</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 15: Preços das estruturas encontradas no projeto.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 16: N° de obras e preço para a interligação Araguaia-Paraguai.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 17: N° de obras e preço para a interligação Taquari-Prado</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 18: N° de obras e preços para a interligação Taquari-Rio Verde</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 19: Volumes de escavação e aterros</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 20 : Custo dos movimentos de terra.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 21: Custo devido à proteção das margens</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 22: Custo total de cada alternativa</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 23: Variação do nível de água nos estirões por descida das embarcações.</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 24: Variação do nível de água nos estirões por subida das embarcações.....</i>	<i>85</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 : Comboio tipo Tietê simples</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2: Trecho reto entre curvas e sinalização sugerida.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Representação da trajetória da embarcação na faixa básica de manobra.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4: Elementos da largura de um canal.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5: Parâmetros para o cálculo da sobrelargura.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6: Exemplo de uma escada de eclusa.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7: Mapa geral dos rios envolvidos no projeto. Em vermelho os pontos entre os quais devem ser feitas as interligações.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 8: Traçado planimétrico da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai no AutoCAD com o a mapa do Google Earth e inserção no Google Earth</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9: Traçado planimétrico da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai no AutoCAD com o a mapa do Google Earth e inserção no Google Earth.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10: Perfil longitudinal da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11: Traçado da alternativa 2 de interligação Araguaia-Paraguai com AutoCAD com o mapa do Google Earth e inserção no Google Earth.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 12: Traçado da alternativa 2 de interligação Araguaia-Paraguai com AutoCAD com o mapa do Google Earth e inserção no Google Earth.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligação Araguaia-Paraguai.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 14: Traçado da alternativa 1 da interligação Taquari-Prado no AutoCAD com um mapa Google Earth..</i>	<i>35</i>
<i>Figura 15: Traçado da alternativa 1 da interligação Taquari-Prado no AutoCAD com um mapa Google Earth..</i>	<i>36</i>
<i>Figura 16: Perfil longitudinal da alternativa 1 da interligaçãoTaquari-Prado.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 17: Traçado da alternativa 2 da interligaçãoTaquari-Prado no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth</i>	<i>38</i>
<i>Figura 18: Traçado da alternativa 2 da interligaçãoTaquari-Prado no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth</i>	<i>39</i>
<i>Figura 19: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligaçãoTaquari-Prado.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 20: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligaçãoTaquari-Prado</i>	<i>41</i>
<i>Figura 21: Traçado da interligaçãoTaquari-Rio Verde no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 22: Traçado da interligaçãoTaquari-Rio Verde no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth</i>	<i>43</i>
<i>Figura 23: Arenito Botucatu.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 24: Arenito Bauru.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 25: Inserção de uma berma no talude do canal.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 26: Arenito Bauru, margens estáveis.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 27: Basalto Serra Geral (instável).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 28: basalto Serra Geral (estável).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 29: Seção transversal 1V:2H.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 30: Seção transversal 1V:3H.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 31: Elevação longitudinal mostrando travessia do canal projetado em comparação ao solo. (1) e a uma estrada (3). Caso favorável a uma ponte-canal(2).....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 32: Elevação longitudinal de uma ponte-canal longa (2, 4) para travessias sobre uma estrada (3) e um canal (1).</i>	<i>55</i>
<i>Figura 33: A esquerda a inspeção da ponte-canal de Briare (França) e à direita colocação de uma manta para estanqueidade da ponte-canal de Cacor (França).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 34: Ponte-canal metálica dos Herbettes (França).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 35: Ponte-canal de concreto armado do Sart (Bélgica).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 36: Configuração para a construção de uma ponte rodoviária (3) sobre um canal (2).</i>	<i>58</i>

<i>Figura 37: Representação esquemática da travessia de um canal (2) por uma estrada com a solução de ponte rodoviária (3).</i>	58
<i>Figura 38: Ponte rodoviária metálica sobre o canal Rhin-Herne.</i>	59
<i>Figura 39: Ponte rodoviária de concreto sobre o canal Saint Denis (França).</i>	59
<i>Figura 40: Planta do cruzamento ao Km 7,5.</i>	60
<i>Figura 41: Planta do cruzamento no Km 12,48.</i>	61
<i>Figura 42: Perfil longitudinal da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai. Os círculos vermelhos marcam os cruzamentos.</i>	62
<i>Figura 43: Planta na travessia no km 6,06.</i>	63
<i>Figura 44: Planta do cruzamento ao km 11.</i>	63
<i>Figura 45: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligação Araguaia-Paraguai. Os círculos vermelhos marcam os cruzamentos.</i>	65
<i>Figura 46: Planta de travessia das alternativas 1 e 2 com uma via secundária de terra.</i>	66
<i>Figura 47: Planta da travessia no km 3,6.</i>	67
<i>Figura 48: Planta com a entrada do túnel para o cruzamento no km 15,2.</i>	68
<i>Figura 49: Estradas vicinais de terra na proximidade do fim do túnel serão desviadas permitindo um ponto de passagem a mais.</i>	69
<i>Figura 50: Planta da travessia no km 3,6.</i>	69
<i>Figura 51: Perfil longitudinal da interligação Taquari-Rio verde. Os círculos vermelhos marcam os cruzamentos.</i>	70
<i>Figura 52: prismóide (Pontes Filho, 1998).</i>	71
<i>Figura 53: Seção transversal para $x > 0$.</i>	72
<i>Figura 54: Seção transversal para $0 > x > -(5+h)$.</i>	72
<i>Figura 55: Seção transversal para $x < -(5+h)$.</i>	73
<i>Figura 56: Código cálculo da distância.</i>	74
<i>Figura 57: Fórmulas das seções.</i>	74
<i>Figura 58: Cálculo da cubagem.</i>	75
<i>Figura 59: Seção transversal plano inclinado $x > 0$.</i>	75
<i>Figura 60: Seção transversal plano inclinado $x < 0$.</i>	76
<i>Figura 61: Seção transversal do túnel.</i>	76

Introdução

Atualmente no Brasil o uso das hidrovias para o transporte de cargas é modesto, comparativamente às grandes economias mundiais. Com efeito, a rede fluvial do país tem uma extensão de 63.000 km, dos quais somente 29.000 km são navegáveis, e somente 21.000 km são integrados ao sistema logístico da rede hidroviária.

Este trabalho integra-se à proposta de um plano geral para implementar o transporte hidroviário do Brasil. Com efeito, o objetivo é propor canais de interligação entre algumas das mais importantes hidrovias do Brasil, a do rio Paraná-Tietê com as dos rios Paraguai e Araguaia. Essas propostas baseiam-se num cenário pós-Plano Hidroviário Estratégico (após 2030), ou seja, com uma rede hidroviária já bastante melhorada (o PHE é um plano de desenvolvimento dos transportes hidroviários pedido pelo Ministério dos Transportes, esse relatório foi estudado na primeira parte do trabalho de formatura).

Na primeira parte deste trabalho foi estudada a capacidade de transporte hidroviário atual no Brasil e as projeções para os próximos anos, segundo vários planos governamentais de desenvolvimento do transporte de cargas. Essa análise foi feita na escala do Brasil, mas com uma atenção especial para as hidrovias deste projeto, identificando as cargas mais promissoras e uma ordem de grandeza das movimentações atuais e futuras. Foi assim justificada a relevância deste estudo face ao potencial e à futura extensão da rede hidroviária brasileira.

Num segundo tempo estudaram-se os vários tipos de obras de transposição de nível existentes, detalhando para cada uma as vantagens e desvantagens. Esse estudo foi necessário para se poder escolher as obras mais adequadas no momento das propostas de ligações.

Essa segunda parte do projeto tem como objetivo, num primeiro tempo, propor os traçados das ligações, bem como as obras de transposição necessárias, tentando minimizar a distância e o desnível total. Várias alternativas foram propostas para a comparação dos custos.

Num segundo tempo, foi feito o dimensionamento da seção transversal do canal, para permitir a passagem de dois comboios tipo e satisfazer condições de estabilidade geotécnica de taludes. Algumas problemáticas, como as travessias dos canais futuros com as estradas existentes serão também estudadas. As travessias com linhas de alta tensão e adutoras não foram contempladas.

Finalmente, a última parte trata do orçamento do projeto. Um cálculo preliminar dos movimentos de terra foi feito para estimar as quantidades de terra de escavação e de aterro. Com esses volumes foram calculados os custos referentes aos movimentos de terra. Os custos devidos às obras de arte do projeto foram também estimados. A comparação dos custos finais para cada opção proposta permitiu escolher as melhores alternativas.

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de formatura é produzir mapas dos traçados dos canais que permitem ligar as bacias do Rio Araguaia e do Rio Paraguai com a bacia do sistema Paraná-Tietê. Assim, serão propostos mapas em plano, e também perfis longitudinais das interligações. Nas mapas serão localizadas as obras de transposição que permitem vencer os desníveis.

A escolha será feita por comparação entre os orçamentos das diferentes alternativas baseado sobre o custos das obras de transposição e a cubagem.

Métodologia

Primeiro, o objetivo foi de estabelecer se um projeto de interligação das bacias pode ser útil para o Brasil. Isso foi feito em particular com Planos Hidroviários estabelecidos para o ministério dos transportes.

Segundo, este trabalho é baseado sobre um estudo que foi feito por um consórcio franco brasileiro sgte-lasa no início da década 70 que propõe traçados gerais para ligar as bacias hídricas brasileiras. A partir das descrições e dos mapas feitos na mão, esses traçados foram atualizados e desenhados no Google Earth.

Em terceiro lugar, o objetivo foi de descobrir as problemáticas levadas na construção de canais de transposição. Assim foi estudadas as várias obras permitindo a transposição de desníveis como as eclusas, os elevadores, os planos inclinados, os pentas de água ...

Em quarto lugar, no Google Earth foi traçado os canais de ligação com muitas alternativas. Essa etapa é um estudo do relevo para achar os lugares onde têm pouco desníveis, ou desníveis característicos que podem ser vencidos pelas obras de transposição conhecidas. Além disso, esse traçado é feito respeitando as recomendações do PIANC. Esta etapa do trabalho produziu mapas em planta e perfis longitudinais dos canais.

Em quinto lugar, uma embarcação tipo foi escolhida e com os relatórios do PIANC a seção dos canais foi estabelecida. Além do PIANC, a seção dos canais é função da geologia encontrada. Assim, pesquisas bibliográficas foram feitas para determinar qual são os solos recebem o projeto. E para determinar a penta das margens, o software Geoslope foi usado para ajudar nessa tarefa.

Em sexto lugar, foi feito um orçamento do projeto. Para essa etapa foi realizada uma planilha de cálculo de cubagem tratando as coordenadas geográficas extraídas do Google Earth e determinando os movimentos de terra. Além disso, foi feita uma comparação de custos entre as obras de arte já existentes para escolher um preço para cada obra usada.

Justificativa

Construções de canais fazem parte dos grandes projetos das obras públicas. Esses tipos de projetos fizeram a história permitindo ligar os mares (canal de Suez, canal de Panamá, ...) e ligar os povos continentais, desenvolvidos assim os câmbios comerciais.

É um tema bem da engenharia porque é multidisciplinar, trabalhando sobre a engenharia dos transportes, da construção, da hidráulica, da mecânica e da engenharia ambiental.

Este trabalho é relevante para a Engenharia Civil porque trata da construção de canais que são obras públicas. É o desenvolvimento de tomadas de decisões justificativas para a concepção de um projeto de construção.

Revisão Bibliográfica

Este trabalho é baseado sobre um estudo feito por um consórcio franco-brasileiro sgte-lasa na década 70. Esse estudo “vias navegáveis interiores do brasil”, feito para o ministério dos transportes é constituído com três livros:

- Conceitos básicos sobre hidrovias e navegação interior, primeira parte
- Conceitos básicos sobre hidrovias e navegação interior, primeira parte
- Ligações de bacias

Esse estudo propõe traçados para navegar entre as bacias hídrica brasileiras e localiza os lugares onde pode ser construídos canais de ligação dessas bacias. Este trabalho de formatura trata especificamente desses lugares.

Além desse antigo estudo, o trabalho se apoia sobre as publicações do PIANC que é um consórcio de profissionais da esfera da engenharia das hidrovias. Eles propõem normas e recomendações para a concepção de obras marítimas e fluviais.

I. Dimensionamento e determinação de alternativas de traçado

II.1. Concepção do projeto

Essa parte, descreve as normas da PIANC que se adotam para traçar os canais do projeto segundo a embarcação tipo selecionada.

II.1.1. Embarcação tipo

A embarcação tipo selecionada é o comboio de empurra Tietê simples, cujas características são as seguintes:

Comprimento(L_{OA})	138,50 m
Boca (B)	11 m
Calado (T)	2,70 m
Pé de piloto	0,30 m
Porte bruto	2 400 tpb

Tabela 1: Dimensões da embarcação tipo

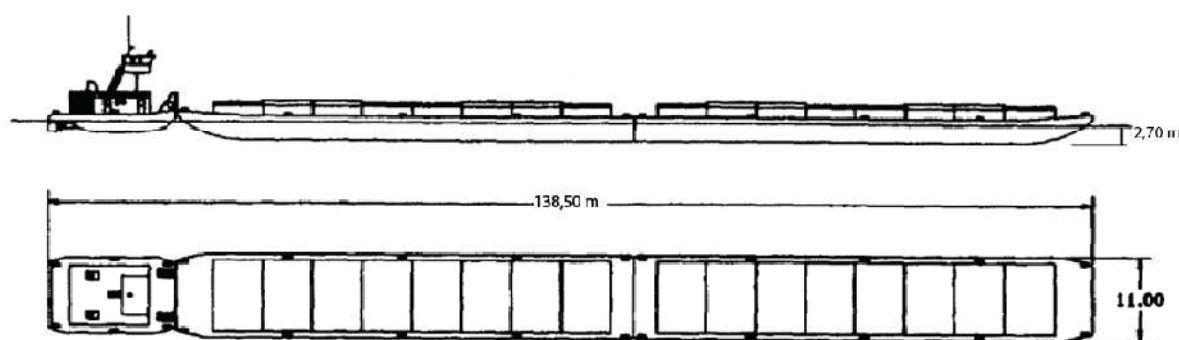


Figura 1 : Comboio tipo Tietê simples

Esse comboio é composto por um empurrador ($L_{OA} = 18,50$ m) e um arranjo 2x1 chatas ($L_{OA} = 2 \times 60$ m). Nestas condições, os trechos dos canais de interligação das bacias hidroviárias seguem o gabarito IV do PNVNI – Plano Nacional de Vias Navegáveis Interiores de 1989 (ALFREDINI & ARASAKI, 2014).

II.1.2. Projeto do canal

O projeto de um canal tem que ser otimizado do ponto de vista econômico e também permitir que as embarcações naveguem em plena segurança.

A embarcação tipo selecionada faz parte do grupo de embarcações usadas na categoria de canais V^b , segundo a classificação PIANC (1999). O grupo de trabalho 20 da PIANC, estudando os canais V^b da França, Alemanha, Holanda e Bélgica, propôs uma padronização para projetar esse tipo de canal. Porém, a embarcação tipo desse projeto tem dimensões um pouco menores, então a padronização proposta vai ser adaptada. Além disso, o suplemento ao boletim nº95 da PIANC (1997), intitulado “Canais de Acesso Um Guia para Projetos”, oferece muitos conselhos para o traçado dos canais externos e internos.

Para o projeto de um canal, três parâmetros são essenciais: o alinhamento, a largura e a profundidade.

II.1.3.0 alinhamento

O alinhamento do canal deve ser adotado tendo-se em mente, dentre outros fatores, os seguintes:

- O menor comprimento do canal
- Os rios a ligar
- A necessidade de evitar obstáculos (forte relevo, propriedades privadas, ...)
- Evitar curvas em proximidades de entradas de sistemas de transposição, ...

Trechos retos de canais são preferíveis a trechos curvos, assim o traçado tem que dispor um alinhamento que consista de uma série de trechos retos ligados por curvas suaves, então nesse projeto o raio de curvatura mínimo adotado foi de seis vezes o comprimento da embarcação tipo, correspondendo, assim, a 831m. (Figura 1). Se raios de curvatura menores forem usados, um sistema de sinalização deverá ser estabelecido para indicar uma redução da velocidade. Além disso, entre duas curvas é aconselhável adotar um trecho reto de concordância com comprimento mínimo de cinco vezes o comprimento do navio tipo (nesse projeto: $5 \times 138,50 = 692,50$ m).

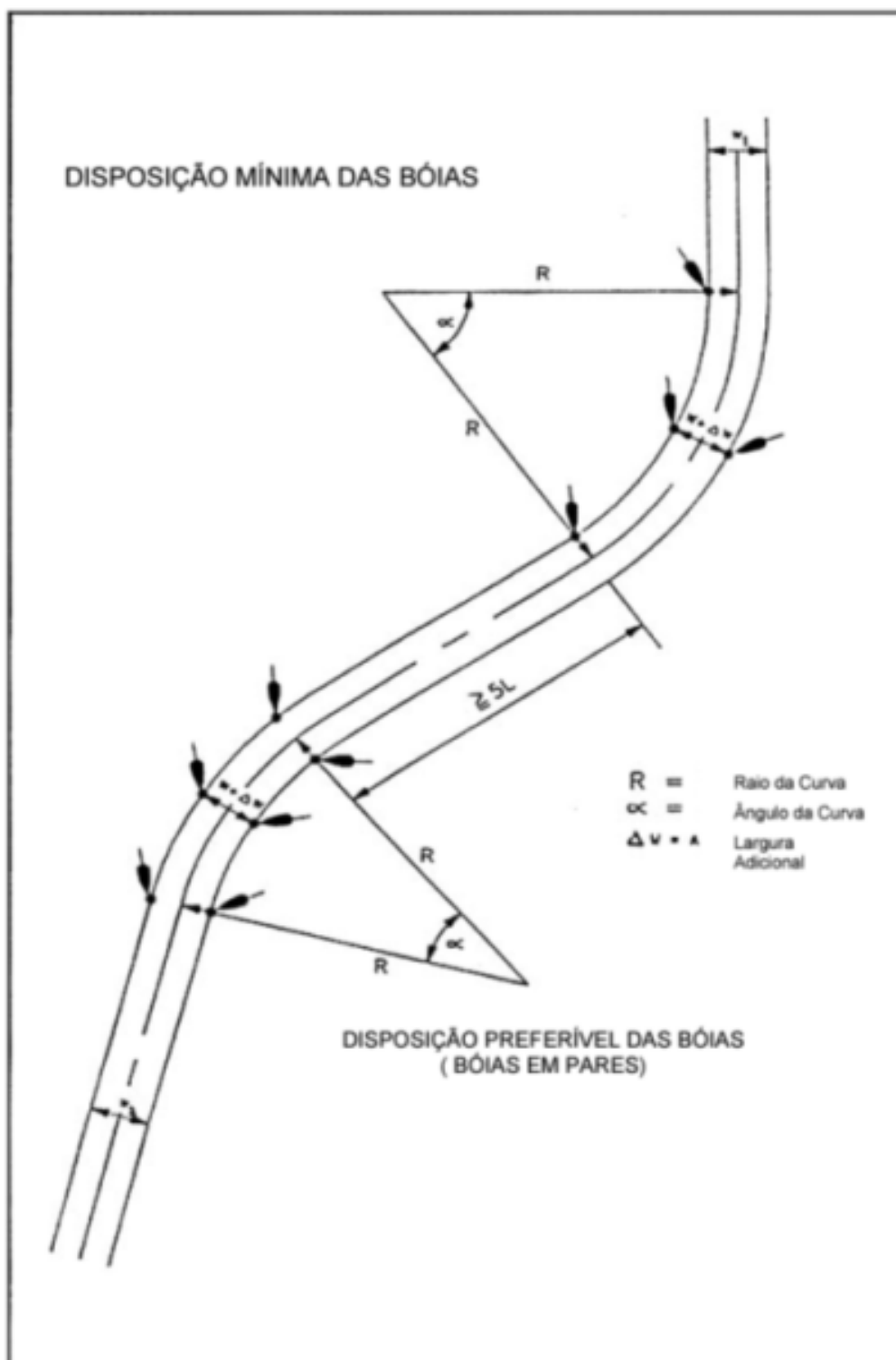


Figura 2: Trecho reto entre curvas e sinalização sugerida.

Como foi mencionado acima, o raio de curvatura mínimo adotado no projeto foi de seis vezes o comprimento do comboio. Essa limitação permite que a embarcação tipo empregue um ângulo constante de leme, que seja menor do que seu ângulo máximo de manobra. Assim, isso deixa “reserva” de ângulo de leme para fazer guinadas em face de ventos, ondas ou correntes e melhora assim a segurança.

II.1.4. Considerações sobre largura

Devido a diferentes fatores, como a velocidade de resposta, tanto de quem manobra a embarcação, na interpretação das referências visuais que indicam posição, quanto à embarcação em reagir ao leme, é claro que a largura da faixa básica de manobra é superior à boca da embarcação (Figura 2).

