



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES - PETRAN**

**PEDRO ALMI DA COSTA FREIRE**

**MÉTODO DE SELEÇÃO DE FAIXA PARA ESTUDO DE TRAÇADO PARA OBRAS  
LINEARES DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES**

**FORTALEZA**

**2014**

**PEDRO ALMI DA COSTA FREIRE**

**MÉTODO DE SELEÇÃO DE FAIXA PARA ESTUDO DE TRAÇADO PARA OBRAS  
LINEARES DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES**

Dissertação submetida à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.  
Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

**FORTALEZA**

**2014**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

---

F934mFreire, Pedro Almi da Costa.

Método de seleção de faixa para estudo de traçado de obras lineares / Pedro Almi da Costa Freire. – 2014.

71 f. : il. enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2014.

Área de Concentração: Gerência de Pavimentos.

Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

1. Transportes. 2. Ferrovias - Projeto. 3. Projeto Geométrico. I. Título.

**PEDRO ALMI DA COSTA FREIRE**

**MÉTODO DE SELEÇÃO DE FAIXA PARA ESTUDO DE TRAÇADO PARA OBRAS  
LINEARES DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES**

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes. Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.

Aprovado em: 08/12/2014

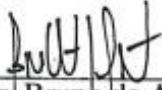
**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)

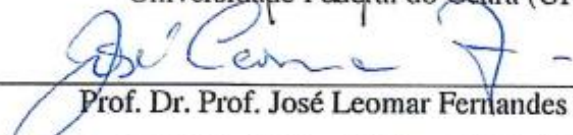
Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

Universidade Federal do Ceará (UFC)



---

Prof. Dr. Prof. José Leomar Fernandes Júnior

Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESCUSP)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por possibilitar a realização desta Dissertação

Ao meu orientador Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior pela essencial orientação.

A minha família pelo apoio e incentivo constante.

A meu filho por cada sorriso e carinho que me motiva a continuar meu trabalho.

A Kely Regina por todo apoio e auxílio na elaboração dos estudos.

À HG Consultoria e Engenharia na pessoa do Engenheiro Helder Girão por acreditar no meu trabalho e incentivar o aprofundamento acadêmico.

Aos colegas de trabalho Israel, Artur, Luan por ajudarem diretamente na realização da pesquisa.

## RESUMO

O estudo de traçado para obras lineares apresenta-se como um tema de suma importância nas fases de concepção e definição das diretrizes a serem estudadas para elaboração de projetos de infraestrutura de transportes.

A definição do traçado de uma via deve ser feita observando o resultado do estudo das alternativas de traçado e a comparação entre elas, matematicamente existem infinitas possibilidades de alternativas de traçado entre pontos sucessivos o que dificulta a escolha de uma única solução.

A dificuldade em se definir critérios e parâmetros objetivos para determinação de uma área de estudo e conseqüentemente a melhor alternativa de traçado motivou o estudo apresentado.

As análises de traçado atuais se limitam a diretrizes pré-estabelecidas em um número reduzido, o que pode induzir a escolhas de traçados que conduzam a custos mais elevados e às condições de operação e manutenção indesejadas para a futura via.

Propõe-se um método de definição da melhor faixa para estudo de traçado para obras de infraestrutura de transporte tomando como base dados topográficos, considerando custos de implantação e de operação.

O método sugerido consiste na varredura tridimensional da região onde se insere a obra em estudo, apontando as melhores faixas para desenvolvimento do projeto baseando-se na topografia, considerando características geométricas do projeto, áreas de restrição, custos de implantação e de operação.

O método de seleção proposto foi aplicado em uma variante ferroviária de oito quilômetros, onde foram analisadas 729 alternativas e definida a melhor faixa para o estudo de traçado.

Os resultados foram comparados ao projeto executivo e feitas as mesmas considerações utilizadas no projeto o que demonstraram a viabilidade da metodologia.

Palavras Chave: Estudo de traçado, Projeto Geométrico, Projeto Ferroviário, Obras lineares.