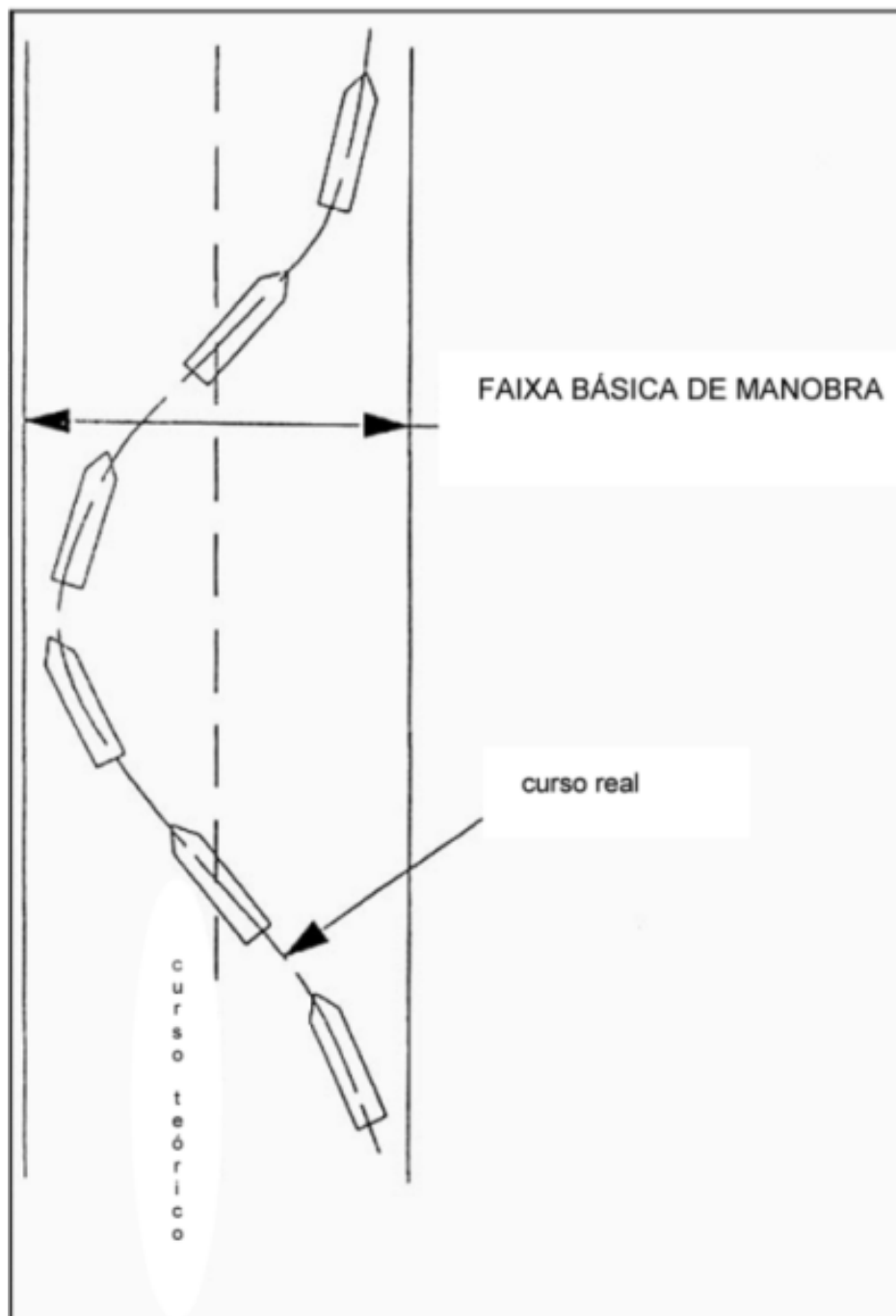


Figura 3: Representação da trajetória da embarcação na faixa básica de manobra.

Além da manobrabilidade inerente do comboio à habilidade de quem manobra, há outros fatores que influem sobre o projeto da largura do canal:

- Fatores ambientais (vento, corrente, ondas) geralmente esses fatores são desprezíveis nos canais internos
- Forma das margens
- Velocidade das embarcações
- Carga das embarcações

Além disso, nesse projeto são considerados canais de mão dupla (Figura 3), então deve ser considerada uma largura adicional entre as faixas de manobra para reduzir a interação hidrodinâmica das embarcações.

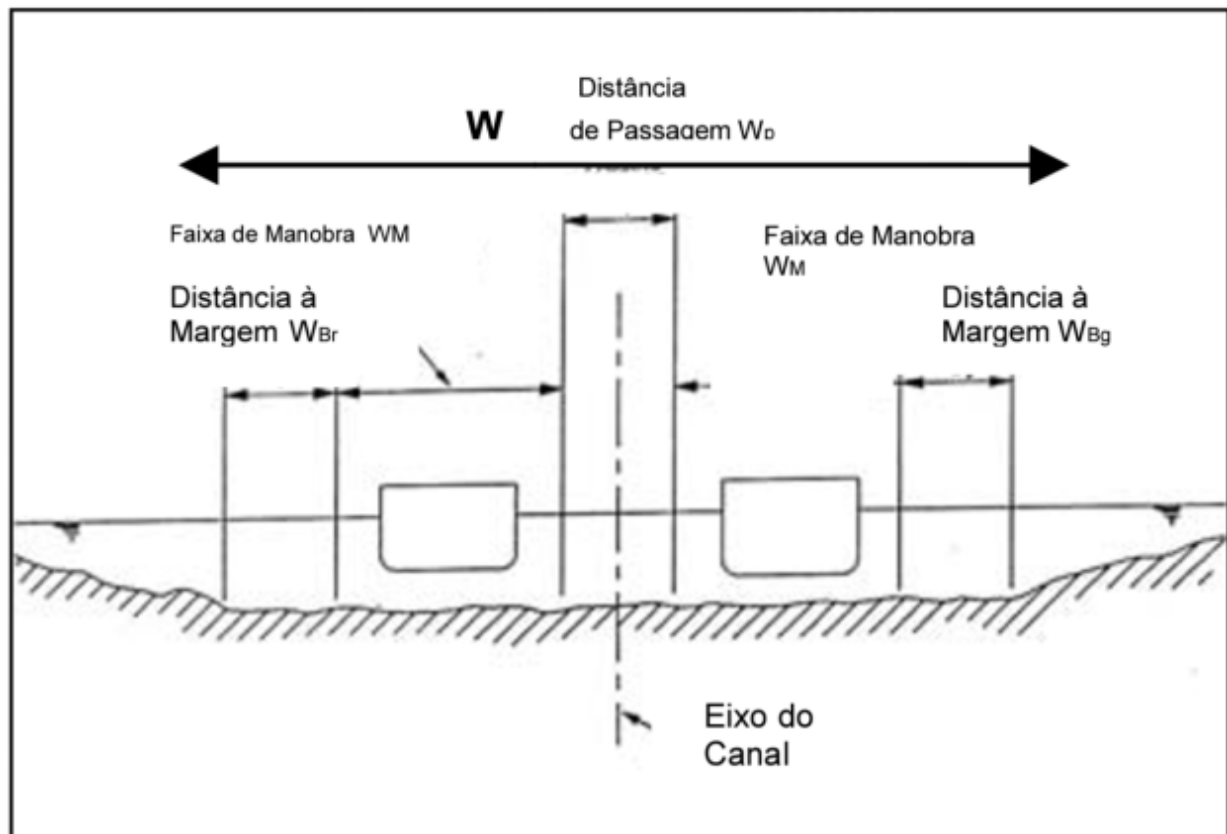


Figura 4: Elementos da largura de um canal.

Somando os termos das tabelas 1 a 4 obtém-se a largura do fundo do canal:

Manobrabilidade do navio	Boa	moderada	fraca
Faixa Básica de Manobra, W_{BM}	1,3 B	1,5 B	1,8 B

Tabela 2: Faixa básica de manobra.

LARGURA w _l	Velocidade Navio	Canal Interno águas abrigadas
a) Velocidade do navio (nós) - alta > 12 - moderada > 8-12 - baixa 5 – 8		0,1B 0,0 0,0
b) Vento pelo travês (nós) - brando < 15 (< Beaufort 4) - moderado > 15-33 (> Beaufort 4 - Beaufort 7) - forte > 33 – 48 (> Beaufort 7 - Beaufort 9)	toda Alta Moderada baixa Alta Moderada Baixa	0,0 - 0,4 B 0,5 B - 0,8 B 1,0 B
c) Corrente pelo travês (nós) - desprezível < 0,2 - fraca 0,2 - 0,5 - moderada > 0,5 - 1,5 - forte > 1,5 - 2,0	Toda Alta Moderada Baixa Alta Moderada Baixa Alta Moderada Baixa	0,0 - 0,1 B 0,2 B - 0,5 B 0,8 B - - -
d) Corrente longitudinal (nós) - fraca < 1,5 - moderada > 1,5 - 3 - forte > 3	toda alta moderada baixa alta moderada baixa	0,0 - 0,1 B 0,2 B - 0,2 B 0,4 B
e) Altura significativa de onda Hs e comprimento λ (m) - Hs ≤ 1 e λ ≤ L - 3 > Hs > 1 e λ = L - Hs > 3 e λ > L	toda alta moderada baixa alta moderada baixa	0,0
f) Auxílios à Navegação - excelentes c/controle de tráfego com base em terra - bom - moderado, com baixa visibilidade ocasional - moderado com baixa visibilidade freqüente		0,0 0,1 B 0,2 B ≥ 0,5 B
g) Tipo de fundo - se profundidade ≥ 1,5 T - se profundidade < 1,5 T, então - liso e mole - liso ou inclinado e duro - irregular e duro		0,00 0,1 B 0,1 B 0,2 B
h) Profundidade da hidrovía - ≥ 1,5 T - 1,5 T - 1,25 T - < 1,25 T		≥ 1,5 T 0,0 < 1,5 T - 1,15 T 0,2 B < 1,15 T 0,4 B
i) Nivel de periculosidade da carga - baixo - médio - alto		0 ~ 0,4 B ~ 0,8 B

Tabela 3: Larguras adicionais para seções reta de canais.

Largura para distância de passagem W_p	Canal Interno Águas Protegidas
Velocidade do navio (nós)	
- alta > 12	-
- moderada > 8 - 12	1,4 B
- baixa 5 – 8	1,0 B
Densidade de cruzamentos	
- baixa	0,0
- moderada	0,2 B
- alta	0,4 B

Tabela 4: Largura adicional para distância de passagem em tráfego nos dois sentido.

Largura para Distância de margens (W_{Br} ou W_{Bg})	Velocidade do navio	Canal Interno águas abrigadas
Margens de canal inclinadas e baixios:		
	Alta	-
	moderada	0,5 B
	Baixa	0,3 B

Tabela 5: Largura adicional para distância de margens.

Os elementos das tabelas em amarelo são as características empregadas nesse projeto.

Além disso, em algumas curvas, para facilitar a navegação, uma largura adicional, sobrelargura, é colocada no lado interior do traçado. Segundo as recomendações da PIANC, essa largura é determinada pela fórmula de Graewe, segundo o Esquema 1:

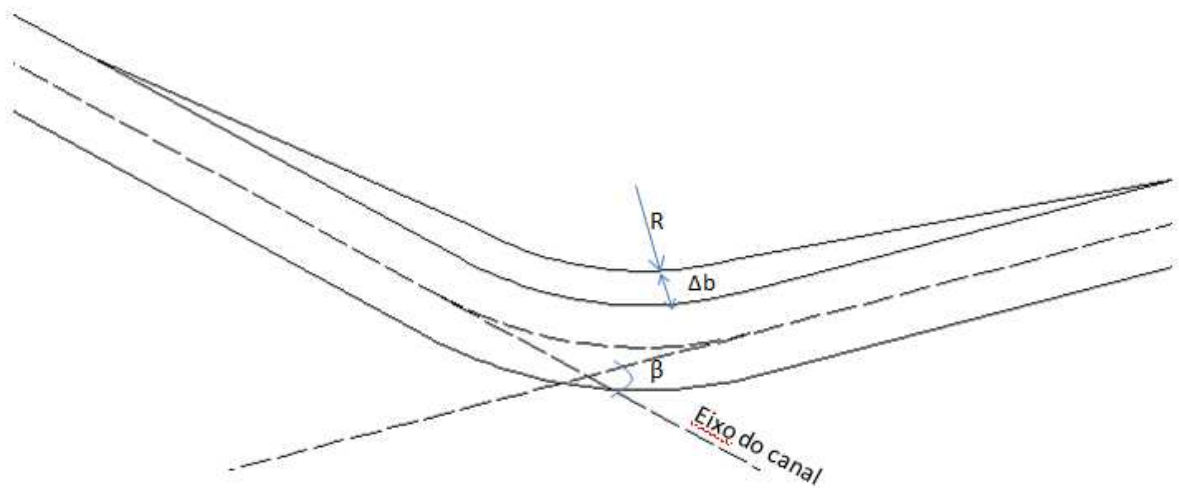


Figura 5: Parâmetros para o cálculo da sobrelargura.

- β : ângulo entre os eixos
- R: raio de curvatura
- Δb : largura adicional
- L: comprimento da embarcação

Consideram-se quatro casos:

- Se $R > 10L$: $\Delta b = 0$
- Se $\beta > 30^\circ$:

$$\Delta b = \frac{c \times L^2}{R}$$

com $c=0,35$ para comboios vazios, $c=0,1$ para comboios à plena carga.

- Se $20^\circ < \beta < 30^\circ$:

$$\Delta b = \frac{\beta}{30} \times \frac{c \times L^2}{R}$$

- Se $\beta < 20^\circ$: sempre usar $R > 10L$, sem largura adicional

Neste projeto algumas curvas precisam dessa largura adicional. O valor dessa largura adicional é dado para cada curva na parte que trata do traçado mesmo.

II.2. Definição das alternativas de traçado

II.2.1 Regras a considerar para a definição do traçado

Para iniciar os estudos do canal, a primeira atividade foi a de definir o traçado que permitisse realizar as interligações entre os rios Araguaia-Paraguai, Taquari-Prado e Verde-Taquari. Com estas três ligações, um comboio poderá navegar pelas bacias do Paraguai, Araguaia e Paraná-Tietê e assim integrar o Centro-Oeste ao Sudeste do país com as cargas transportadas. As diretrizes para este trabalho foram obtidas do trabalho pioneiro do Consórcio Franco-Brasileiro SGT-LASA (1968).

Tendo sido definida uma embarcação de projeto como a do comboio tipo Tietê simples, com duas chatas, 138,5m de comprimento e 11 m de largura, para um calado de 2,70m, o tamanho e o deslocamento dessa embarcação condiciona o traçado, como, por exemplo, o raio de curvatura superior a 6 vezes o comprimento do comboio. Outros fatores que influem são as dimensões das câmaras de transposições necessárias, podendo-se utilizar um número limitado de obras de transposição para passar sobre, ou sob os obstáculos encontrados. Para ter certeza da possibilidade de construção das obras de transposição que foram adotadas no trabalho, decidiu-se ajustar o tamanho das obras de transposição com obras já existentes:

- Eclusas de 20 m de queda, com câmara de dimensões 142,25m x 12m. A concepção ótima de eclusa para o projeto é a com muro-máscara. De fato, a eclusa padrão escolhida para o projeto tem uma queda de 20m, que entra na categoria das eclusas de “queda grande”. No projeto, optou-se por colocar as eclusas mais próximo de uma margem do canal, para se ter a possibilidade de uma outra eclusa na margem oposta quando o tráfego se incrementar no canal. Nesse caso, poder-se-á colocar um sistema para interligar as câmaras, visando a transferência da água de uma eclusa para a outra. Essa configuração sistema denomina-se de eclusas gêmeas, o que permite reduzir o consumo de água.
- Elevadores com 70m de desnível máximo. Já existe um elevador com este desnível na Bélgica, o elevador de Stépy-Thieu, inaugurado em 2002.
- Propõe-se também um túnel de 4 km de comprimento e de 30 metros de largura. A tecnologia dos túneis hidroviários já é consagrada desde o Século XIX. Podemos citar como obras existentes os túneis na França de Niederviller (475m) e de Arzwiller (2306m, construído em 1849), porém a largura deles é bem menor que a largura considerada neste projeto.
- Para concluir, foram propostos planos inclinados longitudinais, com declividade de 2,90% , e com câmara de 142,25m x 12m. Já existem vários planos inclinados no mundo, como o de Krasnoïarsk na Sibéria e o plano de Ronquières na Bélgica, que tem comprimentos inferiores (90 m).
- Dependendo da configuração do terreno, é também possível construir uma escada de eclusas, ou seja uma seqüência de eclusas muito próximas, que permitem vencer um desnível grande em um comprimento reduzido. Tal concepção é utilizada, por exemplo, na China, na Barragem de Three Gorges (Figura 4).

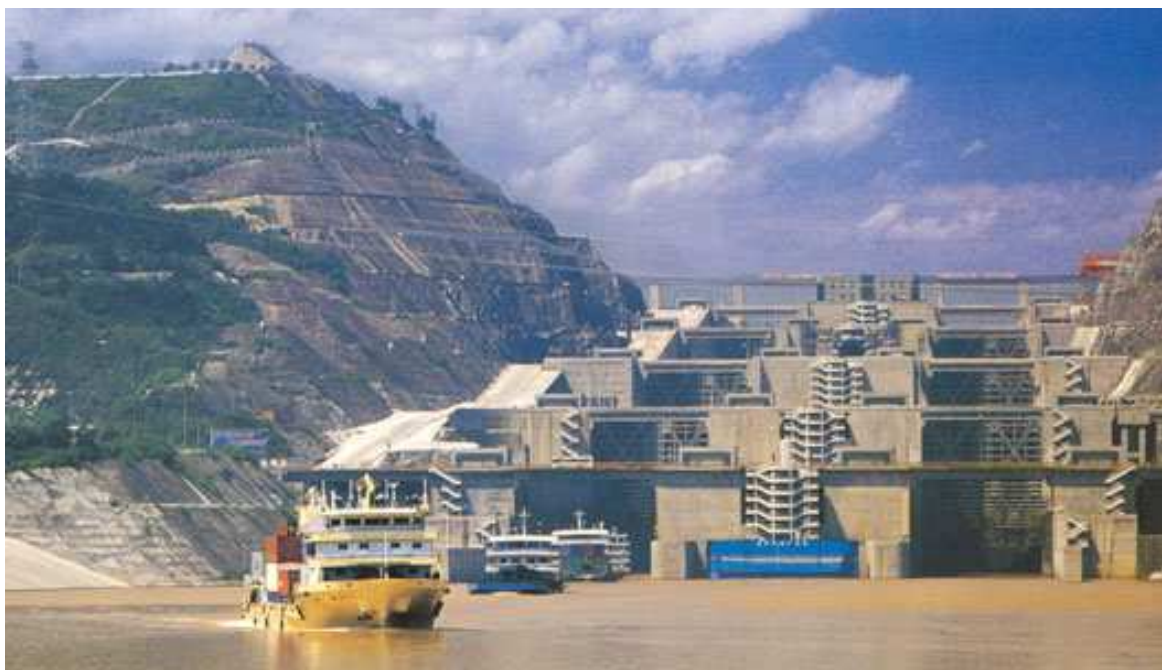


Figura 6: Exemplo de uma escada de eclusa.

Outra dificuldade técnica a considerar durante o planejamento do traçado, é a possibilidade de encontrar uma fonte de abastecimento de água numa área próxima do alinhamento proposto. Com efeito, para encher os canais de partilha demanda-se volume d'água, bem como para abastecer as eclusas que têm a maior cota, é necessária muita água. Encontrar água não é fácil, e tem que se levar em consideração que construir quilômetros de aqueduto pode tornar-se uma solução muito cara. Então, tem que se investigar minuciosamente uma solução para se ter um traçado bom, não muito longe de um manancial de água.

Para definir o traçado, sempre tem que se pensar na dimensão econômica do projeto, porque se as despesas de construção são muito altas, o projeto terá dificuldades para encontrar investidores que o implantem e mantenham. Assim, tem que se buscar o traçado com os menores variações de cotas, com altimetria adequada para reduzir o número de obras de arte de transposição a construir. Assim, uma alternativa pode ser um elevador único sobre um terreno que tenha um grande desnível numa distância reduzida, ao invés de ter que construir dez eclusas sobre um terreno cujo desnível é o mesmo, mas com uma inclinação muito menor. No entanto, como mencionado neste relatório, cada situação é diferente e tem que ser analisada.

Deve-se buscar o menor comprimento possível do canal, pois a construção de cada quilômetro é onerosa, com a escavação e estabilização do terreno, a implantação da drenagem e todas as máquinas, equipamentos e mão de obra envolvidos.

II.2.2. Tentativas de traçado e sua seleção

a. Tentativas de traçado e roteiro

Na Figura 7 está apresentado o mapa geral dos rios envolvidos no projeto. Os trechos que foram utilizados, e que já se constituem em hidrovias, estão assinalados em amarelo. Os canais de interligação cujos traçados devem ser definidos, ligam os pontos vermelhos.

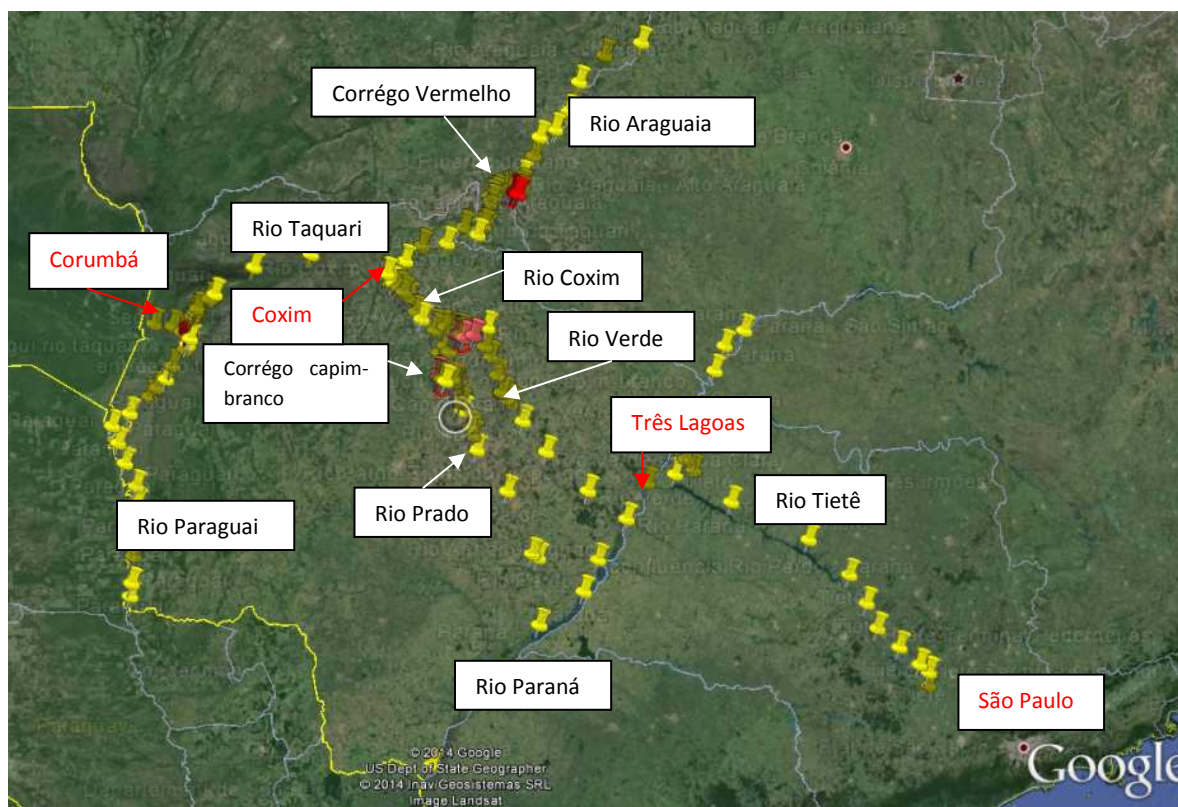


Figura 7: Mapa geral dos rios envolvidos no projeto. Em vermelho os pontos entre os quais devem ser feitas as interligações.

Para definir os traçados, iniciou-se por desenhar dois ou três alternativas para cada interligação, para se ter a possibilidade de escolher a melhor por trade-off, ou seja efetuar compromissos para tentar fazer a melhor escolha.

Para encontrar cada um dos traçados, o processo seguido foi o seguinte:

- Utilizaram-se as ferramentas disponíveis no software Google Earth, que são muito práticas, porque permitem definir o traçado e modificá-lo para otimizar o perfil longitudinal. Este traçado é uma aproximação, não levando em conta vários parâmetros, como os raios de curvatura e os detalhes, como as sobrelarguras necessárias em caso de raios de curvatura muito reduzidos.
- Segue-se com a utilização do software AutoCAD para fazer uma definição melhor do traçado. O AutoCAD é um software bem mais adequado, porque permite determinar os raios de curvatura.

- Uma vez o traçado feito no AutoCAD, foi inserido no Google Earth para visualizar o perfil longitudinal.
- A última etapa consistiu em se trabalhar sobre o perfil longitudinal do traçado a cota do fundo do canal com as obras de transposição. Sabe-se que se pode escavar até 30 m de profundidade para superar um obstáculo. As obras de transposição foram escolhidas em função do terreno. Em caso de uma declividade forte sobre uma distância reduzida, o elevador, ou a escada de eclusas, foram as opções. Em sendo a declividade reduzida sobre uma distância média foi utilizado o plano inclinado e, nos demais casos, por exemplo se a declividade for média ou reduzida sobre grandes distâncias, as eclusas foram utilizadas.

Depois deste processo, conhece-se o perfil longitudinal e comprimento do traçado, e o número e tipos de obras de transposições. Sabendo essas informações, já é possível excluir alguns traçados por comparação. Em efeito, um traçado de grande comprimento com um número elevado de obras de transposição complexas tipo elevador, será por exemplo muito mais caro que um traçado curto com poucas eclusas.

Na parte seguir foram apresentadas as diferentes alternativas de traçado consideradas para cada interligação, tentando explicar as considerações que permitiram dar cada solução.

b. Traçados selecionados

Nesta parte apresentaram-se os melhores traçados encontrados.

i. Interligação Araguaia-Paraguai

• Alternativa 1

A maior dificuldade foi contornar as altas colinas, minimizando as curvas. Optou-se pelo traçado apresentado nas Figuras 8 e 9, cujo perfil longitudinal está apresentado na Figura 10. Uma das grandes dificuldades foi a de que o perfil longitudinal do terreno obrigou a inserção de 3 eclusas na primeira curva, cujo raio de curvatura é de 1528m. Para poupar recursos e amortizar as despesas no tempo, foi previsto construir uma primeira série de eclusas simples permitindo anavegação. Posteriormente, com a consolidação do tráfego hidroviário, justificar-se-ia a construção de eclusas justapostas às primeiras, formando eclusas gêmeas, o que permitiria a passagem simultâneo de comboios “subindo” e de comboios “descendo”.

Recomenda-se um cuidado especial para escavar o canal, de tal forma que seja possível a construção das eclusas da segunda série próximo dos locais das da primeira série, como prever sobrelargura, etc. Este cuidado é válido para todas as eclusas de todas as alternativas do projeto.

Como já mencionado na concepção do projeto, nas curvas com o raio de curvatura abaixo de 10 vezes o comprimento do comboio, e com o ângulo específico β superior a 30° , uma sobrelargura deve ser adicionada à largura inicial no interior da curva do canal. (Formula de Graewe).

A alternativa 1 tem 3 curvas, com raios de curvatura de 1528m, 809m e 809m. Uma sobrelargura de 8,30 m deverá ser adicionada para as duas últimas curvas. Este traçado tem um trecho que necessita 36m de escavação, no Km 7,5, mas os demais trechos minimizam as escavações a fazer. Existe na proximidade um manancial de água, a menos de 2 quilômetros do traçado.

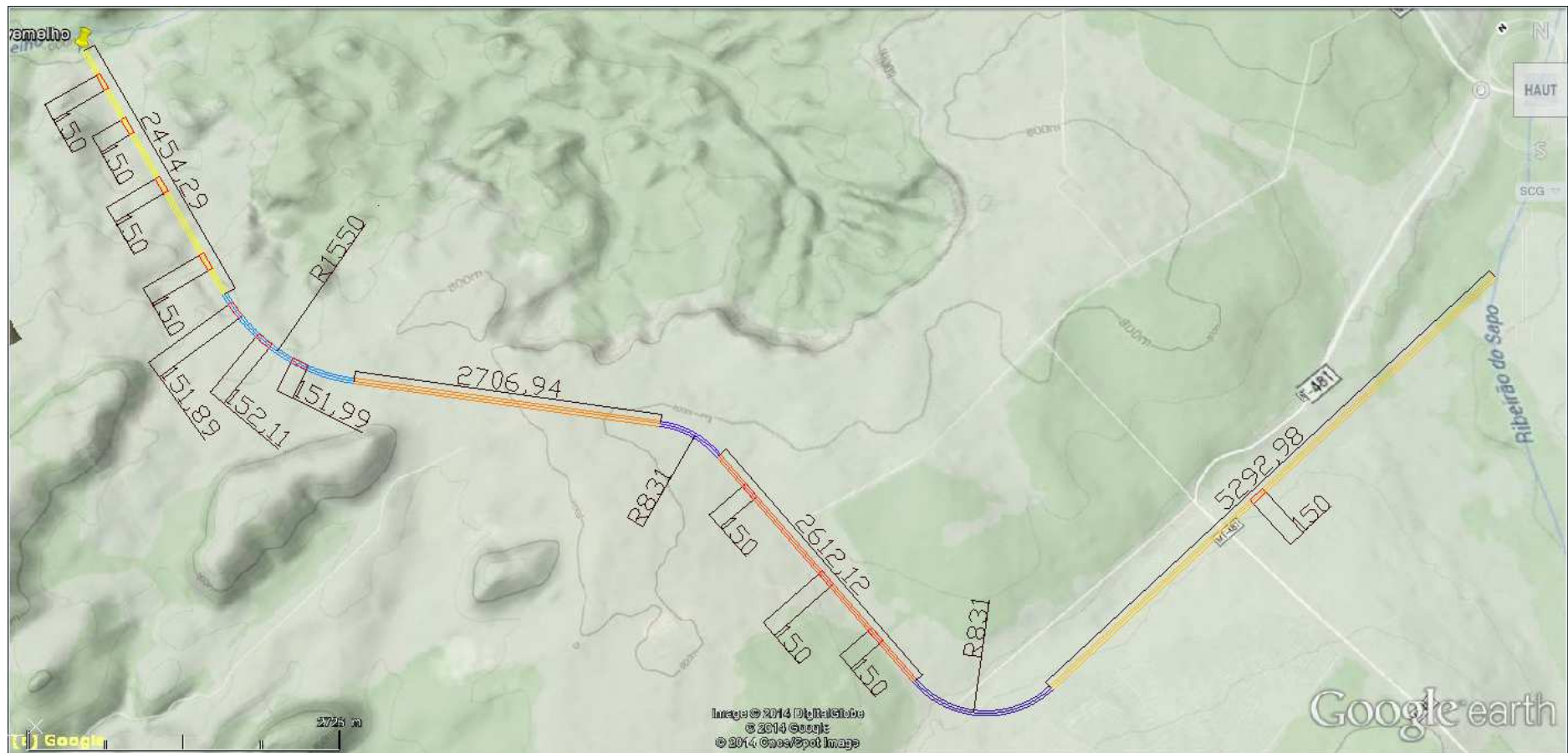


Figura 8: Traçado planimétrico da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai no AutoCAD com o a mapa do Google Earth e inserção no Google Earth

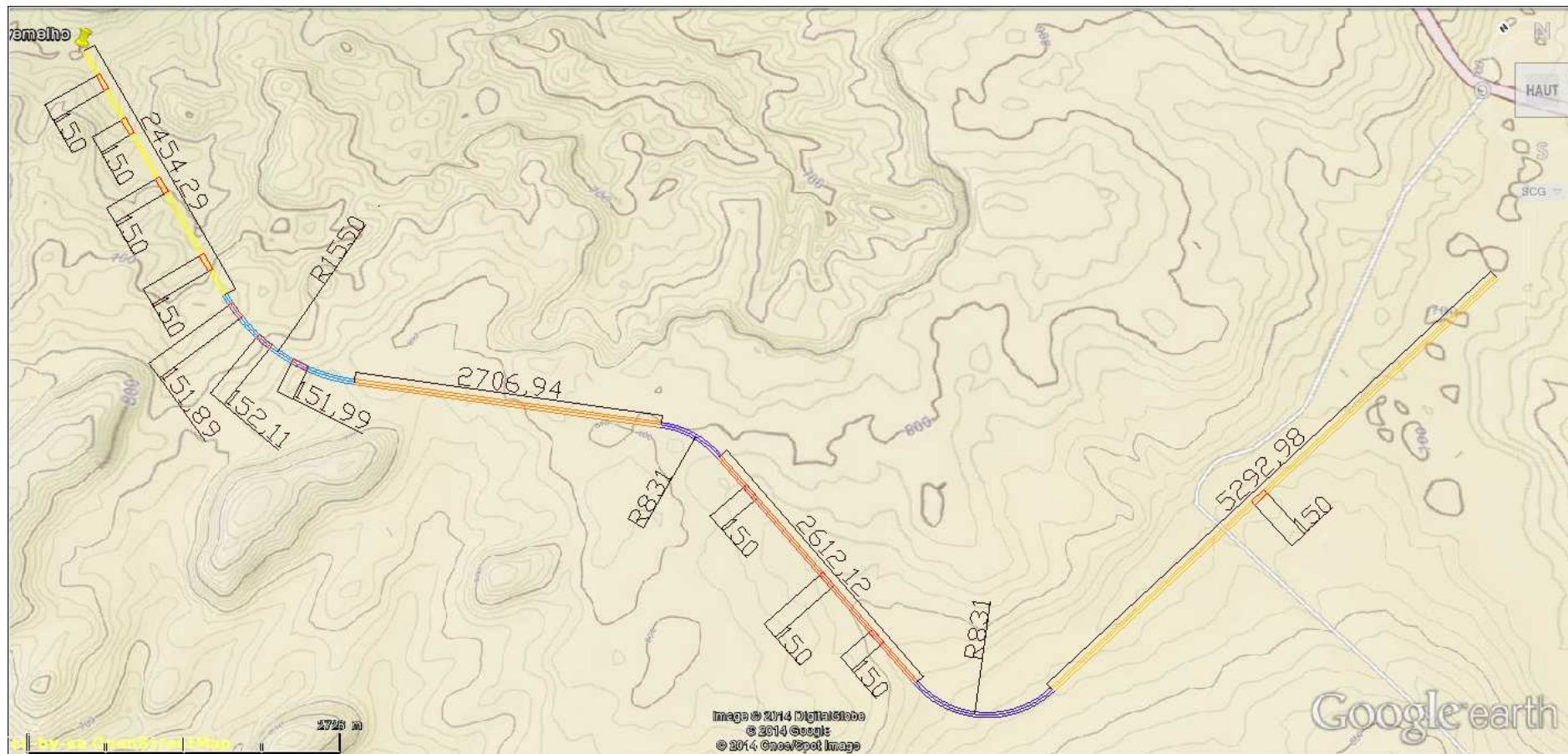


Figura 9: Traçado planimétrico da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai no AutoCAD com o a mapa do Google Earth e inserção no Google Earth.



Figura 10: Perfil longitudinal da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai

- Alternativa 2

A alternativa 2 obedece às mesmas regras do traçado da alternativa 1, ou seja minimizar o desnível encontrado e o número de curvas(Figuras 11 e 12).



Figura 11: Traçado da alternativa 2 de interligação Araguaia-Paraguai com AutoCAD com o mapa do Google Earth e inserção no Google Earth

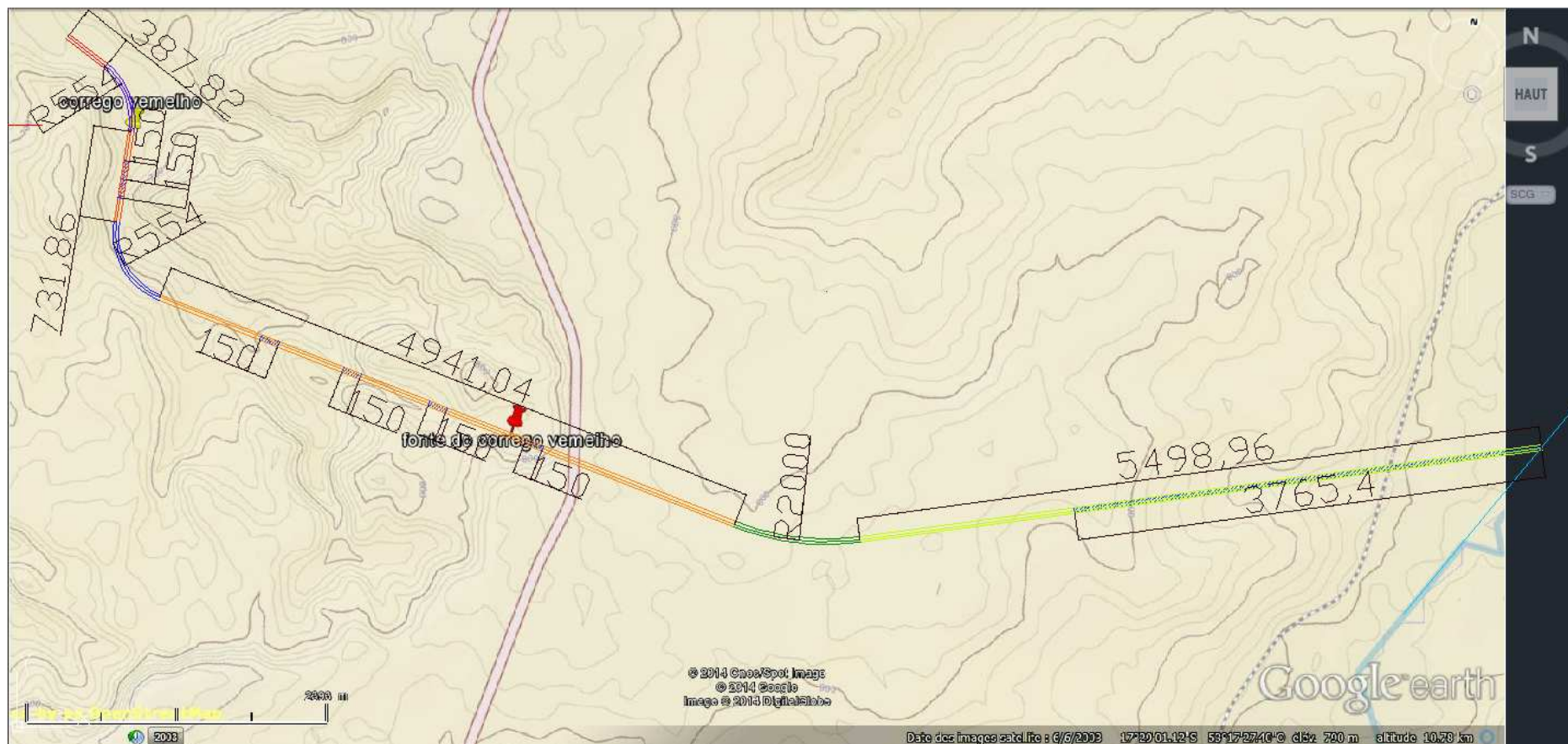


Figura 12: Traçado da alternativa 2 de interligação Araguaia-Paraguai com AutoCAD com o mapa do Google Earth e inserção no Google Earth



Figura 13: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligação Araguaia-Paraguai.

Este traçado consegue minimizar o número de obras de transposição com a construção de um elevador. A escavação máxima seria de 40m. Este traçado tem como vantagem ter um trecho de alinhamento retilíneo de 6,8 km, com uma declividade baixa, que permite a construção de um plano inclinado longitudinal. Este plano inclinado permite evitar a construção de uma escada de 6 eclusas que requereria escavações muito profundas.

A primeira parte do canal foi traçado no vale criado pelo córrego Vermelho. O vale é estreito e, conseqüentemente, as duas primeiras curvas do traçado têm raios de curvatura reduzidos, de 4 vezes o comprimento do comboio tipo. Este raio de curvatura é menor que os raios utilizados para as outras curvas do canal projetado, mas corresponde à recomendação da PIANC para um canal com pouco tráfego hidroviário. Neste trecho, uma sinalização específica deverá ser instalada (bóias, painéis, etc.) para advertir os comboios.

Para as duas primeiras curvas, uma sobrelargura de 12,62m deverá ser prevista. A terceira curva terá um raio de curvatura de 1978m, e não precisará de sobrelargura. A fonte de abastecimento de água dessa alternativa será a mesma mencionada na alternativa 1.

ii. Interligação Taquari-Prado

A interligação Taquari-Prado é de reduzidas dimensões, com comprimentos das alternativa 1 e 2 de 3,65 km e 4,54 km, no entanto não havia outras opções (Figuras 14 e 15).

- Alternativa 1

A alternativa 1 tem como vantagem necessitar a construção de um elevador apenas. As 3 curvas permitem evitar os relevos mais importante e permitem obter um perfil longitudinal muito específico, muito apropriado à construção de um elevador. A escavação máxima é de 25m. As 3 curvas têm um raio de curvatura de 809m, e um ângulo $\beta > 30^\circ$, portanto, conforme à Fórmula de Graewe, foi necessário adicionar uma sobrelargura de 8,30m no interior da curva, para facilitar a passagem dos comboios.

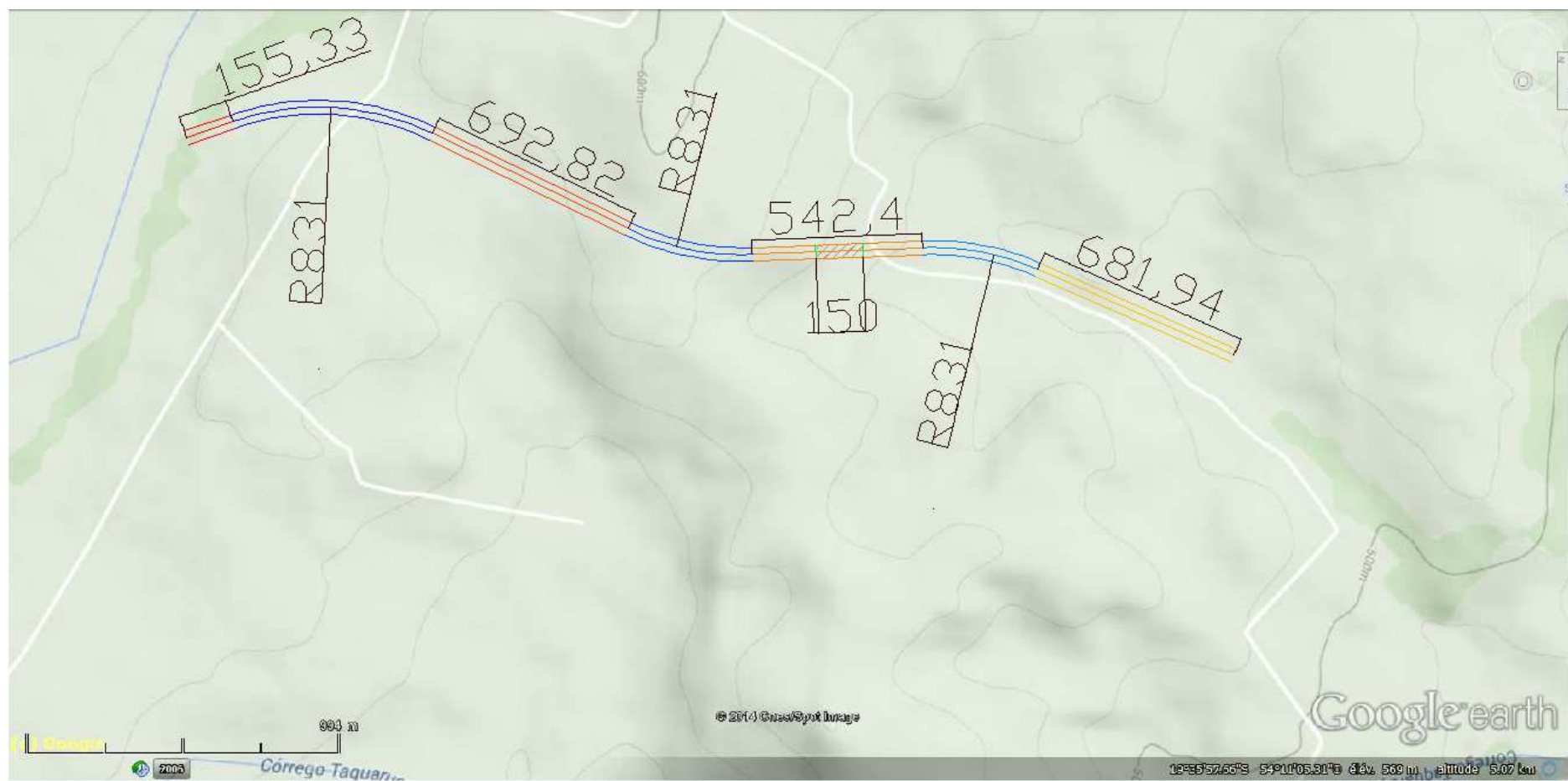


Figura 14: Traçado da alternativa 1 da interligação Taquari-Prado no AutoCAD com um mapa Google Earth



Figura 15: Traçado da alternativa 1 da interligação Taquari-Prado no AutoCAD com um mapa Google Earth



Figura 16: Perfil longitudinal da alternativa 1 da interligação Taquari-Prado.