## **ABSTRACT**

The study of horizontal alignment for linear works presented is an issue of paramount importance in the design and definition of the guidelines to be studied for the preparation of transport infrastructure projects.

Setting the tracing of a track must be made observing the result of the study of alignment alternatives and comparing them, mathematically there is infinite possibilities for alignment alternatives between successive points making it difficult to choose a single solution.

The difficulty in defining criteria and objective parameters for determining an area of study and therefore the best alternative route led the study presented.

The current trace analysis is limited to pre-set guidelines on a limited number, which can induce choices paths leading unwanted higher costs and operating and maintenance conditions for future route.

It is proposed a better range setting method for the study of horizontal alignment for transport infrastructure projects based on topographic data considering deploying and operating costs.

The suggested method is the three-dimensional scan of the region which includes the work under study, pointing out the best tracks for development based on the topography design, considering geometric characteristics of the project, restriction areas, deployment and operating costs.

The proposed selection method was applied in a railway variant of eight kilometers, where 729 alternatives were analyzed and then set the best track for the study of horizontal alignment.

The results were compared to the executive project and the same considerations used in the project were made which demonstrated the feasibility of the methodology.

**Keywords:** Horizontal Alignment, Geometric Design, Rail Project, Linear Works.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Contexto e justificativa.....	14
1.2 Definição do problema de pesquisa .....	16
1.3 Objetivos .....	17
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	17
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	17
1.4 Metodologia da pesquisa.....	17
1.5 Organização da estrutura do trabalho .....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Projeto de obras lineares de infraestrutura .....	20
2.1.1 <i>Projeto de rodovias</i> .....	21
2.1.2 <i>Projeto de ferrovias</i> .....	21
2.2 Práticas atuais em estudo de traçado para obras lineares .....	22
2.3 Principais técnicas utilizadas em estudos de traçado .....	25
2.4 Critérios para escolha de traçado .....	30
3 PROPOSTA .....	37
3.1.1 <i>Modelagem das alternativas</i> .....	50
3.1.2 <i>Modelo de relatórios de volumes de terraplenagem</i> .....	50
3.1.3 <i>Modelo de relatórios de características geométricas</i> .....	51
3.1.4 <i>Parâmetros para hierarquização</i> .....	53
3.1.5 <i>Coefficientes de traçado</i> .....	53
3.1.6 <i>Coefficiente de traçado</i> .....	56
4 ESTUDO DE CASO .....	59
4.1 Apresentação .....	59
4.2 Aplicação da metodologia proposta .....	61
4.3 Modelagem das alternativas .....	64
4.4 Relatórios de volumes de terraplenagem.....	65
4.5 Relatórios de características geométricas.....	66

4.6 Coeficiente de traçado de implantação.....	67
4.7 Coeficiente de traçado de operação.....	67
4.8 Coeficiente de traçado.....	68
5 CONCLUSÃO.....	71
5.1 Considerações finais.....	71
5.2 Benefícios da abordagem proposta.....	71
5.3 Limitações do estudo.....	71
5.4 Sugestões para estudos futuros.....	71
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Otimização do alinhamento vertical .....	25
Figura 2- Geração dos alinhamentos verticais e horizontais por localização dos pontos de controle .....	26
Figura 3 - Modelo de resolução por estágios .....	27
Figura 4 - Ilustração do algoritmo de Dijkstra após 5 nós solucionados. ....	27
Figura 5 – Matriz de decisão inicial .....	28
Figura 6 - Tela de abertura do Global Mapper.....	37
Figura 7 – Tela de abertura do PowerCivil do pacote Inroads da Bentley.....	38
Figura 8 - Determinação da diretriz primária.....	40
Figura 9 - Opções de caminhos entre dois pontos.....	41
Figura 10 - Cálculo do azimute entre os pontos em estudo.....	41
Figura 11 - Alternativas pelo lado esquerdo .....	42
Figura 12 - Alternativas pelo lado direito. ....	42
Figura 13 - Cálculo dos pontos para formação da malha de alternativas.....	43
Figura 14 - Montagem da malha de alternativas .....	44
Figura 15 - Malha de pontos para montagem das alternativas. ....	45
Figura 16 – Montagem de alternativas. ....	46
Figura 17 - Alternativa sem curvas horizontais. ....	47
Figura 18 - Alternativa com curvas horizontais .....	47
Figura 19 - Exemplo de todas as alternativas possíveis para um estudo.....	48
Figura 20 - Alternativas após verificação da área de restrição.....	48
Figura 21 - Exemplo de um alinhamento vertical .....	49
Figura 22 - Exemplo de uma seção tipo. ....	50
Figura 23 - Modelo do relatório de volume de terraplenagem.....	51
Figura 24 - Modelo de relatório de alinhamento horizontal.....	52
Figura 25 - Modelo do relatório de alinhamento vertical.....	52
Figura 26 – Diagrama da metodologia .....	58
Figura 27 - Nova Transnordestina.....	59
Figura 28 - Trecho para estudo de caso.....	61
Figura 29 - Aplicação da metodologia no estudo de caso .....	62
Figura 30 - Início dos trabalhos de lançamento das alternativas.....	62
Figura 31 – Seção tipo.....	65