- Alternativa 2

A alternativa 2 necessita da construção de 2 escadas de 2 eclusas de 15m cada uma (Figuras 17 e 18). Precisará de escavação de profundidades entre 5 e 20m. Tem duas curvas de raio de curvatura de 809m, com ângulos $\beta=109^\circ>30^\circ$ e $\beta=94^\circ>30^\circ$. Assim, 8,30 m de sobrelargura deverão ser adicionados ao canal nas regiões das curvas. Estas duas curvas permitem o contorno do relevo e minimizam o número de eclusas.

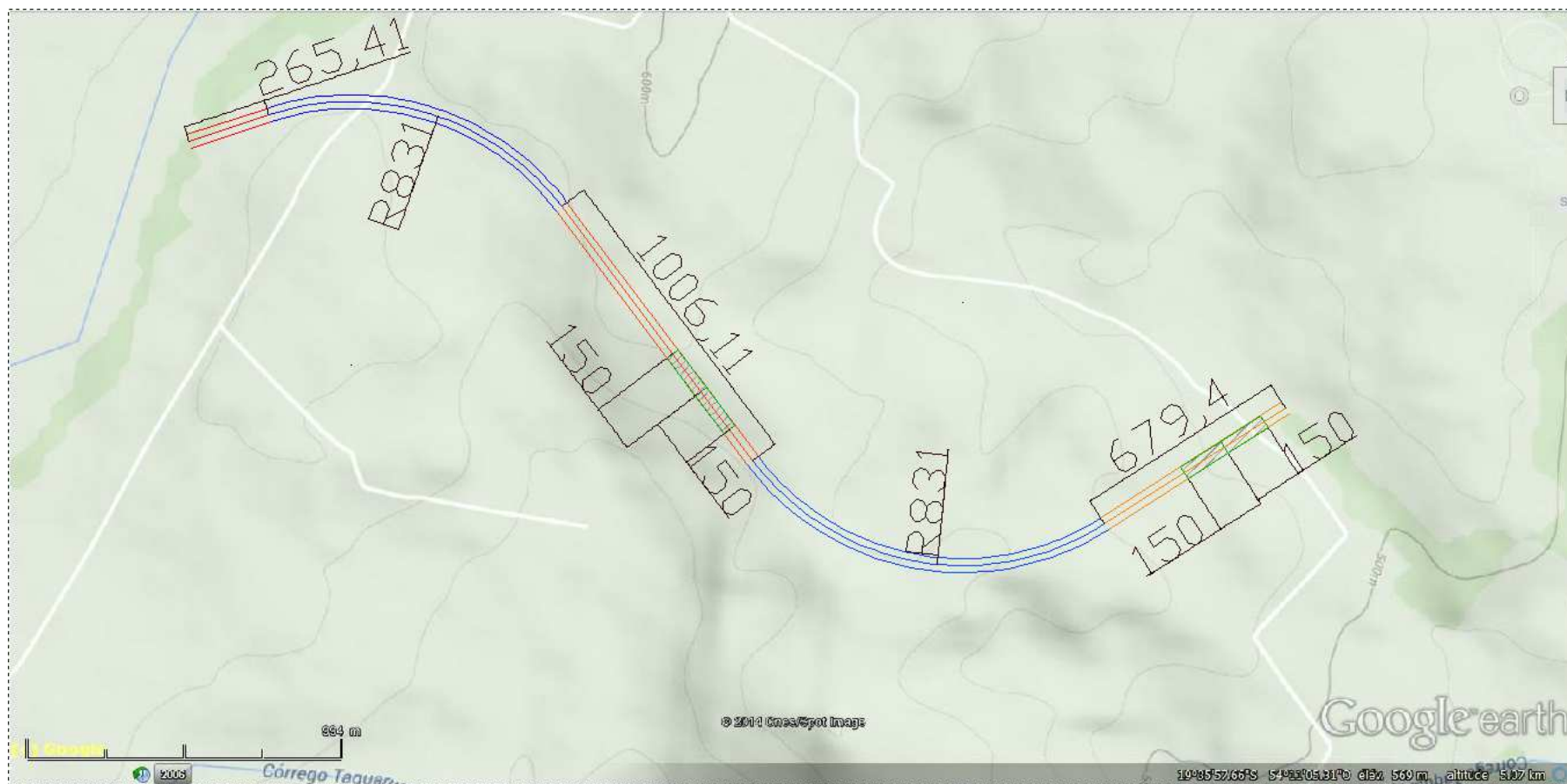


Figura 17: Traçado da alternativa 2 da interligação Taquari-Prado no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth



Figura 18: Traçado da alternativa 2 da interligação Taquari-Prado no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth



Figura 19: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligação Taquari-Prado.

Figura 20: Perfil longitudinal da alternativa 2 da interligação Taquari-Prado

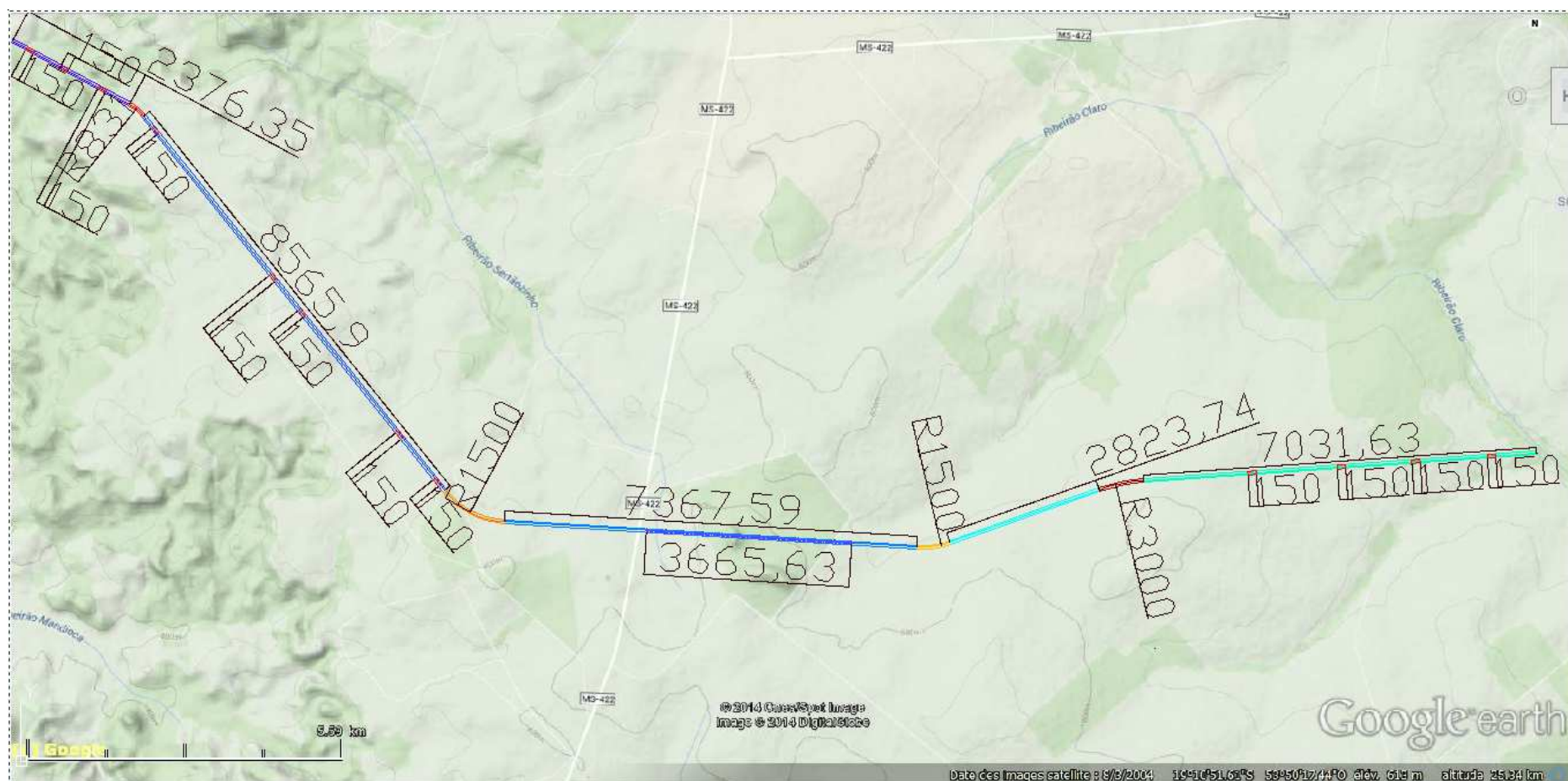


Figura 21: Traçado da interligação Taquari-Rio Verde no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth.

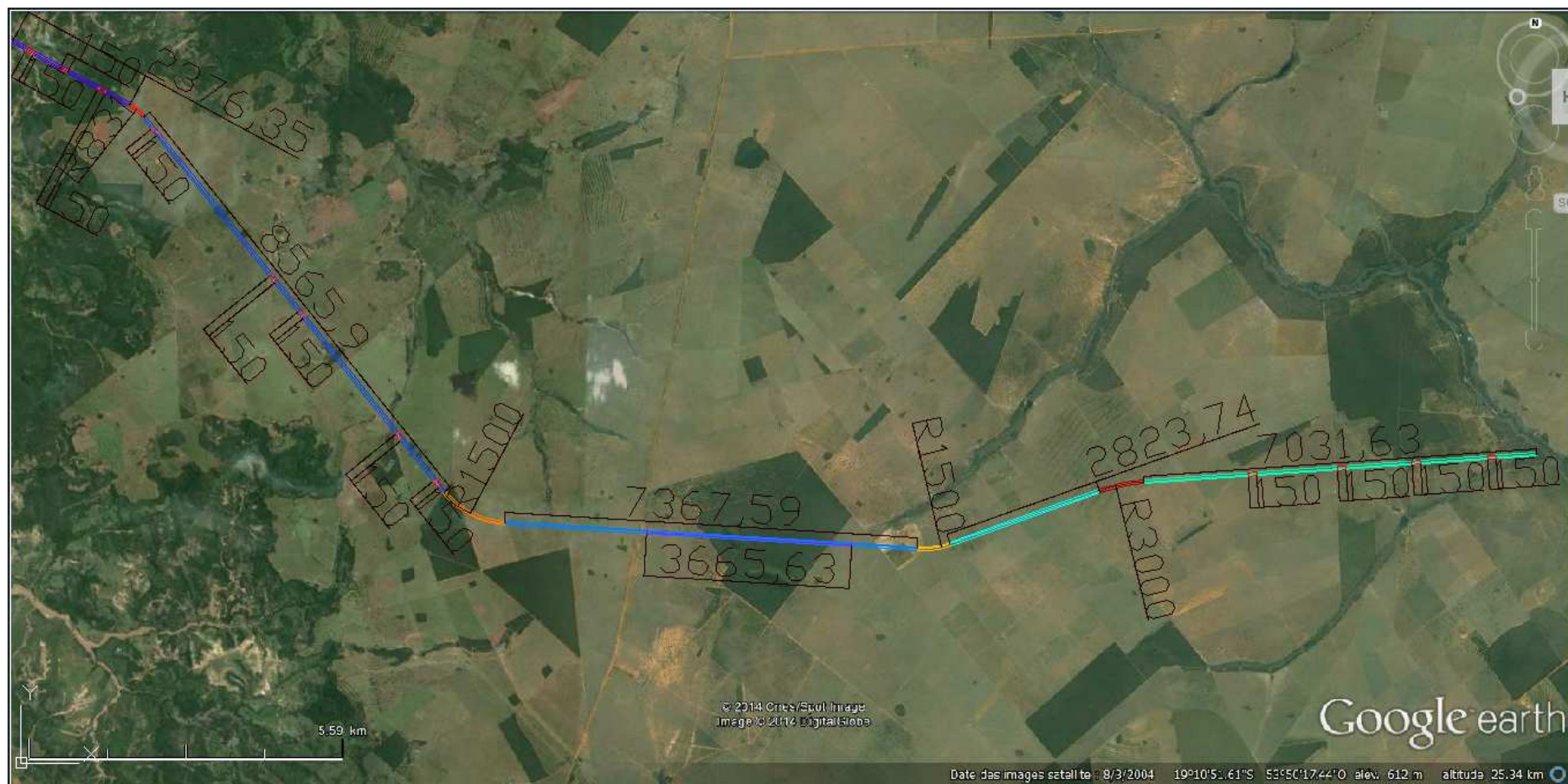


Figura 22: Traçado da interligação Taquari-Rio Verde no AutoCAD com uma mapa Google Earth e inserção no Google Earth

II.3. Dimensionamento da seção transversal do canal

II.3.1. Escolha da embarcação tipo

Para dimensionar os canais, escolheu-se como embarcação tipo o comboio Tietê, formado por grupo de chatas em linha juntamente com um empurrador. Na tabela 6 seguem dimensões resumidas.

Comboio Tipo Tietê	
Comprimento Total (L_{OA})	138,5 m
Boca (B_c)	11,0 m
Calado (T)	2,7 m
Pé de Piloto	0,3 m

Tabela 6: Dimensões da embarcação tipo

Essa embarcação tipo foi selecionada porque os canais serão interligados com rios de largura reduzida, como, por exemplo, o Rio Vermelho, que será ligado com o Rio Araguaia. Portanto, para permitir a navegação nesses rios, a embarcação tipo não pode ter uma boca muito grande.

II.3.2. Dimensionamento da seção transversal

O dimensionamento da largura do canal de projeto foi feita com base nas normas PIANC (1997). Essas normas foram estabelecidas para canais de acesso portuário, mas são geralmente utilizadas para as hidrovias do Brasil. Foram escolhidos canais de mão dupla, para que houvesse concordância com a navegação atual do Paraná-Tietê.

A largura do canal depende de vários fatores, tais como a manobrabilidade, fatores ambientais, a folga com as margens e a distância de passagem para reduzir as interações hidrodinâmicas entre os navios. Esses fatores são resumidos na tabela 7, bem como a sobrelargura requerida para cada um deles.

Fatores	Observações	Coef.
Manobrabilidade	moderada	1,5
Velocidade do navio	moderada	0
Ventos transversais	fraco	0
Correntes	/	0
Ondas	/	0
Auxílios à navegação	bom	0,1
Superfície do fundo	$< 1,5 \cdot T$ e lisa e macia	0,1
Profundidade do canal	$> 1,15 \cdot T$ e $< 1,5 \cdot T$	0,2
Periculosidade da carga	baixa	0
Intensidade de tráfego	moderada : 1-3/hora	0
Folga com a margem	Taludada, bancos de areia	1
Largura para canais com cruzamento	velocidade moderada	1,4
	densidade moderada de tráfego	0,2
	TOTAL	4,5

Tabela 7: Determinação da largura da seção transversal

Portanto a largura do canal é igual à $B = 4,5 \times B = 49,5\text{m}$.

Adotou-se uma folga mínima sob a quilha de $f = 1\text{ m}$, considerando assim o pé de piloto do comboio tipo somado a uma altura de segurança. Portanto, a altura da lâmina de água é $h = f + C = 1 + 2,7 = 3,7\text{ m}$.

Como nessa região o solo é mais arenoso que argiloso, o risco de ruptura das margens é mais elevado. Portanto, para melhorar a estabilidade das margens, a inclinação deve ser muito suave. Assim, consideraram-se margens com uma inclinação 1V:2H.

A largura da linha de água é $B_s = B + 2mh = 64,3\text{ m}$.

Deve-se garantir que a seção transversal estabelecida não seja afetada pelo efeito pistão (para evitar perda de rendimento propulsivo da embarcação). A seguinte condição deve ser obedecida:

$$A_{\text{seção transversal molhada do canal}} \geq 10 \cdot A_{\text{seção mestra da embarcação}}$$

$$A_{\text{seção transversal molhada do canal}} = \frac{(B_s + B)h}{2} = 210,5\text{ m}^2 \text{ e } A_{\text{seção mestra da embarcação}} = 0,9 B_c \cdot T = 26,7\text{ m}^2$$

A seção transversal do canal oferece o efeito pistão, portanto, deve-se aumentar a área da seção transversal. Por esta razão, a altura da lâmina também deverá ser aumentada.

Escolhendo $h = 4,6\text{ m}$, tem-se que $A_{\text{seção transversal molhada do canal}} = 270\text{ m}^2$. A nova seção transversal elimina o efeito pistão.

A tabela abaixo resume as dimensões do canal:

Largura B	49,5 m
Largura B_s	67,9 m
Altura da lamina de água h	4,6 m
Inclinação das margens	1V:2H

Tabela 8: Dimensões da seção transversal

II.3.3 Considerações sobre a profundidade: relação velocidade/calado

A resistência hidrodinâmica ao movimento de uma embarcação em águas rasas é regida pelo Número Froude de Profundidade F_{nh} , definido como:

$$F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

em que:

h: lâmina d'água tranqüila (m)

$$\left\{ \begin{array}{l} V: \text{velocidade da embarcação relativa à água (m/s)} \\ g: \text{aceleração da gravidade } (\sim 9,81 \text{ m/s}^2) \end{array} \right.$$

Quando F_{nh} aproxima-se ou se iguala à unidade, a resistência ao movimento atinge valores muito altos, que embarcações de maior deslocamento não têm potência suficiente para superar. De fato, é improvável que tais embarcações sejam capazes de superar valores de F_{nh} de 0,6 ou 0,7, sendo o primeiro valor para embarcações tanque e o segundo, para embarcações conteneiras, os quais constituem verdadeiras barreiras à velocidade.

Considerando F_{nh} máximo de 0,7, obteve-se uma velocidade máxima de 9,1 nós, isto é, uma velocidade moderada de tráfego, como foi considerado no dimensionamento da seção transversal.

II.3.4 Estabilidade das margens

Uma vez estabelecidas as dimensões do canal de projeto, é necessário estudar a estabilidade dessa seção transversal. Como a declividade dos canais é nula, não existe tensão de arraste no fundo e nas margens. Em consequência disso, o único fator de instabilidade a levar em conta é a ruptura de talude nas margens (escorregamento).

Essa estabilidade foi estudada pelo método do Bishop (ruptura circular). Porém, a primeira etapa foi pesquisar sobre a formação geológica dos locais de implantação dos canais, para estimar os parâmetros mecânicos necessários para os cálculos de estabilidade.

II.3.5 Geologia

Para conhecer os tipos de solos das regiões estudadas, foram efetuadas pesquisas nos mapas geológicos estaduais executados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A seguir foram descritas as formações geológicas nas zonas de implantação dos canais.

a. Interligação Rio Araguaia – Paraguai

O solo é uma formação Botucatu do grupo São Bento. Há principalmente arenitos eólicos de cores avermelhada, amarela e arroxeada, tamanhos finos a médios. Além de quartzosos localmente feldspáticos e conglomeráticos, os grãos são arredondados e a estratificação é eólica cruzada.

b. Interligação Rio Pontinha – Rio Verde:

O solo pertence ao grupo Bauru, com formações Santo Anastácio e Caiuá. As duas formações são parecidas, compostas com arenito fino a médio, arenito quartzoso a subarcoseano, lentes de arenito siltítico-argiloso, brecha sedimentar e arenito conglomerático e conglomerado.

c. Interligação Rio Taquaruçu – Rio Capim-Branco:

Encontram-se dois tipos de solos nessa área. O primeiro é uma formação Bauru, com conglomerados, arenitos quartzosos, arenitos calcíferos, siltitos, e níveis de sílex e de calcários. O

segundo é uma formação Serra Geral do grupo São Bento, com basalto e basalto andesito de filiação thol elítica, riolito e riolito. Intercala camadas de arenito, litarenito e arenito vulcânico.

Foi efetuada uma pesquisa na literatura especializada para estimar os valores dos parâmetros mecânicos necessários para aplicar o método do Bishop: a densidade d , a coesão c e o ângulo de atrito Φ .

Pode-se considerar que a maioria dos solos são compostos principalmente de arenitos, sendo estas rochas lapidificadas constituídas por areias aglutinadas por um cimento natural.

Lobo ET AL. (2003) resume os parâmetros geotécnicos médios para o arenito do grupo Bauru. Por falta de dados mais precisos sobre as diferentes formações do grupo Bauru, foram adotados esses parâmetros para todas as formações do grupo Bauru encontradas no projeto. A tabela 9 fornece tais valores médios.

Massa específica do solo (kg/m^3)	1770
Coesão (kPa)	14
Ângulo de atrito ($^\circ$)	30

Tabela 9: Parâmetros geotécnicos do solo Bauru

Ferreira (1998) estudou um solo residual de arenito da formação Botucatu e realizou vários ensaios de laboratório para conhecer os índices físicos e os parâmetros mecânicos desse solo. Os valores médios estão resumidos na tabela 10:

Massa específica do solo (kg/m^3)	1810
Coesão (kPa)	36
Ângulo de atrito ($^\circ$)	40

Tabela 10: Parâmetros geotécnicos do solo Botucatu

Encontrou-se maior dificuldade em localizar os parâmetros para a formação de basalto Serra Geral, porque não é possível conhecer o estado das formações rochosas sem uma visita ao local. Conseqüentemente, vários estudos dessa formação destacam uma camada superficial do terreno, constituída de solo residual originado da ação do intemperismo sobre os derrames de basalto. Essa camada, que pode atingir 30 metros de profundidade, muitas vezes é composta de colúvios ou solos residuais argilosos e siltosos.

Para este projeto foram considerados os parâmetros obtidos por Soares (2001), uma vez que houve ensaios de cisalhamento direto em colúvios constituídos por blocos de basalto da Formação Serra Geral.

Massa específica do solo (kg/m^3)	1900
Coesão (kPa)	25
Ângulo de atrito ($^\circ$)	28

Tabela 11: Parâmetros geotécnicos do solo Serra Geral

II.3.6 Análise da estabilidade

a. Método do Bishop

Esse método é baseado no conceito de *equilíbrio-limite*: conhecendo as forças atuantes, são determinadas através das equações de equilíbrio as tensões de cisalhamento induzidas, para serem comparadas com a resistência ao cisalhamento do solo.