Figura 32 - Melhores alternativas de traçado sem considerar áreas de restrição .....	70
Figura 33 - Melhores alternativas de traçado considerando áreas de restrição .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação de alternativas de traçado em diversos países.....	30
Tabela 2 – Custos comparados dos modais rodoviário e ferroviário no Brasil, por tonelada-quilômetro útil em 2009. ....	32
Tabela 3 – Atrito de rolamento em função da rampa – rodovias. ....	32
Tabela 4 – Atrito de rolamento em função da rampa – ferrovias.....	33
Tabela 5 - Conversão entre Rumo e Azimute. ....	42
Tabela 6 - Determinação das coordenadas dos pontos da malha de alternativas. ....	44
Tabela 7 - Características técnicas do projeto extraídas do projeto executivo elaborado pela HG Consultoria e Engenharia. ....	60
Tabela 8- Pontos calculados para montagem das alternativas .....	64
Tabela 9 - Resultados obtidos para volumes de terraplenagem .....	66
Tabela 10 - Resultados obtidos para comprimento virtual.....	66
Tabela 11 - Resultados do coeficiente de traçado de implantação.....	67
Tabela 12 - Resultados do coeficiente de traçado de operação .....	68
Tabela 13 - Resultados do coeficiente de traçado .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo são descritas todas as etapas desenvolvidas a partir do projeto de pesquisa, as quais serviram de base para a realização da presente Dissertação elaborada em seis capítulos.

### 1.1 Contexto e justificativa

A infraestrutura de transporte e sua disponibilidade apresentam-se como uma condição importante para o crescimento econômico de uma nação. Tal condição torna-se ainda mais importante para um país com grande área e faixa litorânea extensa como é o caso do Brasil.

O crescimento econômico do Brasil coloca o tema infraestrutura de transporte em evidência, atraindo uma maior quantidade de investimentos públicos e privados para esta área. Os aportes de recursos previstos apontam para investimentos maiores nos setores de infraestrutura de transporte, como pode ser observado a seguir.

“Na comparação dos aportes de recursos públicos e privados referentes aos quadriênios de 2008-2011 e 2013-2016, o setor de transportes apresenta as taxas mais elevadas de crescimento em relação a outros segmentos de infraestrutura. É esperado que, no quadriênio 2013-2016, os investimentos em transportes cheguem a R\$ 179 bilhões, um crescimento de 123% em relação aos R\$ 80 bilhões do período 2008-2011. Apenas como comparação, o crescimento dos investimentos para os setores de energia elétrica, telecomunicações e saneamento foi, respectivamente, 3%, 20% e 23%” (GARCIA, 2014).

Com este cenário de altos investimentos, as obras de infraestrutura carecem de estudos prévios que definam a qualidade e os custos dos empreendimentos a serem implantados. Dentre os estudos que precedem os projetos e conseqüentemente as obras, encontra-se o estudo de traçado, que desponta como uma etapa de fundamental importância para a realização dos projetos de obras lineares de infraestrutura de transporte.

As infraestruturas relacionadas às vias de transportes possuem características próprias que as diferenciam das demais. Geralmente tais obras apresentam uma das dimensões significativamente superior as demais, fato que justifica a denominação de obras lineares de infraestrutura de transportes ou simplesmente obras lineares. Neste trabalho, esse termo será adotado para as obras com as características supracitadas.

O estudo de traçado de uma obra linear pode ser definido com a investigação dos caminhos possíveis por onde se desenvolverá a via em estudo, sendo representado pelo conjunto de formas geométricas (tangente, curvas, etc.) interligadas que caracterizam a obra.

Denomina-se traçado de uma obra linear o conjunto de segmentos que representam o eixo da mesma, relacionando a sua posição espacial. Para definição do traçado devem ser considerados vários fatores que influenciarão na decisão do melhor caminho a se desenvolver o projeto.

O traçado horizontal consiste de uma série de trechos retos (tangentes) e curvas circulares, com ou sem transição. Uma forma de definir o traçado é acomodar as tangentes no terreno em função da topografia e demais obstáculos existentes e depois concordá-las por meio de curvas (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

Após a definição do traçado horizontal, define-se o traçado considerando as características altimétricas, o que chama-se de perfil longitudinal. De acordo com Lee (2000), no projeto em perfil, o objetivo principal é definir a geometria da linha que corresponde ao eixo da rodovia, representada no plano vertical e denominada de greide da rodovia .

O traçado é estudado considerando as três dimensões sendo decompostos para melhor entendimento em planta baixa, perfil longitudinal e seções transversais, a junção desses três elementos caracteriza a estrada tridimensionalmente. Atualmente os *softwares* permitem o desenvolvimento de projetos nas três dimensões, entretanto a decomposição em planos facilita os estudos e apresentação do projeto.

A eficiência nos estudos de traçado garante não somente maior rapidez e qualidade na elaboração dos projetos, como também proporciona redução nos diversos tipos de impactos (ambientais, sociais, etc.) e custos de implantação e operação do empreendimento.

Para efetuar uma avaliação de quão melhor será a escolha de uma região em detrimento de outra é necessário estabelecer parâmetros para avaliação. A proposição de uma metodologia que toma como base a conformação topográfica de toda a região a ser estudada, busca auxiliar a análise das potenciais áreas a serem exploradas e aos resultados serão agregados os custos de implantação e de operação para os vários cenários, sendo assim possível comparar os resultados analisados.

Muitos dos problemas enfrentados nas grandes obras de infraestrutura de transportes no país decorrem das fases iniciais de estudos e projetos, tal fato pode ser observado na publicação da CNI (2014) onde foram analisadas 6 grandes obras de infraestrutura no Brasil e apontados os motivos de atraso. Em cinco das seis obras analisadas verificou-se problemas nos projetos elaborados, tal fato aponta para uma deficiência no setor de projetos nacional. Os projetos são

elaborados num prazo insuficiente e com poucos dados, não considerando todos os estudos iniciais necessários. Negligenciar os estudos iniciais em um projeto pode acarretar em uma economia inicial de recursos, porém tal feito se torna insignificante quando comparada aos maus resultados obtidos por erros e correções durante a execução das obras em função de projetos elaborados com base em estudos menos aprofundados.

## **1.2 Definição do problema de pesquisa**

Uma das primeiras tarefas ao se iniciar estudos para elaboração de um projeto de uma obra linear é a definição da região a ser estudada para o desenvolvimento do traçado. Entende-se por traçado o segmento imaginário que representa o eixo da via, tal segmento é caracterizada pelas suas propriedades tridimensionais, geralmente dividido em elementos planimétricos e altimétricos.

O estudo de traçado é dividido em três fases: reconhecimento, exploração e projeto.

Denomina-se fase de reconhecimento para estudos de traçado a etapa que trata do levantamento e análise de dados da região necessários à definição dos locais por onde a estrada possa passar. Nesta fase são detectados os principais obstáculos topográficos, geológicos, hidrológicos e escolhidos locais para o desenvolvimento de anteprojetos. A partir dessas informações todas as demais etapas que compõem o projeto serão desenvolvidas, o que demonstra claramente a importância de se evoluir nesse tema.