As hipóteses desse método são as seguintes:

- A linha de ruptura é circular;
- O solo se comporta como material rígido-plástico;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura;
- O coeficiente de segurança F (relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e a tensão cisalhante atuante) é constante ao longo da linha de ruptura.

Basicamente, a massa de solo é subdividida em lamelas e o equilíbrio das forças atuantes (peso da lamela, pressões neutras e reações das lamelas vizinhas) é feito na direção vertical para cada lamela. O coeficiente de segurança F é calculado com um processo iterativo.

A segunda etapa é pesquisar a posição do círculo crítico, ou seja, achar o arco ao qual está associado o coeficiente F mínimo. Define-se uma malha de centros possíveis, impõe-se condições (raios ou círculos passando por um ponto...) e calcula-se o valor de F para cada centro. O menor valor de F dá a posição do círculo crítico.

A tabela 12 define as classes de cada intervalo de fator de segurança F_s , considerando F_s de estabilidade igual a 1,5. Essa tabela foi estabelecida para os taludes de rodovia brasileira (DNER, 1996). Portanto, verifica-se que os fatores dos taludes dos canais sejam superiores a esse valor.

Intervalos de F_s	Classes	Diagnóstico
$0 < F_s < 1$	1	Instabilidade
$1 \leq F_s < 1,5$	2	
$1,5 \leq F_s < 2$	3	Estabilidade crítica
$2 \leq F_s < 3$	4	Boa estabilidade
$3 \leq F_s < 4$	5	Alta estabilidade
$4 \leq F_s < 5$	6	Excelente estabilidade
$5 \leq F_s < 8$	7	
$8 \leq F_s < 10$	8	
$F_s \geq 10$	9	

Tabela 12: Fatores de segurança para a estabilidade de taludes

b. Resultados

Esses cálculos podem ser efetuados com um software adequado. Neste estudo será utilizado o software GeoSlope 2007 (desenvolvido pela Geo-Studio International Ltda.) para calcular o coeficiente de segurança mínimo dos taludes do canal para cada solo encontrado.

Por simetria do canal, os cálculos foram feitos para uma margem só. Os resultados obtidos para os diferentes solos são detalhados a seguir.

Para o solo de arenito da formação Botucatu obteve-se um coeficiente de segurança mínimo $F_s=1,88$ (Figura 23). De acordo com a tabela 12, pode-se considerar que a estabilidade dos taludes é boa. Portanto, não há necessidade de obras de proteção de margem.

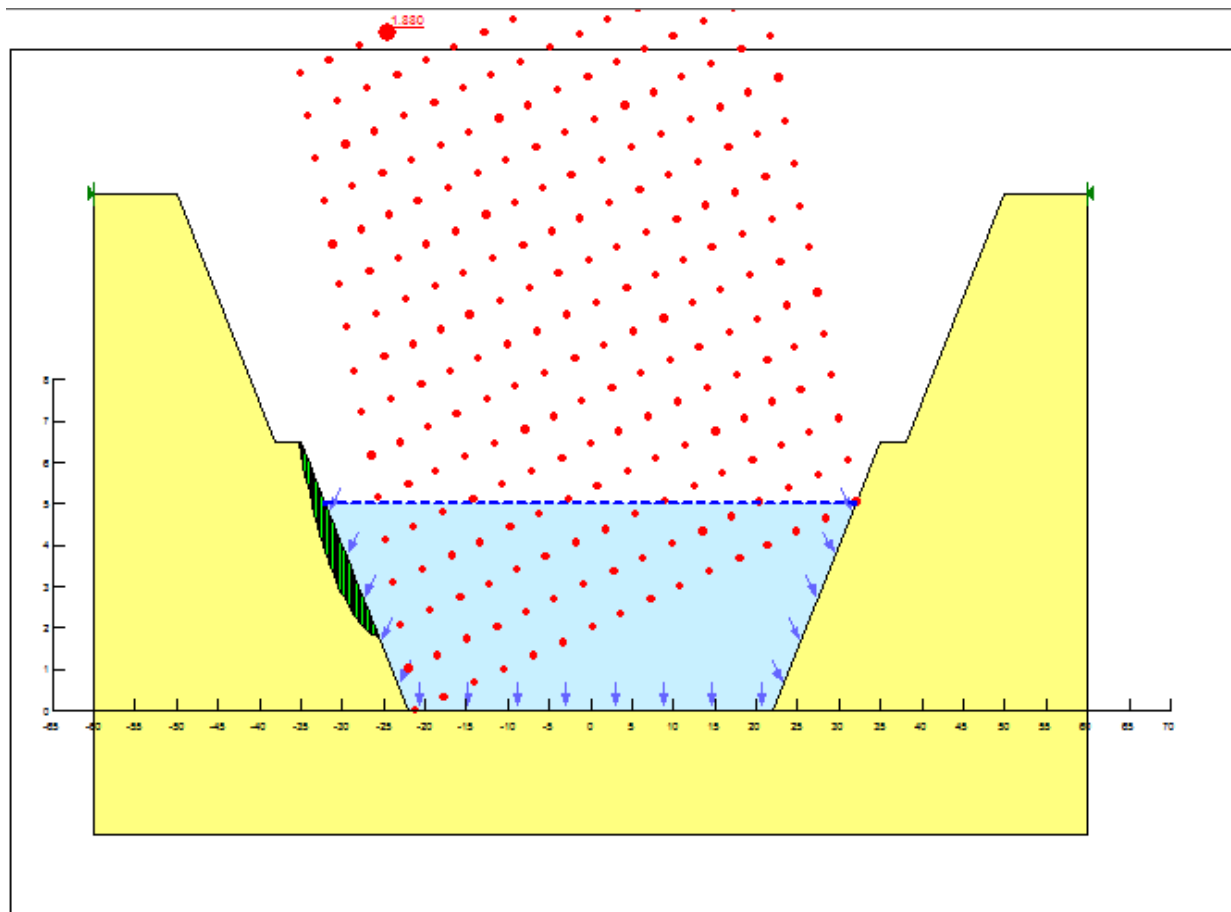


Figura 23: Arenito Botucatu.

Para o solo de arenito da formação Bauru obteve-se um coeficiente de segurança mínimo $F_s=1,26$ (Figura 24). Logo, há um risco de instabilidade das margens.

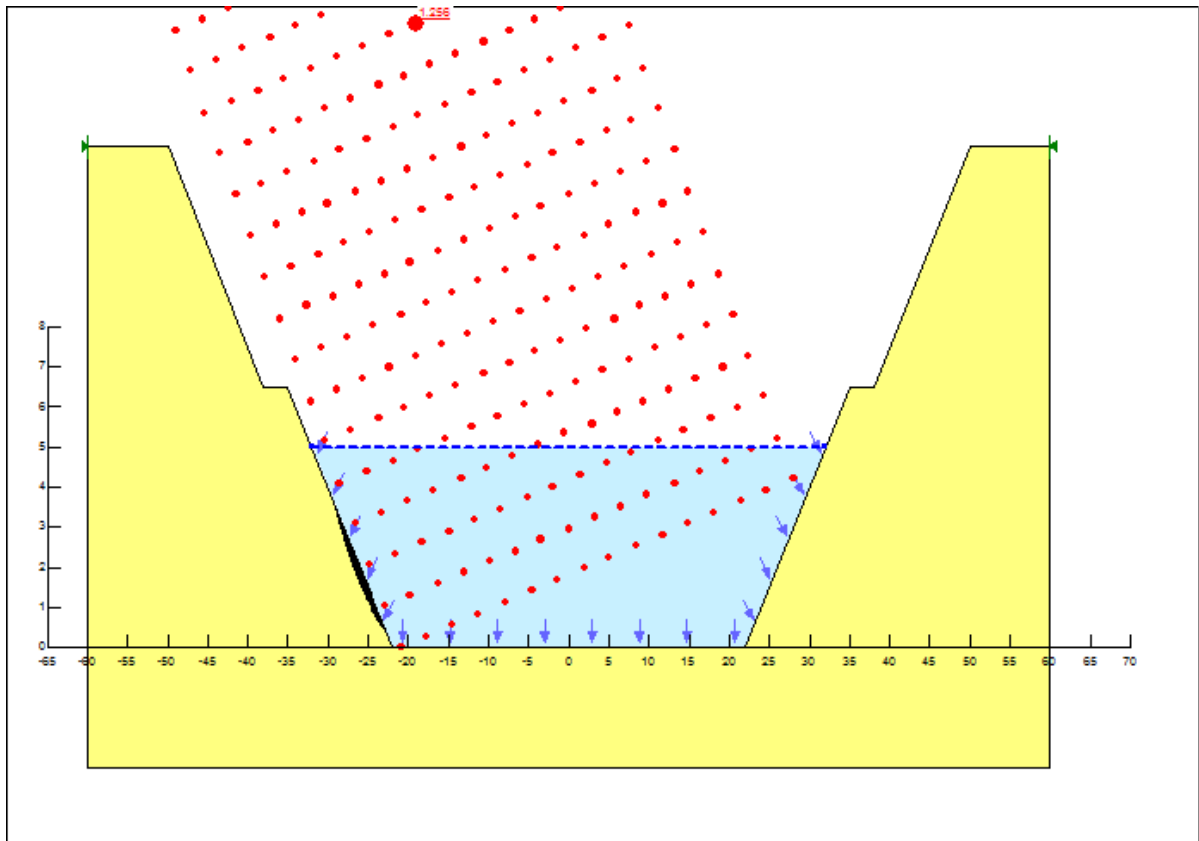


Figura 24: Arenito Bauru.

Para melhorar a estabilidade várias soluções foram estudadas. A primeira opção foi considerar a colocação de uma berma no pé do talude (Figura 25), porém o fator de segurança manteve-se baixo, igual a 1,29. Portanto, esta solução não é aceitável.

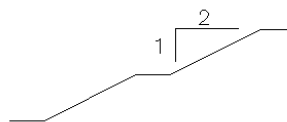


Figura 25: Inserção de uma berma no talude do canal.

A segunda alternativa foi um retaludamento do canal, considerando uma inclinação das margens de 1V:3H ao invés de 1V:2H (Figura 26). Essa mudança leva a um fator de segurança $F_s=1,88$. Nesse caso, as margens podem ser consideradas estáveis.

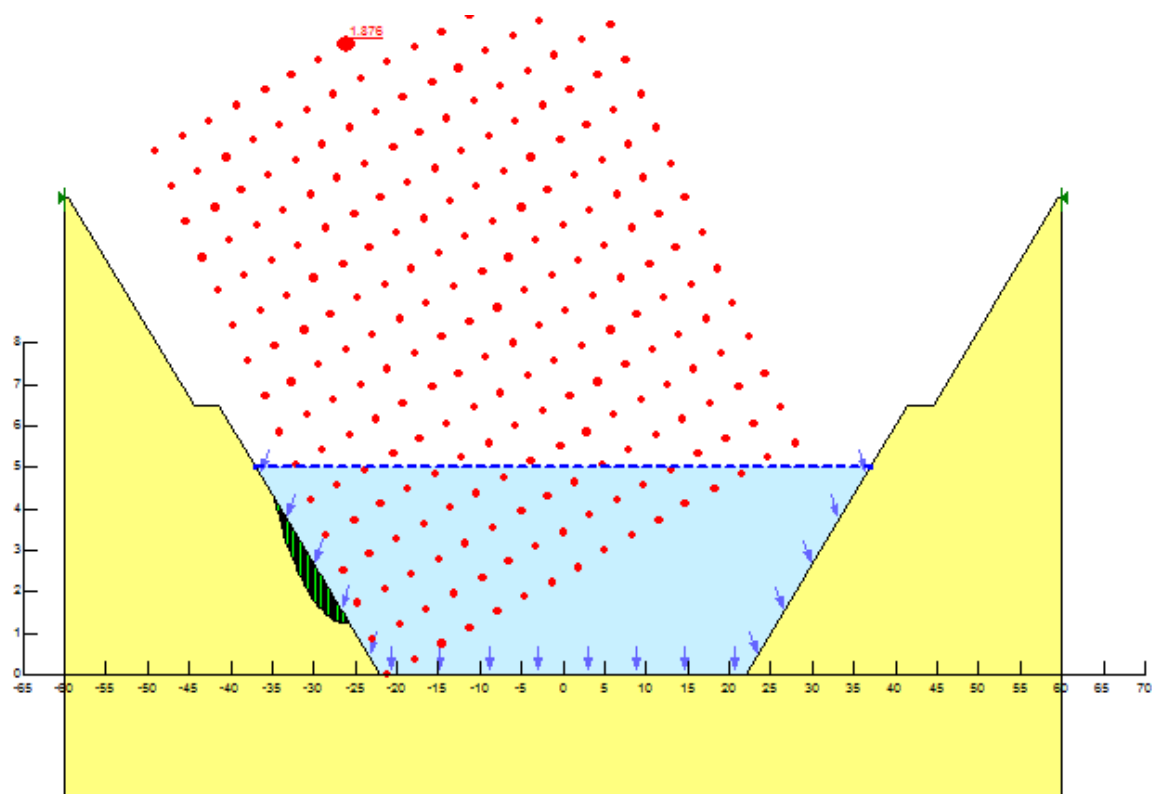


Figura 26: Arenito Bauru, margens estáveis.

O solo de basalto da formação Serra Geral também leva a margens instáveis com um fator de segurança mínimo igual a 1,20(Figura 27). O estudo com um talude de inclinação 1V:3H permite ter uma estabilidade aceitável com $F_s = 1,76$ (Figura 28).

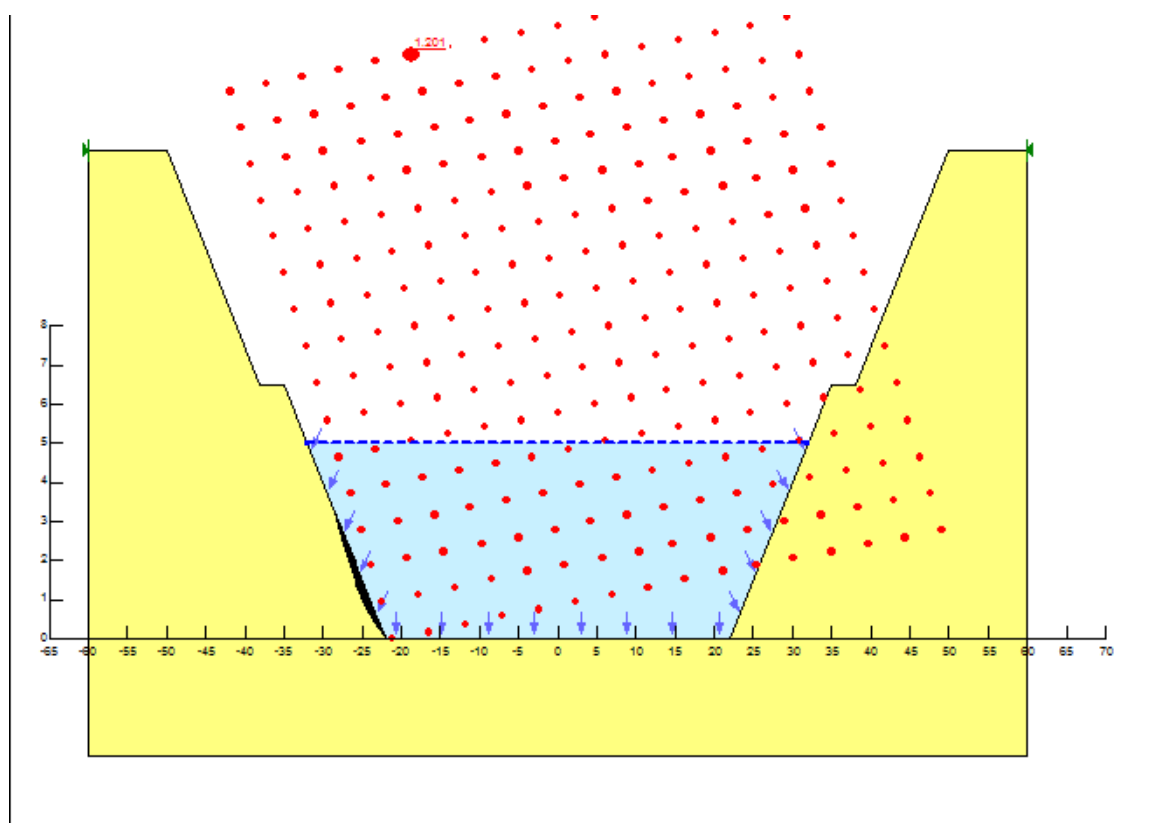


Figura 27: Basalto Serra Geral (instável)

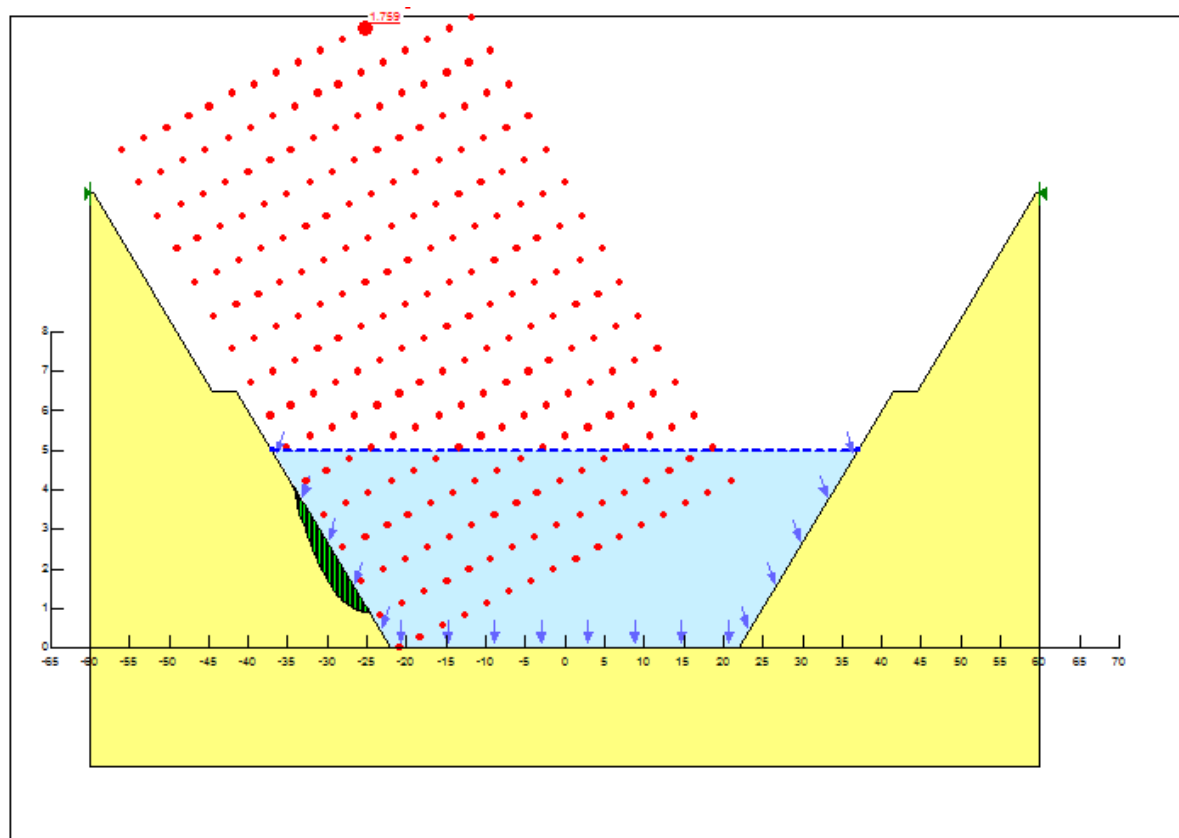


Figura 28: basalto Serra Geral (estável).

Na nova seção transversal (inclinação 1V:3H para as ligações Taquari-Prado e Taquari-Verde) obteve-se uma largura de linha de água de 79,5 m ao invés de 69,5m (seção Transversal 1V:2H) .

A borda livre adotada foi de 1,9 m (altura total de 6,5m) e a largura do caminho de serviço é de 3m. As duas seções transversais do projeto estão nas Figuras 29 e 30.

Em todos os casos será necessário considerar um sistema de drenagem eficiente nas margens para reduzir as pressões neutras no solo e melhorar, assim, a estabilidade.

Além disso, apenas pelo fato de ter coeficientes de segurança bons para a estabilidade das margens, seria necessário considerar um tipo de proteção contra as ondas geradas pelas embarcações e pelo efeito dos hélices.

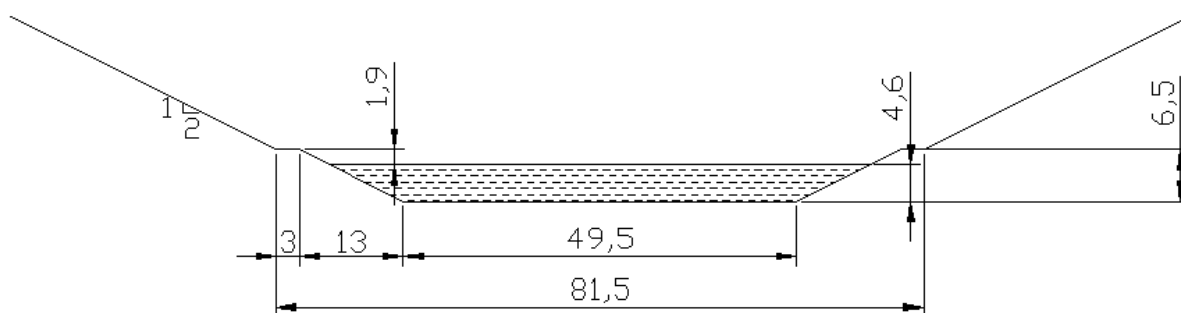


Figura 29: Seção transversal 1V:2H

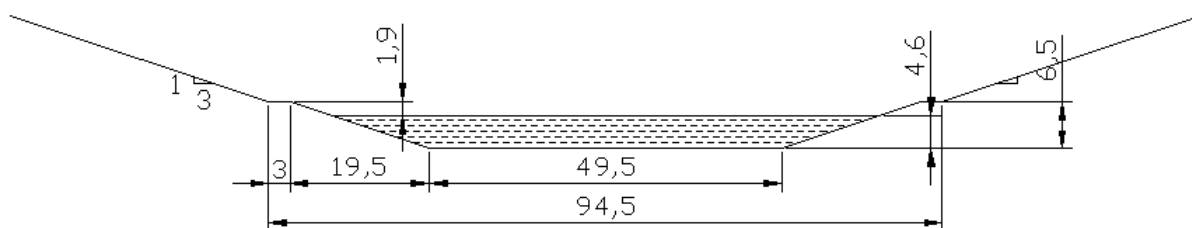


Figura 30: Seção transversal 1V:3H.