A dificuldade enfrentada pelos projetistas para a definição da faixa para o reconhecimento das alternativas de traçado para um projeto de uma obra linear é a principal questão que motivou o presente estudo.

Diante da importância de se estudar de forma mais segura e objetiva as regiões onde serão examinadas as alternativas de um traçado para obras lineares, deparam-se os projetistas com a escassez de metodologias ou técnicas que possam assegurar uma avaliação mínima e coerente, relativa à qualidade das alternativas e conseqüentemente do traçado definitivo.

Com a evolução computacional e o desenvolvimento de *softwares* que permitem uma maior velocidade nas análises e cálculos, surge a possibilidade de se desenvolver algoritmos que podem ser utilizados para auxiliar na solução de problemas relacionados as avaliações de traçados.

Diante do cenário exposto, surgem os seguintes questionamentos:

Como definir uma faixa para estudo de traçado com critérios objetivos, se baseando em informações topográficas?

Como correlacionar as alternativas de traçado e as respectivas dificuldades construtivas e operacionais da via.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo Geral***

Elaborar uma metodologia para determinação de uma faixa para o estudo de traçado, considerando custos de implantação e custos operacionais tendo como base os dados topográficos.

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

Como objetivos específicos podem ser destacados:

- a) Analisar as práticas atuais para a realização dos estudos de traçado, observando quais as maiores dificuldades nessa área.
- b) Identificar as principais ferramentas utilizadas para estudo de traçado e quais as inovações nessa área de estudo.
- c) Propor equações de correlação dos custos de implantação e operação da via baseado nas características geométricas e dados topográficos da área em estudo.
- d) Aplicar a metodologia proposta em um projeto existente.
- e) Avaliar a aplicabilidade da metodologia proposta e aferir os resultados obtidos.

## **1.4 Metodologia da pesquisa**

Essa dissertação foi desenvolvida da seguinte forma:

- a) **Revisão Bibliográfica**  
O trabalho teve seu início com o levantamento do material bibliográfico disponível para a execução de projetos. Consultas posteriores foram realizadas em artigos nacionais e internacionais, livros, periódicos internacionais e outras publicações relacionadas ao tema em estudo.
- b) **Coleta de dados**  
Foram verificadas as práticas de estudo atuais através de contatos com profissionais, consulta a empresas do ramo e realizada uma revisão aos conceitos empregados nos estudos de traçado.
- c) **Proposição de uma metodologia**  
De posse de todos os dados e conceitos obtidos nas fases de revisão bibliográfica e coleta de dados, foi concebida uma metodologia para o estudo de traçado utilizando conceitos clássicos aliados a ferramentas computacionais que viabilizaram a aplicação da metodologia.
- d) **Estudo de caso**

A metodologia proposta foi aplicada a um projeto existente referente a uma variante ferroviária com extensão de oito quilômetros, inicialmente não foram aplicadas restrições ao projeto o que resultou em 729 alternativas de traçado, em seguida foram inseridas áreas de restrição conforme o projeto elaborado o que acarretou em uma redução de alternativas, chegando a 45 alternativas de traçado.

e) Conclusões

Com os resultados da aplicação da metodologia e os dados do projeto existente foi possível verificar a aplicabilidade e eficiência da metodologia.

### **1.5 Organização da estrutura do trabalho**

O Capítulo 1 é descrita a estrutura geral desta dissertação, apresentando a importância e o motivo pela opção de estudo do tema proposto. No desenvolver deste capítulo são expostos os objetivos geral e específico do trabalho, a identificação do problema de pesquisa e a descrição sucinta de cada capítulo que faz parte da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre conceitos gerais, metodologias atuais de estudo, ferramentas para subsidiar as avaliações de alternativas de traçado e as necessidades de uma nova metodologia.

No Capítulo 3 é versada a metodologia proposta desde a sua concepção inicial, o desenvolvimento dos trabalhos, os conceitos utilizados e a descrição de todos os procedimentos para a aplicação da proposição da hierarquização de alternativas de traçado, possibilitando assim a definição de uma faixa de estudo.