II. Análise e orçamento

III.1. Soluções para cruzamento de estradas

O planejamento de um canal é um trabalho complexo e minucioso, devido ao número de parâmetros a levar em conta. A topografia, a natureza dos solos, as fontes de abastecimento de água, o custo de escavação do canal e de instalação das infraestruturas, etc. Os obstáculos são vários, e o projetista tem que escolher o melhor compromisso que permita atingir os objetivos, sabendo que ele sempre terá que escolher entre várias alternativas, que tem vantagens e desvantagens.

Ao estabelecer o traçado surge o problema das travessias que interferem com o canal. Os grandes obstáculos topográficos, como montanhas, geralmente são contornados, mas outros não podem ser evitados. No caso de cruzamento do canal com estradas, por exemplo, o projetista tem duas soluções se o traçado do canal foi estabelecido. A primeira opção é a de desviar a estrada, ou seja encontrar um traçado alternativo. Para essa opção, tem que se levar em conta o tempo de trajeto dos veículos, o gabarito e peso dos veículos e a construção de obras de arte para evitar possíveis obstáculos. Esta solução pode se revelar ser muito trabalhosa e, conseqüentemente, muito cara. Nem sempre é possível. A segunda opção, geralmente mais simples, é a de cruzar diretamente o canal por meio de uma ponte-canal se a estrada passa sob o canal, ou por meio de uma ponte clássica, se o canal passa sob a estrada. Nesta parte discorre-se sobre as diferentes opções de travessias e fazer a aplicação ao projeto, já que há várias situações destas no projeto.

III.1.1. Alternativa 1: Ponte-canal

A ponte-canal, ou aqueduto é alternativa utilizada quando o nível do canal projetado está acima do nível do terreno. Neste caso, o nível da estrada fica abaixo do canal projetado, como mostrado na Figura 31. Este caso geralmente ocorre quando existe uma variação topográfica negativo no nível do terreno, por exemplo um vale.

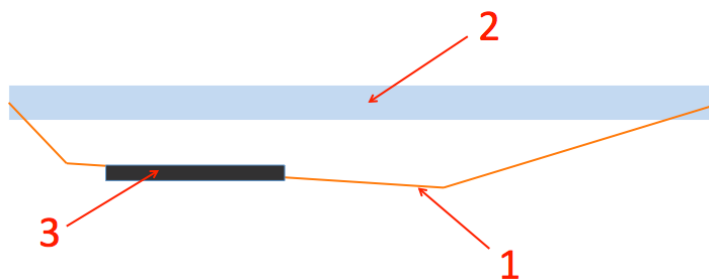


Figura 31: Elevação longitudinal mostrando travessia do canal projetado em comparação ao solo(1) e a uma estrada (3).
Caso favorável a uma ponte-canal(2)

A solução consiste em construir uma ponte para prolongar o canal acima do vale. Essa solução é possível para vales de larguras inferiores a 1000m. Com efeito, esta estrutura deve resistir

à carga do peso da água e deve ser perfeitamente estanque, o que dificulta a realização de obras de grande porte, como mostrado na Figura 32.

Para grande rebaixamento na cota do terreno, obras de transposição podem ser construídas para respeitar o traçado do canal, ou é possível desviar o canal para evitar esta zona.

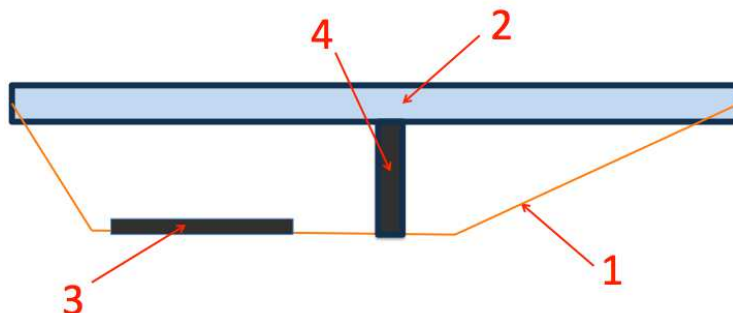


Figura 32: Elevação longitudinal de uma ponte-canal longa (2, 4) para travessia sobre uma estrada (3) e um canal (1).

A ponte-canal permite às embarcações passar acima da estrada, podendo necessitar a modificação de um trecho da estrada, para rebaixar a cota, porque a ponte-canal tem que ser horizontal.

As vantagens de uma ponte-canal é que permite atravessar uma depressão sem desviar o traçado do canal.

Ao mesmo tempo, a ponte-canal tem algumas desvantagens, pois é uma obra que necessita de muita manutenção para garantia de condições de uso com segurança ótima, e água precisa ser removida para a inspeção da estrutura periodicamente. Essas interrupções de operação dos canais, que ocorrem geralmente a cada cinco anos, ocasionam prejuízos econômicos, já que a circulação dos barcos é interrompida. A ponte-canal precisa de estruturas de apoio, para permitir fechar o canal e tirar a água para manutenção (ver Figura 33).



Figura 33: A esquerda a inspeção da ponte-canal de Briare (França) e à direita colocação de uma manta para estanqueidade da ponte-canal de Cacor (França)

Devido ao alto peso dessas estruturas, as fundações precisam ser muito resistente e muito profundas se as características de resistência do solo for fraca.

Existem vários tipos de construção de pontes-canais. As pontes-canais mais antigas eram feitas em alvenaria, mas as construções contemporâneas são pontes metálicas ou de concreto armado (ver Figuras 34 e 35).

Um material utilizado até hoje é o aço, que tem boas propriedades: módulo de elasticidade entre 290 a 460 MPa, resistência à tração de 450 a 600 MPa, e um limite de alongamento de 15% a 20%. Sua principal desvantagem é a sensibilidade à corrosão, exigindo proteção catódica.

Atualmente, o concreto armado é muito utilizado. Um exemplo famoso é a ponte-canal do Sart, que está na mesma via navegável que o elevador Strépy-Thieu. Suas dimensões são impressionantes: 498m de comprimento, 46m de largura, para uma carga de água que ultrapassa 80 000 t. O concreto tem como vantagem a grande resistência à compressão e uma resistência maior à corrosão do que o aço. Para o projeto, conhecendo as dimensões do canal, o material empregado foi o concreto.



Figura 34: Ponte-canal metálica dos Herbettes (França)



Figura 35: Ponte-canal de concreto armado do Sart (Bélgica).

III.1.2. Alternativa 2: Ponte rodoviária

Esta alternativa é utilizada quando o nível final d'água no canal está abaixo do nível do terreno, ou não muito mais elevado (Figura 36). Neste caso, a cota da estrada (sem as obras de travessia) situa-se aproximadamente acima do canal projetado, como na Figura 29. Neste caso, é mais simples construir uma ponte rodoviária, ou seja uma ponte que permita a passagem da estrada acima do canal.

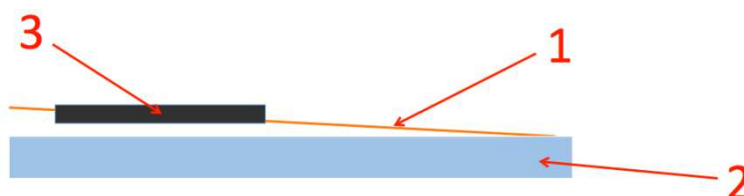


Figura 36: Configuração para a construção de uma ponte rodoviária (3) sobre um canal (2).

A solução da ponte rodoviária prescinde de uma modificação da estrada bem antes e depois da travessia com o canal, para dar a ela a cota necessária ao cruzamento com o canal mantendo uma declividade razoável, bem como garantindo o calado aéreo necessário para a embarcação tipo (Figura 37).

Uma ponte rodoviária tem várias vantagens, comparativamente com as pontes canais. As cargas permanentes são bem menores, e as fundações podem ser de menor envergadura. O processo de construção dessas obras de pequeno a médio porte são muito bem conhecidas pelas empresas de construção civil. A manutenção é mais fácil e muito mais barata, já que se consegue construir pontes de concreto armado previstas para funcionar sem intervenções de manutenção importante durante 100 anos, como, por exemplo, o viaduto de Millau na França, que é uma obra de grande porte. Neste projeto, as pontes rodoviárias deverão permitir cruzar o canal de 76 m de largura com inclinação das margens de 1V:2H e 89m com uma inclinação 1V:3H. A recomendação do PNVNI, 1989 para gabarito IV especifica um tirante de ar de 7m mínimo entre a ponte e o nível d'água.

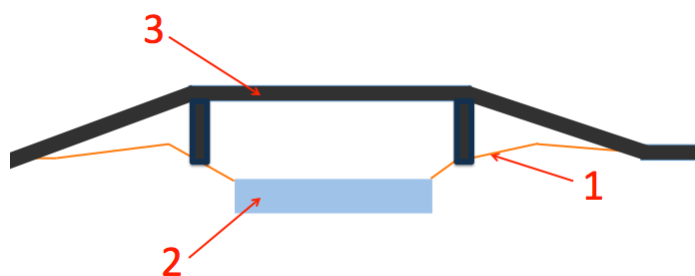


Figura 37: Representação esquemática da travessia de um canal (2) por uma estrada com a solução de ponte rodoviária (3).

No entanto, apesar das indiscutíveis vantagens da ponte rodoviária, essa solução não é sempre possível, pois a topografia do terreno pode requerer a construção de uma ponte-canál. Como para as pontes-canál, as soluções técnicas para uma ponte rodoviária são várias, dependendo da topografia, do terreno e do porte das obras a serem realizadas. A ponte pode, por exemplo, ser construída com uma estrutura metálica, como para a ponte da rodovia francesa A3 que passa sobre o canal Rhin-Herne, construída em 1976 sobre um vão de 133m, e de 38m de largura (Figura 38).

Uma outra opção é a realização de uma ponte de concreto armado, como a ponte sobre o Canal Saint- Denis na França, que tem um vão de 80m e que permite o passagem de 6 vias de circulação (Figura 39).



Figura 38: Ponte rodoviária metálica sobre o canal Rhin-Herne



Figura 39: Ponte rodoviária de concreto sobre o canal Saint Denis (França).

III.1.3. Aplicação ao estudo

No traçado estabelecido pelo projeto há várias travessias de rodovias. Para cada uma, foi determinada a melhor solução a escolher para esse cruzamento, levando em consideração o que já foi mencionado nos itens anteriores.

As regiões atravessadas pelos canais deste projeto têm poucas estradas, predominantemente vicinais em terra. Devido ao alto preço de uma ponte (canal ou rodoviária), optou-se pela ponte somente quando fosse estritamente necessário. As estradas vicinais de terra e vias simples foram geralmente desviadas até uma estrada que possuía ponte.

a. Interligação Araguaia-Paraguai

i. Alternativa 1

- km 7,50 (Figura 40)



Figura 40: Planta do cruzamento ao Km 7,5.

Sobre quase 12 kmo canal não cruza estradas grandes, mas cruza muitas vias secundárias, que somente têm um acesso muito longe para uma estrada que tenha uma ponte. Foi decidido colocar uma ponte de pequeno porte no km 7,50, localidade em que há cruzamento entre várias vias

secundárias. Neste local, uma escavação de um pouco mais de 20 metros será realizada. Então o perfil longitudinal é perfeito para a implantação de uma ponte rodoviária, que nem necessitará da sobre-elevação com relação ao terreno, e será bem horizontal. Os taludes serão mantidos com grampos e concreto projetado para permitir uma inclinação maior e uma ponte de comprimento menor.

- km 12,48 (Figura 41)



Figura 41: Planta do cruzamento noKm 12,48.

Para o caso da travessia no km 12,48, inicialmente, a estrada será desviada. Pode-se ver que a linha azul, que representa o fundo do canal, passa a 8 m do nível da estrada, que passa em baixo. O vão aqui é de 25 m. Com um rebaixamento do nível da estrada, este perfil longitudinal corresponde à construção de uma ponte-canal de pequeno porte, com a passagem da estrada embaixo.



Figura 42: Perfil longitudinal da alternativa 1 da interligação Araguaia-Paraguai. Os círculos vermelhos marcam os cruzamentos.

ii. Alternativa 2

- km 6,06 (Figura 43)



Figura 43: Planta na travessia no km 6,06.

No perfil longitudinal, vê-se que a cota prevista do canal chega uns 20 msob o nível do solo quando da travessia com a estrada. Esta configuração é devida ao fato que o nível do solo tem uma elevação forte acima do nível médio do terreno sobre uma pequena distância. Neste caso, é melhor fazer uma grande escavação para permitir a passagem do canal, ao invés de construir obras de transposição caras e que aumentam o tempo de navegação. Neste caso será construída uma ponte rodoviária. Como o canal passa bem abaixo do nível do solo, esta ponte poderá ser horizontal, sem precisar sobre-elevação com o nível do solo.

- km11 (Figura 44)



Figura 44: Planta do cruzamento ao km 11.

Este cruzamento é bem especial, pois ocorre num plano inclinado transversal. A linha azul representa a trajetória do nível inferior da câmara do plano inclinado. Vemos que esta trajetória é 3-4 m abaixo do nível do solo na travessia com a estrada. Então, o nível d'água dentro da câmara estará uns 2-3m sobre o nível do terreno (já que o canal tem 5m de profundidade, ver parte seção transversal). A melhor solução é construir uma ponte rodoviária para permitir a passagem da estrada acima do canal. A ponte deverá passar pelo menos 7 m acima do nível d'água da câmara do plano inclinado, ou seja, a estrutura deverá passar no mínimo 10m acima do terreno. Esta ponte exigirá modificações da estrada, antes e depois, do cruzamento, para permitir à estrada adquirir a cota necessária, sem inclinação exagerada para os veículos.



Figura 45: Perfil longitudinal da alternativa é da interligação Araguaia-Paraguai. Os círculos vermelhos marcam os cruzamentos

b. Interligação Taquari-Prado

i. Alternativas 1 e 2 (Figura 46)

As alternativas de interligações entre o rio Taquari e o rio Prado tem um comprimento reduzido. Assim, o comprimento da alternativa 1 é de 3,64 km e o da alternativa 2 é de 4,54 km. Há somente uma via secundária de terra que cruza o canal no km 0,6. Como se pode ver sobre a planta de situação, não é possível fazer um desvio que permita contornar imediatamente o canal que conflui no rio Capim branco, porque ter-se-ia que construir uma ponte sobre esse rio.



Figura 46:Planta de travessia das alternativas 1 e 2 com uma via secundária de terra.

A construção de uma ponte para uma travessia de estrada vicinal de terra num trecho curto de canal não se justifica. A solução foi de desviar esta via até outras que possuam infraestruturas existentes para permitir atravessar o rio. Uma sinalização adequada deverá também ser instalada para advertir os usuários desta via secundária.

c. Interligação Taquari-Verde

Esta interligação tem um comprimento maior que as outras, com 31,5 km. Um túnel de 4,5 m de comprimento deverá ser implantado do km 15,3 ao km 19,8. Para este canal, procurou-se minimizar o número de pontes, como para a interligação Araguaia-Paraguai. As pontes para estradas vicinais serão construídas somente se for indispensável.

- km 3,6 (Figura 47)



Figura 47: Planta da travessia no km 3,6.

Uma estrada importante da região segue uma trajetória mais ou menos paralela ao canal sobre 2 km, e o cruza. Esta estrada conecta-se a todas as outras vias secundárias que passam próximo. O perfil longitudinal sugere que o nível do canal será 5m abaixo do nível do solo, o que permitirá construir uma ponte rodoviária.

- km 15,1 (Figura 48)

O cruzamento do canal com a estrada no km 15,2 se faz muito perto da entrada do túnel que situar-se-á no km 15,3.



Figura 48: Planta com a entrada do túnel para o cruzamento nokm 15,2

A solução aqui seria desviar a estrada para permitir passar acima do túnel, e assim não ter que construir uma ponte. A via não é importante, a topografia do terreno tem inclinação pequena e sem acidentes, o que permite prever que o custo do desvio não deverá ser muito importante. Esta estrada será também o ponto de passagem para as vias secundárias próximo desta área.

- Km 19,7 (Figura 49)

Próximo ao fim do túnel, as estradas vicinais de terra que passam muito perto serão desviadas para permitir um ponto de passagem a mais, no km 19,7, pois o desvio das vias de terra é relativamente barato.



Figura 49: Estradas vicinais de terra na proximidade do fim do túnel serão desviadas permitindo um ponto de passagem a mais

- km 27,8 (Figura 50)



Figura 50: Planta da travessia no km 3,6.

No Km 27,8 passa uma estrada vicinal, que não teria uma necessidade absoluta de construção de uma ponte. No entanto, esta ponte poderia ser projetada, porque sem ela o canal não poderia ser atravessado por uma extensão de 12 km, o que prejudicaria muito os habitantes da região. Devido à pouca necessidade dessa obra, esta ponte foi considerada opcional.

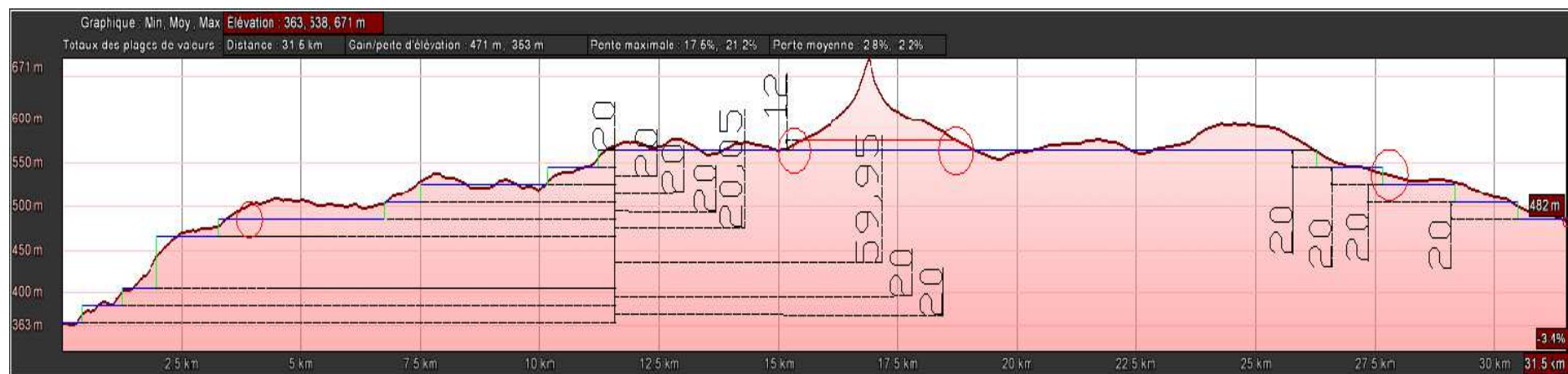


Figura 51: Perfil longitudinal da interligação Taquari-Rio verde. Os círculos vermelhos marcam os cruzamentos

III.2. Cubagens

A cubagem é o cálculo do movimento de terra, permitindo assim conhecer o volume de cortes e de aterros. Essa operação é necessária para fazer o orçamento do projeto.

Para fazer esse cálculo, foi criada uma planilha e usados os dados extraídos do Google Earth. De fato, esse software permite obter o perfil longitudinal do terreno natural no eixo do canal, fornecendo as coordenadas dos pontos após um tratamento pelo site GPS Visualizer. Os pontos saem sob a forma de latitude (em graus), longitude (em graus) e cota (em metros). Por outro lado, graças ao traçado do perfil longitudinal do canal no AutoCAD, a cota do fundo do canal é conhecida. Com esses valores pode-se estabelecer um modelo permitindo calcular a cubagem.

Então, o cálculo foi feito com o método do volume do prismóide.

III.2.1. Método do volume do prismóide

O método do volume do prismóide consiste em considerar o volume como proveniente de uma série de prismóides (sólidos geométricos limitados nos extremos por faces paralelas e lateralmente por superfícies planas). No campo, as faces paralelas correspondem às seções transversais extremas, e as superfícies planas laterais correspondem ao fundo do canal, aos taludes e à superfície do terreno natural, conforme indica a Figura 51.

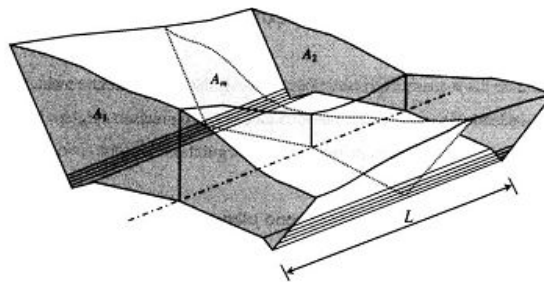


Figura 52: prismóide (Pontes Filho, 1998).

O volume do prismóide da Figura 18.1 pode ser calculado mediante a fórmula:

$$V = \frac{L}{6} \cdot (A_1 + 4 \cdot A_m + A_2)$$

em que:

A1 e A2 = áreas das seções transversais extremas;

Am = área da seção transversal no ponto médio entre A1 e A2;

L = distância entre as seções A1 e A2.

Considerando:

$$A_m = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

uma fórmula aproximada comumente utilizada para o cálculo dos volumes dos prismóides é a chamada fórmula das áreas médias. A fórmula é a seguinte:

$$V_m = \frac{L}{2} \cdot (A_1 + A_2)$$

Obtém-se valores exatos para os volumes quando ambas as seções transversais são iguais. Para outras condições, os resultados são ligeiramente diferentes. Na prática, o erro cometido é geralmente menor que 2%.