No Capítulo 4 é descrito o estudo de caso, uma aplicação da metodologia proposta a um trecho ferroviário com extensão de aproximadamente 8 km, no estado de Pernambuco, e os resultados obtidos por consequência da aplicação.

No Capítulo 5 é abordada a avaliação dos resultados e a comparação com a alternativa escolhida no projeto final, corroborando a aplicabilidade do método.

O Capítulo 6 se refere às referências bibliográficas consultadas para a elaboração do trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As obras de infraestrutura de transporte apresentam particularidades quanto a sua extensão, a essas obras denominam-se obras lineares de infraestrutura.

O conceito de obras lineares é definido por obras que apresentam uma de suas dimensões significativamente maior que as demais, ou seja, obras de grande extensão que apresentam peculiaridade tanto na sua concepção, quanto nas demais fases ao longo de sua vida útil. Este tipo de obra geralmente relaciona-se com obras de infraestrutura de transporte.

As principais obras lineares são: ferrovias, rodovias, hidrovias e dutovias.

As obras ditas lineares, assim como todas as demais obras (civil, hidráulica, de transportes, saneamento e mista) podem ser divididas em quatro etapas distintas, cada uma com sua devida importância, são elas: projeto, construção, operação e conservação.

O projeto de uma obra de engenharia deve prever todas as informações possíveis para a realização da obra, as informações devem ser claras e exequíveis. As soluções devem atender não somente a obra propriamente dita, mas deve considerar as interações com elementos adjacentes, métodos executivos, interferências ambientais e sociais entre outras peculiaridades.

O projeto de uma obra de engenharia de transporte, assim como as demais obras, deve ser o mais abrangente possível, de fácil entendimento, perfeitamente exequível para as condições vigentes, com identificação e solução dos prováveis problemas, observar a padronização conforme as normas estabelecidas, conter todos os elementos quantitativos, qualitativos e técnicos nos níveis de detalhamento ideal para a sua melhor e perfeita execução.

“O conceito de projeto deixa longe a ideia de um conjunto de normas e disposição para atender a uma geometria conveniente, em planta e perfil, resultando em dados adequados à topografia da região e à demanda de tráfego por um determinado período” (SENÇO,2008, p.21).

O projeto é composto de desenhos em escala conveniente, esquemas, gráficos, planilhas, e relatórios. Devendo observar padronização conforme normas estabelecidas para cada serviço, deve ainda apresentar de forma organizada as quantidades previstas por intermédio de memória de cálculo, especificações que garantam a qualidade dos materiais e nível de detalhamento ideal para a sua melhor e integral aplicação, conforme exigido pelo proprietário do projeto.

No caso das obras de infraestrutura de transporte, além dos cuidados com os elementos da obra propriamente dita, devem ser considerados elementos adjacentes que sofrerão impactos diretos ou indiretos decorrentes da implantação ou até mesmo do processo construtivo empregado, a experiência mostra que negligenciar os elementos do entorno da área de implantação se reflete

em problemas enfrentados na fase de execução, chegando ao ponto de inviabilizar a execução dos empreendimentos.

## **2.1 Projeto de obras lineares de infraestrutura**

Atualmente o conceito de projeto, antes termo utilizado em sua maior parte para engenharia, ganhou uma atenção maior passando a ser utilizado de forma mais ampla gerando assim vários conceitos na literatura atingindo as diversas áreas do conhecimento.

Para Dinsmore (2004), o projeto é um esforço temporário realizado para criar um produto ou serviço único, diferente, de alguma maneira, de todos os outros produtos e serviços, com início e fim definidos, que utiliza recursos, é dirigido por pessoas e obedece a parâmetros de custo, tempo e qualidade.

Na visão de Heldman (2006), um projeto é um empreendimento temporário, com datas de início e término definidas, que tem por finalidade criar um produto ou serviço único e que está concluído quando suas metas e objetivos forem alcançados e aprovados pelos interessados.