III.2.2. O modelo usado

Para calcular a cubagem com o Excel, teve-se que adotar um modelo simples com somente uma variável. Além disso, teve-se que estudar três casos de seções:

a. Caso 1: quando o terreno natural (TN) é acima da cota do projeto (CP), $TN-CP=X>0$

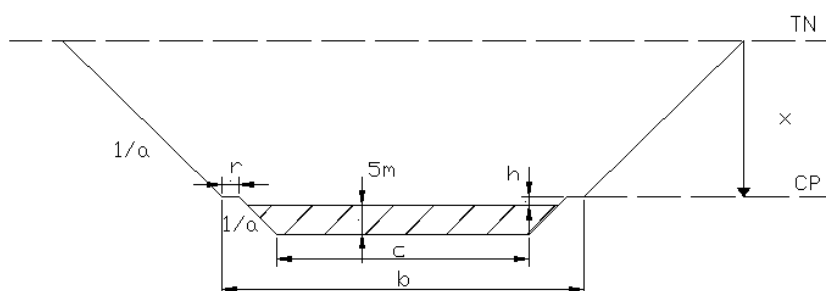


Figura 53: Seção transversal para $x>0$.

Fórmula referente à seção transversal:

Tem somente escavação:

$$S(x) = a \times x^2 + b \times x + a \times (5 + h)^2 + (5 + h) \times c$$

$$S(x) = a \times x^2 + b \times x + a \times (5 + h)^2 + (5 + h) \times c$$

b. Caso 2: quando o TN fica abaixo do CP mas acima do fundo do canal, $0 > X > -(5+h)$

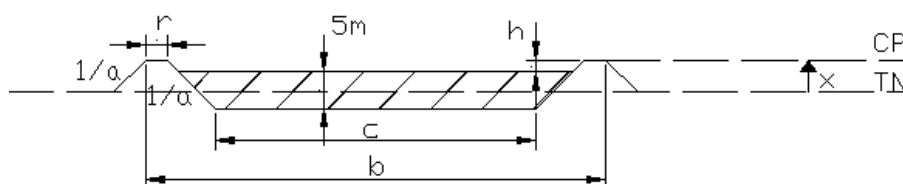


Figura 54: Seção transversal para $0 > x > -(5+h)$.

Fórmula referente à seção transversal:

- Seção transversal do corte:

$$S(x) = a \times (5 + h + x)^2 + c \times (5 + h + x)$$

- Seção transversal de aterro:

$$S(x) = 2 \times (a \times x^2 - r \times x)$$

c. Caso 3: quando o TN fica abaixo do fundo do canal, $X < -(5+h)$

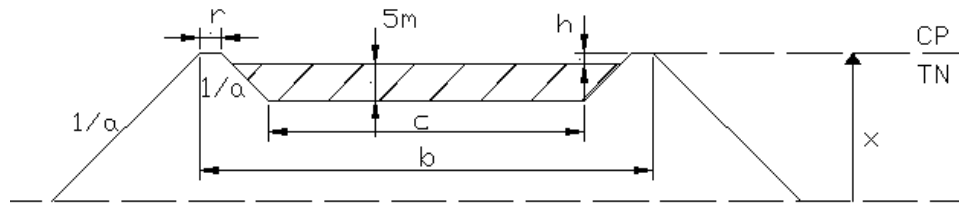


Figura 55: Seção transversal para $x < -(5+h)$.

Tem somente aterro:

$$S(x) = a \times x^2 - b \times x - (c \times (5 + h) + a \times (5 + h)^2)$$

Uma vez essas fórmulas estabelecidas teve-se que integrar entre as seções, porém essa integração não funciona entre duas seções de caso diferente. Nessa configuração, tem-se que integrar até o ponto limite entre as seções. Passando do caso 1 para o 2, tem-se que integrar até $X = 0$ e continuar a integração depois de $X = 0$. Passando do caso 2 para o 3, tem-se que integrar até $X = -(5+h)$ e fazer uma outra integração depois desse X .

Então para efetuar esses cálculos com muitas seções, tem-se que estabelecer uma planilha para automatizar a tarefa.

III.2.3. A planilha do cálculo da cubagem

Os dados extraídos do Google Earth pelo GPS Visualizer são: a latitude, a longitude e a cota dos pontos ficando no eixo do canal, porém é necessário conhecer a distância entre dois pontos, então teve-se que tratar os dados para calcular esse comprimento. Isso foi feito com a programação VBA seguinte:

```

Sub distance()

Const rT = 6370.9732786 'raio do globo
Dim nb_ligne As Integer
nb_lignes = WorksheetFunction.CountA(Range("A:A"))
Range("F:F").ClearContents
Range("G:G").ClearContents
'abaixo figuram os titulos das colunas da tabela
Range("F1") = "distance (km)"
Range("G1") = "PK (km)"
Range("G2") = 0

For i = 2 To nb_lignes - 1
'conversão de grau para radiano
Cells(i, "D") = convertdegradlat(i)
Cells(i, "E") = convertdegradlong(i)
'calculo da distancia projetada na horizontal
dp = 2 * ArcSin((Sqr(((Sin(Cells(i, "D")) - Cells(i + 1, "D")) / 2) ^ 2) +
+Cos(Cells(i, "D")) * Cos(Cells(i + 1, "D")) * (Sin((Cells(i, "E") - Cells(i + 1, "E")) / 2) ^ 2))))
dist = dp * rT
Cells(i + 1, "F") = dist
Cells(i + 1, "G") = Cells(i, "G") + Cells(i + 1, "F")|
Next
End Sub

Function ArcSin(x As Double) As Double

ArcSin = Atn(x / Sqr(-x * x + 1))
End Function

Function convertdegradlat(i)
convertdegradlat = Cells(i, "A") * 3.1415926 / 180
End Function
Function convertdegradlong(i)
convertdegradlong = Cells(i, "B") * 3.1415926 / 180
End Function

```

Figura 56: Código cálculo da distância.

Depois tem-se que calcular a seção transversal do canal por cada ponto, escolhendo a fórmula correspondente. Essa tarefa foi automatizada e permite também calcular o volume total de corte e de aterro.

Inicialmente, tem-se que definir as fórmulas:

```

Function Ttdeblais(x) 'caso 1 onde tem so escavação
Ttdeblais = a * x ^ 2 + b * x + a * (5 + h) ^ 2 + (5 + h) * c
End Function

Function intermediaireR(x) 'caso 2 formula para a seção de aterro
intermediaireR = 2 * (a * x ^ 2 - r * x)
End Function

Function intermediaireD(x) 'caso 2 formula para a seção de corte
intermediaireD = a * (5 + h + x) ^ 2 + c * (5 + h + x)
End Function

Function Ttremblais(x) 'caso 3 onde tem so aterro
Ttremblais = -b * x - (c * (5 + h) + a * (5 + h) ^ 2) + a * x ^ 2
End Function

```

Figura 57: Fórmulas das seções

Uma vez essas funções estabelecidas, escolhe-se a fórmula correspondente para cada ponto.

```

Fin = Columns("G").Find("*", , , , , xlPrevious).Row
Set Liste = Range("G2:G" & Fin)
Range("I2") = Application.Sum(Liste)
End Sub

Sub totalR()
Dim Fin As Long, Liste As Range
Fin = Columns("H").Find("*", , , , , xlPrevious).Row
Set Liste = Range("H2:H" & Fin)
Range("J2") = Application.Sum(Liste)
End Sub

Sub cas() 'essa macro determina qual formula de seção tem que ser usada

Dim delta As Variant, nb_lignes As Integer
nb_lignes = WorksheetFunction.CountA(Range("A:A"))

For i = 2 To nb_lignes
delta = Cells(i, "D")
Cells(i, "E").ClearContents
Cells(i, "F").ClearContents
If delta >= 0 Then
Cells(i, "E") = Ttdeblais(delta)
ElseIf delta <= -(5 + h) Then
Cells(i, "F") = Ttremlais(delta)
Else
Cells(i, "E") = intermediaireR(delta)
Cells(i, "F") = intermediaireD(delta)
End If
Next
avertissement 'macro feita para detectar quando trocamos de caso de seção
Volumes 'macros integrando entre as seções
totalD 'macro dando o volume total de cortes
totalR 'macro dando o volume total de aterro
End Sub

```

Figura 58: Cálculo da cubagem.

III.2.4. Casos particulares

a. Plano inclinado da alternativa 2 da interligação Araguaia-Paraguai

Sobre a alternativa 2 da interligação Araguaia Paraguai escolheu-se como obra de transposição um plano inclinado, então a seção transversal dessa obra é diferente e precisa de um estudo particular. Para utilizar a planilha, teve-se que trocar as fórmulas das seções. Nessa configuração há somente dois casos:

i. Caso 1: TN acima da CP, $TN-CP=X>0$

Nesse caso há somente escavação.

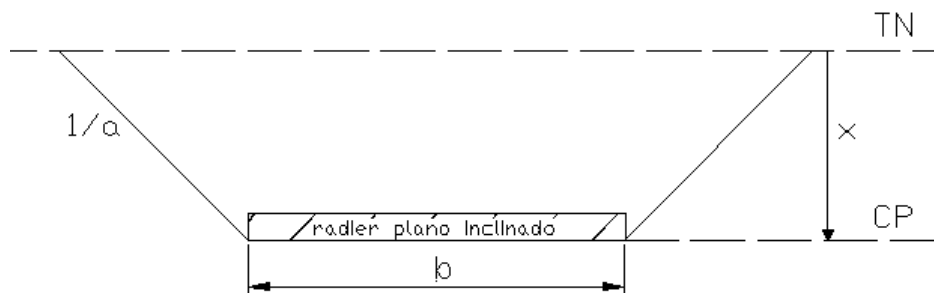


Figura 59: Seção transversal plano inclinado $x>0$.

A fórmula da seção transversal atuante é a seguinte: $S(x) = a \times x^2 + b \times x$

ii. Caso 2: TN abaixo da CP, $X < 0$

Nesse caso há somente aterro.

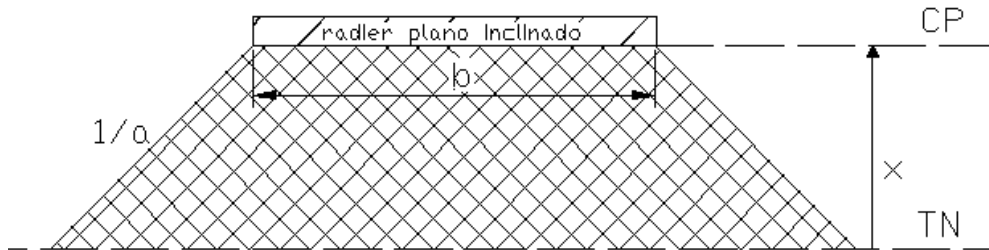


Figura 60: Seção transversal plano inclinado $x < 0$.

A fórmula da seção transversal atuante é a seguinte:

$$S(x) = a \times x^2 - b \times x$$

Além disso, é preciso conhecer a cota do projeto para cada ponto. A altura da base do plano inclinado é linear e obedece assim à função:

$$CP(PK) = -37,049 \times (PK - 10,3178) + 805,5$$

PK sendo um ponto quilométrico

Os resultados da planilha são:

Volume de aterro, plano inclinado	225m ³
Volume de corte, plano inclinado	2976 m ³

Tabela 13: Resultados da planilha

b. O túnel no canal de partilha da interligação Taquari-Verde

Adotando-se a seção transversal de túnel apresentada na Figura 61, a seção transversal corresponde a 387,50 m². O comprimento do túnel é de 3,80 km, portanto o volume de escavação para o túnel é de 1 472 500 m³.

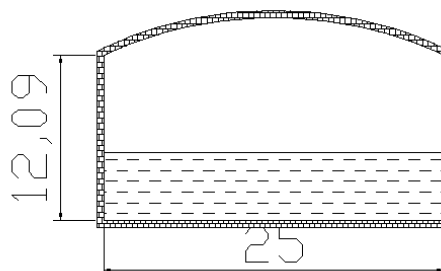


Figura 61: Seção transversal do túnel.

III.2.5. Os resultados

Interligação	Volume escavação ($\cdot 10^3 \text{ m}^3$)	Volume aterro ($\cdot 10^3 \text{ m}^3$)
Araguaia-Paraguai alternativa 1	9 956	6 116
Araguaia-Paraguai alternativa 2	13 036 + 2 635* (*plano inclinado)	2 163 + 192* (*plano inclinado)
Taquari-Prado alternativa 1	4 944	363
Taquari-Prado alternativa 2	7 763	322
Taquari-Rio Verde	22 486 + 1 473* (*túnel)	10 722

Tabela 14: Resultados obtidos para as 3 interligações

III.3 Estimativa dos preços

O objetivo dessa parte é propor uma estimativa do orçamento do projeto em relação às grandes estruturas e aos movimentos de terra. A finalidade é ter uma idéia do custo geral em relação aos aspectos mais caros do projeto. Números referentes a outras componentes serão que ser levados em conta no orçamento total mais detalhado, tais como aluguel de máquinas, salários, bombas de abastecimento, reservatórios, etc..

III.3.1 Grandes estruturas

Para fazer uma estimativa dos custos das grandes estruturas, foram utilizadas custos de obras semelhantes no mundo (principalmente na Europa):

- Plano inclinado de Ronquières (Bélgica): 80 milhões de Euros ($h=68\text{m}$, $L=1430\text{m}$, $L_{\text{câmara}}=91\text{m}$)
- Elevador de Niederfinow (Alemanha): 280 milhões de Euros ($h=54\text{m}$, $L_{\text{câmara}}=83\text{m}$)
- Elevador de Strépy-Thieu (Bélgica): 650 milhões de Euros ($h=73\text{m}$, $L_{\text{câmara}}=112\text{m}$)
- Ponte-canal de La Louvière (Bélgica) : 50 milhões de Euros ($L=500\text{m}$, $b=46\text{m}$)
- Eclusas de Tucuruí (duas eclusas + 5,5 km de canal): 1,6 bilhões de Reais ($L_{\text{câmara}}=210\text{m}$)
- Eclusas para comboio Tietê: em torno de 300 milhões de Reais ($L_{\text{câmara}}=142\text{m}$)

Para ter uma idéia do preço do plano inclinado, calculou-se o preço do metro linear do plano de Ronquières. Como esse plano foi construído em 1968, considerou-se um acréscimo de 15% do preço do metro linear para levar em conta a inflação. Finalmente, usou-se esse preço para calcular o custo de plano inclinado do projeto ($L=4000\text{m}$). Obteve-se, assim, um custo total de 257 milhões de Euros, ou 832 milhões de Reais.

Para o preço do elevador, a referência foi a do elevador de Strépy-Thieu, por ser o mais novo e o maior hoje em dia. A altura de projeto será em torno de 70m, o que é igual à daquele elevador, mas a câmara será maior, com um comprimento de 142m. Levando em conta essa diferença, estimou-se em 800 milhões de Euros o custo do elevador, ou seja, em torno 2,6 bilhões de Reais.

Em relação às eclusas dimensionadas para o comboio Tietê e com 20m de queda, com os preços verificados na literatura e com as indicações fornecidas pelo Departamento Hidroviário da Secretaria de Logística e Transportes do Estado de São Paulo, o custo unitário foi estimado em 400 milhões de Reais.

Para a ponte-canal, considerando que o canal seria mais de dez vezes menor do que a de La Louvière, mas também um pouco mais largo, estimou-se em 5 milhões de Euros o custo total, o que representa em torno de 16,3 milhões de Reais.

A estimativa do custo do túnel foi difícil, porque atualmente não existem obras semelhantes no mundo. Foi feita a hipótese de um túnel em solo (ver parte sobre a geologia do local). Uma pesquisa sobre os preços de obras civis para o projeto de trem de alta velocidade entre Rio de Janeiro e Campinas estima o custo de um túnel circular de diâmetro de 15,7m em 125 000 R\$/m (túnel em zona rural, em solo e construído com o método Shield). Esse preço inclui as escavações, os emboques e os poços de ventilação. Para ter uma seção transversal 1,5 vezes maior, estimou-se o preço do metro linear a 187500 Reais. Com uma extensão de 4 km, o custo total do túnel estaria estimado em 750 milhões de Reais.

Por falta de dados, o mesmo documento foi usado para estimar o preço das pontes necessárias nas travessias dos canais com as estradas existentes. A precisão dos preços pode não ser muito boa, porque o documento trata de pontes ferroviários. O custo para uma ponte pequena é em torno de 3200 R\$/m² de tabuleiro. Estimando a largura de uma ponte rodoviária de 13m (uma faixa para cada sentido) e o comprimento para a passagem do canal de 80m, obteve-se o custo total de 3,3 milhões de Reais.

A tabela 15 resume os preços de todas as estruturas encontradas no projeto. Os custos totais para cada alternativa foram também calculados. Todos os preços estão em milhões de Reais.

Obras	Preço (milhões R\$)
Elevador	2600
Plano inclinado	832
Eclusas	400
Túnel (4 km)	750
Ponte-canal(30m)	16,3
Ponte	3,3

Tabela 15: Preços das estruturas encontradas no projeto

Interligação Araguaia-Paraguai					
Alternativa 1			Alternativa 2		
Obras	Nº obra	Preço total	Obras	Nº obra	Preço total
Eclusas	5	2000	Eclusas	10	4000
Elevador	1	2600	Elevador	1	2600
Plano inclinado	1	832	Pontes	2	6,6
Ponte-canal	1	16,3	TOTAL		6606,6
Ponte	1	3,3			
TOTAL		5451,6			

Tabela 16: N° de obras e preço para a interligação Araguaia-Paraguai

Interligação Taquari-Prado					
Alternativa 1			Alternativa 2		
Obras	Nº obras	Preço total	Obras	Nº obras	Preço total
Elevador	1	2600	Eclusas	4	1600
TOTAL		2600	TOTAL		1600

Tabela 17: N° de obras e preço para a interligação Taquari-Prado

Interligação Taquari-Rio Verde		
Obras	Nº obras	Preço total
Eclusas	11	4400
Túnel	1	750
Elevador	1	2600
Pontes	2	6,6
TOTAL		7756,6

Tabela 18: N° de obras e preços para a interligação Taquari-Rio Verde

É possível notar que a interligação Taquari-Rio Verde é muito custosa e a alternativa 2 da interligação Taquari-Prado parece a melhor opção em relação às estruturas. Para a interligação Paraguai-Araguaia, a alternativa 1 sai um pouco mais econômica, mas como a diferença é reduzida entre as duas alternativas, é importante comparar também incluindo os custos dos movimentos de terra.

III.3.2 Movimentos de terra

Para os movimentos de terra foram usados os preços da Tabela de Preços Unitários do Departamento de Estradas de Rodagem (DER), da Secretaria de Logística e Transportes do Estado de São Paulo. Com efeito, os estudos feitos pelo Departamento Hidroviário do Estado de São Paulo baseiam-se também nesses preços. Os volumes usados aqui foram calculados na parte anterior, relativa aos movimentos de terra. Os preços usados foram os seguintes:

- Escavação mecânica sem explosivos: 11,21 R\$/m³
- Aterro solo com 3% de cimento c/ pulverização: 53,86 R\$/m³
- Compactação manual com aterro em solo local: 23,16 R\$/m³

Considerando um solo de boa qualidade, foi feita a hipótese de que os aterros possam ser feitos com o solo local proveniente das escavações. Os custos obtidos para cada alternativa são os seguintes (todos os preços estão em milhões de Reais):

Ligação	Vol. Escavação (m3)	Vol. Aterro (m3)
Araguaia Paraguai Alt. 1	9 956 000	6 116 000
Araguaia Paraguai Alt. 2	15 671 000	2 355 000
Taquari Prado Alt. 1	4 944 000	363 000
Taquari Prado Alt. 2	7 763 000	322 000
Taquari Rio Verde	22 486 000	10 722 000

Tabela 19: volumes de escavação e aterros

Ligação	Custo Escavação (R\$)	Custo Aterro (R\$)	Custo Total (R\$)
Araguaia Paraguai Alt. 1	111 606 760	141 646 560	253 253 320
Araguaia Paraguai Alt. 2	175 671 910	54 541 800	230 213 710
Taquari Prado Alt. 1	55 422 240	8 407 080	63 829 320
Taquari Prado Alt. 2	87 023 230	7 457 520	94 480 750
Taquari Rio Verde	252 068 060	248 321 520	500 389 580

Tabela 20 : Custo dos movimentos de terra

A interligação Taquari-Rio Verde é a mais cara, com efeito essa opção tem um comprimento bem mais longo que as ligações Taquari-Prado. Na interligação Araguaia-Paraguai a segunda alternativa é um pouco mais barata (7% mais barata). Em relação à interligação Taquari-Prado, a alternativa 1 é mais barata com uma diferença de preço significativa (alternativa 2 é 50% mais cara).

Considera-se um revestimento das margens com gabião colchão com espessura de 23cm (espessura média) e tela galvanizada, cujo preço é 130,92 R\$/m². O revestimento será colocado

somente nas margens (não no fundo do canal) para proteger contra as ondas geradas pelas embarcações. Nos canais com margens de inclinação 1V:2H cada margem tem um comprimento de 14,5m, e nos canais com margens de inclinação 1V:3H, uma margem mede 20,5m.

Interligação	Comprimento (m)	Margens (m)	Custo Total (R\$)
Araguaia Paraguai Alt. 1	20000	29	75 933 600
Araguaia Paraguai Alt. 2	10000	29	37 966 800
Taquari Prado Alt. 1	3700	41	19 860 564
Taquari Prado Alt. 2	4600	41	24 691 512
Taquari Rio Verde	35000	41	187 870 200

Tabela 21: Custo devido à proteção das margens

III.3.3 Total

Somando os preços das estruturas e dos movimentos de terra, obteve-se uma estimativa dos custos (em milhões de Reais) de cada alternativa do projeto, detalhados na tabela seguinte.

Ligação	Total (milhões R\$)
Araguaia Paraguai Alt. 1	5 780,79
Araguaia Paraguai Alt. 2	6 874,78
Taquari Prado Alt. 1	3 083,69
Taquari Prado Alt. 2	1 719,17
Taquari Rio Verde	8 444,86

Tabela 22: Custo total de cada alternativa

A interligação Taquari-Rio Verde sendo mais cara, tanto para as estruturas, quanto para os movimentos de terra, foi descartada. Para a interligação Taquari-Prado, a segunda alternativa aparece mais barata (quase a metade do preço da primeira alternativa) por causa de somente ter eclusas, mais baratas que um elevador. Enfim, considerando a interligação Araguaia-Paraguai a primeira alternativa sai mais barata.

III.4. Problemáticas encontradas devido à água

Pensando sobre o projeto, encontram-se várias problemáticas quanto ao abastecimento d'água para encher o canal, ou ainda a variação do nível d'água nos estirões, particularmente considerando as mudanças climáticas em curso, demonstradas dramaticamente pela estiagem deste ano nesta região.

a. Abastecimento d'água

Uma das maiores dificuldades nos canais de transposição é o abastecimento d'água. De fato, esse tipo de obra aparece como uma pirâmide em escada com rios nos pés dela, então para que uma embarcação navegue sobre essa pirâmide, ligando os dois rios, tem-se que encher de água cada degrau. Por isso, é suficiente abastecer o canal de partilha, o estirão de maior altura, porque a água desce os “degraus” com o esvaziamento das eclusas no estirão a jusante delas. Porém, o canal de partilha tem que permanecer navegável, tendo um nível de água suficiente.

Uma solução é achar uma localidade em que possa ser formado um reservatório, ficando numa altura maior que aquela do canal de partilha. Dessa maneira, pode-se abastecer por gravidade o canal em qualquer momento do dia. De fato, o problema do abastecimento é o preço da energia. Então a idéia é de bombear a água de um rio para o reservatório quando a energia for mais barata possível. Isso permite monitorar o nível d'água do canal de partilha sem precisar de outra energia, além da potencial.

Vendo desse fato, a dificuldade é de projetar o sistema de abastecimento. Devem ser selecionadas as bombas, as tubulações e o reservatório. Para fazer esse dimensionamento, tem-se que fazer estudos da hidrologia do local, como a vazão dos rios do entorno, a variação dos níveis d'água, os níveis do lençol freático, etc., Deve-se também conhecer o número de embarcações usando o canal por dia, para determinar o volume de água que desce a pirâmide por dia, e também avaliar a perda de água do canal devido à sua estanqueidade e as perdas por evaporação.

De fato, a água desce os degraus com a embarcação que vai para jusante. Por exemplo, se no projeto todas as eclusas têm as mesmas dimensões (comprimento (L_{eclusa}), largura (b_{eclusa}), queda (q)), a quantidade de água que acompanha a embarcação (comprimento L_{emb} , boca b_{emb} , calado c_{emb}) de montante para jusante é:

$$Volume = L_{eclusa} \times b_{eclusa} \times q - L_{emb} \times b_{emb} \times c_{emb}$$

Então, maior é a queda das eclusas, maior é a perda de água por passagem de comboio. Para que essa água seja útil para duas embarcações, e assim economizar a água, é preferível que os comboios que vão de jusante para montante usem a água das embarcações que descem, de fato é essa água que deverá ser usada para encher a câmara da eclusa de jusante.

Outro problema que deve ser considerado é sobre o rio que abastece o reservatório. Um estudo bem preciso desse rio tem que ser feito, sobretudo se ele é uma fonte de um dos rios que o projeto interliga. De fato, o bombeamento dele não tem que diminuir seu nível de água, o que poderia torná-lo não navegável.

b. A variação do nível de água nos estirões

i. Elevação do nível da água

Araguaia Paraguai alt1										
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m3)	numero embarcações	volume embarcações (m3)	volume eclusagem (m3)	altura água (m)	Altura caminho de serviço acima do nível normal de água (m)
trecho 1	49,5	75,5	4,6	296,5122	85247,2575	2	8974,8	69720	8,362139	3,762138624
trecho 2	49,5	75,5	4,6	445,3	128023,75	3	13462,2	104580	8,357647	3,75764653
trecho 3 (elev)	49,5	75,5	4,6	625,2	179745	4	17949,6	697,2	4,617843	0,01784261
trecho 4	49,5	75,5	4,6	344,1	98928,75	2	8974,8	69720	7,841848	3,2418483
trecho 5	49,5	75,5	4,6	218,53	62827,375	1	4487,4	34860	7,152327	2,552326912
trecho 6	49,5	75,5	4,6	219,72	63169,5	1	4487,4	34860	7,138504	2,53850355
canal de part	49,5	75,5	4,6		0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!
trecho 8	49,5	75,5	4,6	869,59	250007,125	5	22437	174300	7,807029	3,2070286
trecho 9	49,5	75,5	4,6	507,22	145825,75	3	13462,2	104580	7,898924	3,298923544
trecho 10	49,5	75,5	4,6	4171,02	1199168,25	5	22437	174300	5,268613	0,668613433
Araguaia Paraguai alt2										
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m3)	numero embarcações	volume embarcações (m3)	volume eclusagem (m3)	altura água (m) (m3)	Altura caminho de serviço acima do nível normal de água (m)
trecho 1 (elev)	49,5	75,5	4,6	1818,3	522761,25	5	22437	871,5	4,607669	0,007668702
trecho 2	49,5	75,5	4,6	553,6	159160	3	13462,2	104580	7,622543	3,022543353
trecho 3	49,5	75,5	4,6	588,7	169251,25	4	17949,6	139440	8,389774	3,789774078
trecho 4	49,5	75,5	4,6	677,7	194838,75	4	17949,6	139440	7,892076	3,29207614
canal de part	49,5	75,5	4,6		0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!
Taquari Prado alt1										
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m3)	numero embarcações	volume embarcações (m3)	volume eclusagem (m3)	altura água (m) (m3)	Altura caminho de serviço acima do nível normal de água (m)
trecho 1 (elev)	49,5	88,5	4,6	802,6	254745,24	5	22437	871,5	4,615737	0,015736893
Taquari Prado alt2										
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m3)	numero embarcações	volume embarcações (m3)	volume eclusagem (m3)	altura água (m) (m3)	Altura caminho de serviço acima do nível normal de água (m)
trecho 1	49,5	88,5	4,6	1662,91	527807,634	5	22437	174300	6,119076	1,519076172
Taquari Verde										
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m3)	numero embarcações	volume embarcações (m3)	volume eclusagem (m3)	altura água (m) (m3)	Altura caminho de serviço acima do nível normal de água (m)
trecho 1	49,5	88,5	4,6	538,4	170888,16	3	13462,2	104580	7,415104	2,815104335
trecho 2 (elev)	49,5	88,5	4,6	623	197740,2	4	17949,6	697,2	4,616219	0,016218857
trecho 3	49,5	88,5	4,6	1068,73	339214,902	5	22437	174300	6,963634	2,363634367
trecho 4	49,5	88,5	4,6	3213,3	1019901,42	5	22437	174300	5,386135	0,786134801
trecho 5	49,5	88,5	4,6	662,6	210309,24	4	17949,6	139440	7,649909	3,049908791
trecho 6	49,5	88,5	4,6	2640,3	838031,22	5	22437	174300	5,556742	0,956742399
trecho 7	49,5	88,5	4,6	923,2	293023,68	5	22437	174300	7,336229	2,736229372
canal de part	49,5	88,5	4,6		0	0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!
trecho 9	49,5	88,5	4,6	1446,7	459182,58	5	22437	174300	6,346103	1,746102825
trecho 10	49,5	88,5	4,6	1183,29	375576,246	5	22437	174300	6,7348	2,134799547
trecho 11	49,5	88,5	4,6	1201,2	381260,88	5	22437	174300	6,702969	2,102969494

Tabela 23: Variação do nível de água nos estirões por descida das embarcações.

$$altura\ água = \frac{(volume\ normal\ de\ estirao + volume\ eclusagem) \times 2 \times comprimento\ de\ estirao}{largura\ fundo\ canal + largura\ ao\ nível\ água}$$

Essa problemática surgiu quando estava-se decidindo quanto à borda livre entre o nível de água de projeto e o nível do caminho de serviço ao longo do canal. Os cálculos mostram uma grande variação da altura de água no canal quando uma eclusagem de montante para jusante ocorre.

Essa tabela mostra a variação do nível de água no canal no pior caso num estirão quando a eclusa de jusante permanece fechada e a eclusa de montante está fazendo a eclusagem do número maximal admissível de embarcações no estirão no limite de cinco embarcações. Por exemplo, no segundo estirão da alternativa 1 da interligação Araguaia Paraguai, o comprimento dele é de 445,3m, então 3 comboios tipo podem entrar levando com eles o volume de três eclusagens. A consequência disso é que o nível da água vai crescer de 3,76m! Além disso, podemos adicionar a altura das ondas geradas pelas embarcações! Então, tem-se que achar uma solução para vencer esse fenômeno. O que pode ser proposto é o aumento da seção transversal molhada do canal nos estirões, para chegar até uma subida máxima de 1,90m, mas isso leva a um aumento da seção transversal bem grande.

Então, além do aumento da largura tem-se que usar um sistema para evitar o galgamento do caminho de serviço (particularmente se o canal situar-se em aterro!). Pode-se imaginar um tipo de vertedouro que extravase a água num reservatório, que poderia encher as eclusas de jusante se for necessário, o resto podendo ser bombeado para uma eclusa a montante durante a noite, quando a energia é mais barata. O objetivo é de evitar gastar a água fazendo descer a escada sem embarcação. Uma outra solução é de limitar o número de embarcações no estirão.

Na Tabela 23 os estirões em vermelho são aqueles que têm um elevador a montante. Esse caso é particular, porque o elevador quase não perde água isso explicando a pequena variação do nível d'água. A consequência disso é que o elevador faz um efeito de barragem no canal. A água não desce e o estirão a montante se enche. Nesse caso a água tem que ser extravasada no estirão de jusante do elevador com sistema de tubulação. Aproveitando da queda do elevador (70m), eletricidade pode ser produzida com turbinas no final dos condutos forçados, porém uma bacia de dissipação da energia da água tem que ser estudada, para não comprometer a segurança das embarcações.

A Tabela 23 tem também estirões em azul. Eles representam o canal de partilha das ligações, em que não ocorre o problema de crescimento do nível da água, porque esse trecho é abastecido de maneira controlada para manter um nível constante. Esse estirão tem o problema inverso do caso ilustrado na Tabela 23, isto é ele se esvazia nas eclusas das extremidades dele, portanto a dificuldade nesse trecho não é de impedi-lo de galgamento, mas de manter o estirão navegável.

ii. Abaixamento do nível da água

Araguaia Paraguai alt1									
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m³)	numero embarcações	volume embarcações (m³)	volume eclusagem (m³)	altura água (m)
trecho 1	49,5	75,5	4,6	296,5122	85247,2575	1	4487,4	34860	2,718931
trecho 2	49,5	75,5	4,6	445,3	128023,75	1	4487,4	34860	3,347451
trecho 3 (elev)	49,5	75,5	4,6	625,2	179745	5	22437	8715	4,577637
trecho 4	49,5	75,5	4,6	344,1	98928,75	1	4487,4	34860	2,979076
trecho 5	49,5	75,5	4,6	218,53	62827,375	1	4487,4	34860	2,047673
trecho 6	49,5	75,5	4,6	219,72	63169,5	1	4487,4	34860	2,061498
canal de parti	49,5	75,5	4,6		0	0	0	0	#DIV/0!
trecho 8	49,5	75,5	4,6	869,59	250007,125	2	8974,8	69720	3,317189
trecho 9	49,5	75,5	4,6	507,22	145825,75	1	4487,4	34860	3,500359
trecho 10	49,5	75,5	4,6	4171,02	1199168,25	11	49361,4	383460	3,12905
Araguaia Paraguai alt2									
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m³)	numero embarcações	volume embarcações (m³)	volume eclusagem (m³)	altura água (m)
trecho 1 (elev)	49,5	75,5	4,6	1818,3	522761,25	5	22437	8715	4,592331
trecho 2	49,5	75,5	4,6	553,6	159160	1	4487,4	34860	3,592486
trecho 3	49,5	75,5	4,6	588,7	169251,25	1	4487,4	34860	3,652556
trecho 4	49,5	75,5	4,6	677,7	194838,75	1	4487,4	34860	3,776981
canal de parti	49,5	75,5	4,6		0	0	0	0	#DIV/0!
Taquari Prado alt1									
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m³)	numero embarcações	volume embarcações (m³)	volume eclusagem (m³)	altura água (m)
trecho 1 (elev)	49,5	88,5	4,6	802,6	254745,24	5	22437	8715	4,584263
Taquari Prado alt2									
	largura fundo canal (m)	largura ao nível de água (m)	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m³)	numero embarcações	volume embarcações (m³)	volume eclusagem (m³)	altura água (m)
trecho 1	49,5	88,5	4,6	1662,91	527807,634	5	22437	174300	3,080924
Taquari Verde									
	largura fundo canal	largura ao nível de água	profundidade (m)	comprimento estirão (m)	volume normal do estirão (m³)	numero embarcações	volume embarcações (m³)	volume eclusagem (m³)	altura água
trecho 1	49,5	88,5	4,6	538,4	170888,16	1	4487,4	34860	3,661632
trecho 2 (elev)	49,5	88,5	4,6	623	197740,2	4	17949,6	6972	4,583781
trecho 3	49,5	88,5	4,6	1068,73	339214,902	3	13462,2	104580	3,181819
trecho 4	49,5	88,5	4,6	3213,3	1019901,42	10	44874	348600	3,02773
trecho 5	49,5	88,5	4,6	662,6	210309,24	2	8974,8	69720	3,075046
trecho 6	49,5	88,5	4,6	2640,3	838031,22	8	35899,2	278880	3,069212
trecho 7	49,5	88,5	4,6	923,2	293023,68	2	8974,8	69720	3,505508
canal de parti	49,5	88,5	4,6		0	0	0	0	#DIV/0!
trecho 9	49,5	88,5	4,6	1446,7	459182,58	4	17949,6	139440	3,203118
trecho 10	49,5	88,5	4,6	1183,29	375576,246	3	13462,2	104580	3,31912
trecho 11	49,5	88,5	4,6	1201,2	381260,88	3	13462,2	104580	3,338218

Tabela 24:Variação do nível de água nos estirões por subida das embarcações.

$$altura\ água = \frac{(volume\ normal\ de\ estirao - volume\ eclusagem) \times 2 \times comprimento\ de\ estirao}{largura\ fundo\ canal + largura\ ao\ nivel\ agua}$$

Essa Tabela 24 ilustra o fato de que quando uma embarcação sobe no estirão a montante graças a uma eclusa, ele entra na eclusa, depois a câmara se enche com a água do estirão de montante. Portanto, essa etapa leva a um abaixamento do nível de água desse trecho de canal. A Tabela 24, na última coluna calcula o altura da água no canal na situação em que nenhuma embarcação vai de montante para jusante. Ora, o comboio tipo tem um calado de 2,70 m com um pé de piloto de 0,30 cm. Então, se a altura da água é inferior à 3 m a embarcação não vai poder entrar no trecho e se houver uma embarcação esperando nesse estirão, ela sentaria no fundo do canal (para que essa situação acontece esse navio tem que esperar a subida de duas embarcações).

Segundo a Tabela 24, a alternativa 1 da interligação Araguaia Paraguai é preocupante, porque têm quatro estirões que não permitem a operação de enchimento da eclusa de jusante deles a partir do nível de projeto da água. Por exemplo, no fim da primeira ocorrência do enchimento da eclusa de jusante do estirão 5, o nível da água no trecho é de 2,04m: falta 0,96m para garantir a navegação no final da operação. Portanto, esse estirão precisa de um abastecimento externo para ser usado, um sistema de reservatório e bombas tem que ser instalado.

Além disso, pode-se observar que nessa alternativa os trechos têm um problema de esvaziamento para subir neles e, ao contrário, de inundação para descer. Então, nesses trechos a

solução de alargamento do canal não é relevante. Portanto, tem-se que usar um sistema de reservatório. Quando uma embarcação desce, a água que sai do canal tem que ser extravasada em um reservatório, que vai abastecer o estirão de jusante no caso de uma falta de água, e assim por diante, o mais alto sendo abastecido pelo canal de partilha (nesse exemplo da interligação Araguaia - Paraguai).

Também, na Tabela 24 a coluna “número embarcações” é a quantidade de embarcações que podem subir no trecho com um nível de água suficiente sem abastecimento externo ou da eclusa de montante.

c. Conclusão:

A água é difícil de controlar porque ela não vence a gravidade por energia própria. Essa característica leva a todas as dificuldades de um projeto de canal e é isso que o faz tanto interessante. Senão seria um projeto de estrada ...

III. Conclusão

Essa segunda parte do trabalho foi a ocasião de fazer as propostas de traçados dos canais de interligação entre os rios do projeto. Uma análise da topografia do terreno permitiu fazer várias propostas para cada interligação. Para cada interligação, obras de transposição foram propostas em função do perfil longitudinal do terreno natural. Uma vez os traçados das ligações identificados, foi feito o dimensionamento desses canais levando em conta o comboio-tipo e a geologia do local.

Depois disso foi feito um orçamento geral para poder escolher entre as diferentes alternativas propostas. Esse orçamento incluiu somente os movimentos de terra, as obras de transposição e as obras de cruzamento com as estradas existentes. É importante notar que os custos obtidos são muito altos e que esse projeto necessitaria de um investimento importante.

Julga-se que o objetivo foi alcançado em nível conceitual.

Porém alguns problemas ainda precisam ser resolvidos. A altura máxima da água nos canais em função das aberturas dos eclusas deve ser determinada mais precisamente. Existe também um problema ligado ao abastecimento de água: estimar a quantidade de água disponível pelas fontes propostas e propor a localização dos reservatórios, além de dimensioná-los.

Também, num projeto detalhado, o impacto ecológico deve ser estudado. As consequências sobre a fauna e a flora devem ser identificadas e quantificadas, tentando minimizá-las.

IV. Referências

São Paulo. Departamento Hidroviário e Administração da Hidrovia do Paraná “Normas de tráfego na hidrovia Tietê-Paraná e seus canais”, São Paulo 2012.

PIANC. “Canais de Acesso, Um Guia para Projetos”, PTC II-30, Suplemento ao Boletim nº95, 1997.

PIANC. “Elément de Normalisation du Dimensionnement des Voies Navigables de la Classe V^b en Canal”, CTP I, Rapport du Groupe de Travail 20 Supplément au Bulletin nº101, 1999.

MACEDO, E. L. “Método de cálculo de cubagem : Disponível em:
<http://www.topografiageral.com/Curso/capitulo%2018.php>. Acesso em: 12/04/2014

PONTES FILHO, Glauco, “Estradas de rodagem - Projeto Geométrico”. São Carlos, 1998.

SGTE-LASA Consórcio. “Vias navegáveis interiores do Brasil”. DNPVN, 1968.

Plano Nacional das Vias Navegáveis Interiores (PNVNI), Gabaritos propostos, 1989. Disponível em:
<http://www2.transportes.gov.br/Modal/Hidroviario/ESTATISTICA/Gabaritos.htm>. Acesso em: 12/04/2014

- Em relação à parte Preços:

Website sobre o elevador de Strépy-Thieu (em francês). Disponível em:
<http://www.foudurail.org/divers/thieu1.html>. Acesso em: 12/04/2014

“Pont-canal du Sart à LA Louvière”, Artigo do escritório de engenharia civil GREISH. Disponível em:
<http://www.greisch.com/upload/projets/2480/FR-2480.pdf?PHPSESSID=76f989f5ea8810c73e31a9841c05caab>. Acesso em: 12/04/2014

Tabela de preços unitários, Departamento de Estradas de Rodagem, Versão A, 30 junho 2014. Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/website/Documentos/tabela_preco.aspx. Acesso em: 12/04/2014

“As Eclusas da Hidrelétrica de Tucuruí”, Artigo de blog de PAULO CEZAR, novembro 2010, Disponível em: <http://advivo.com.br/blog/paulo-cezar/as-eclusas-da-hidreletrica-de-tucuru>. Acesso em: 12/04/2014

Artigo “Governo planeja construir 27 eclusas”, Amazônia, 20 abril 2012. Disponível em:
<http://amazonia.org.br/2012/04/governo-planeja-construir-27-eclusas/>. Acesso em: 12/04/2014

Página Wikipédia do Túnel de Marão. Disponível em:
http://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%BAnel_do_Mar%C3%A3o. Acesso em: 12/04/2014

Pesquisa de preços unitários para obras civis, Capex.

- Em relação ao dimensionamento

ALFREDINI, P.& ARASAKI, E. “Engenharia portuária”. São Paulo: *Editora Edgard Blücher*, 2014. 776p.

CPRM Serviço Geológico do Brasil. “Mapas editados”. Disponível em <geobank.sa.cprm.gov.br>. Acesso em: 25/09/2014.

LOBO, A.S; FERREIRA, C. V; RENOFIO, A. “Muros de arrimo em solos colapsáveis provenientes do arenito Bauru: problemas executivos e influência em edificações vizinhas em áreas urbanas”. **Acta Scientiarum - Technology**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 169 – 177, 2003.

FERREIRA, P. M. V. “Estudo de um solo residual de arenito da rodovia RS 239 – ensaios triaxiais servo-controlados”. Porto Alegre: *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 1998. 90p.

MASSAD, F. Obras de Terra: “Curso básico de Geotécnia”;São Paulo: Oficina de Textos. 2003. 216p.

PERRAZOLO, L. “Estudo geotécnico de dois taludes da formação Serra Geral”. Porto Alegre: *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2003. Disponível em <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3584/000402204.pdf?sequence=1>> Acesso em: 20/10/2014.

Brasil. Ministério de Transporte. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Divisão de Capacitação Tecnológica. “Manual de pavimentação”.Rio de Janeiro.1996. 327p.

SOARES, J.M.D. et al. “Estudo da estabilidade de encosta em área urbana no município de Santa Maria – RS”. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), 3. Rio de Janeiro. **Anais**

TABALIPA, N. L.; FIORI A. P. “Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do Rio Ligeiro (PR)”.**Geociências**, São Paulo v.27 n.3 jul./set. 2008.

THÁ, P.D.C. “Estudo das condições de fluxo pela barragem de terra da margem esquerda de Itaipu”. Rio de Janeiro: *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro*, 2007. Disponível em <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11080/11080_4.PDF>. Acesso em: 21/10/2014.

VOGT, V.; YOMURA, D. Notas de aula “Introdução ao GeoStudio/GeoSlope”. Curitiba: *Universidade Federal do Paraná*, 2001.

Disponível em <http://www.cesec.ufpr.br/docente/andrea/TC066/Aula_sobre_GeoSlope.pdf>. Acesso em: 24/10/2014.