Assalim (2010) diz que o projeto cria um produto, serviço ou resultado exclusivo, mesmo que alguns elementos repetitivos possam estar presentes em várias entregas do projeto, essa repetição não muda a singularidade fundamental do trabalho do projeto.

“Essa característica de unicidade dos projetos lhes confere um determinado grau de incerteza. Devido a isso, os projetos geralmente são divididos em fases para facilitar sua concepção e gerenciamento” (ASSALIM, 2010, p. 31).

O projeto de uma obra de engenharia deve prever todas as informações possíveis para realização da obra, as informações devem ser claras e exequíveis. As soluções devem atender não somente a obra propriamente dita deve considerar as interações com elementos adjacentes, métodos executivos, interferências ambientais e sociais entre outras peculiaridades.

O projeto de uma obra de Engenharia de Transportes, assim como as demais obras, deve ser o mais abrangente possível, de fácil entendimento, perfeitamente exequível para as condições vigentes, com identificação e solução dos prováveis problemas, observar padronização conforme normas estabelecidas, conter todos os elementos quantitativos, qualitativos e técnicos nos níveis de detalhamento ideal para a sua melhor e perfeita execução.

“O conceito de projeto deixa longe a ideia de um conjunto de normas e disposição para atender a uma geometria conveniente, em planta e perfil, resultando em dados adequados à topografia da região e à demanda de tráfego por um determinado período” (SENÇO, 2008, p.21).

### ***2.1.1 Projeto de rodovias***

O DNIT, departamento nacional de infraestrutura de transportes, elaborou em 2010 um documento denominado “DIRETRIZES BÁSICAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS RODOVIÁRIOS ESCOPOS BÁSICOS/INSTRUÇÕES DE SERVIÇO”, nele estão contidas as premissas básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários, além disso, outros manuais também servem de auxílios para os projetos rodoviários nacionais: Manual de Pavimentação, Manual de Drenagem, Estudo de Tráfego, Custos, Sinalização, etc.

O projeto de uma rodovia é elaborado partindo de uma necessidade de ligar dois pontos de interesse, sejam eles interesses sociais, industriais, turísticos, ambientais, entre outros. Definindo-se os pontos a serem atendidos pela rodovia a ser projetada, serão efetuados os estudos que subsidiarão a elaboração do projeto, os estudos são: topográfico, traçado, geológico, geotécnico, hidrológico, ambiental e de viabilidade.

Após a elaboração dos estudos os resultados alimentarão diretamente as disciplinas que compõe o projeto que são: geométrico, terraplenagem, drenagem, obras de artes corrente, sinalização, obras complementares, remanejamento de interferências, pavimentação, obras de artes especiais, interseções, retornos e acessos, paisagismo, defensas e barreiras, cercas, desapropriação, orçamento das obras, plano de execução da obra e componente ambiental de projetos de engenharia rodoviária.

### ***2.1.2 Projeto de ferrovias***

O projeto de uma obra ferroviária, também conhecida como via permanente, apresenta características similares aos projetos rodoviários, entretanto alguns projetos merecem atenção especial em virtude das diferentes características entre cada modal.

Os projetos ferroviários no Brasil são geridos pela VALEC e DNIT, atualmente as diretrizes básicas para a elaboração de projetos ferroviários não apresentam nível de detalhamento suficiente para subsidiar os projetistas na execução dos projetos ferroviários

O DNIT em 2012 lançou a consulta pública sobre as instruções de serviços ferroviários, a fim de obter contribuições de entidades técnicas especializadas na área ferroviária, objetivando a futura aprovação dos documentos.

A VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A., possui especificações, instruções normativas e outros documentos para orientar os projetos ferroviários.

Como exposto anteriormente, não existe uma unanimidade no que se refere a normas e instruções de serviços para projetos ferroviários. Os projetos ferroviários nacionais carecem de documentos mais claros e definitivos.

Sem um esforço de todos os envolvidos nos projetos ferroviários para que sejam elaboradas diretrizes gerais, o setor ferroviário continuará enfrentando dificuldades de aprovação e entendimento entre projetistas e analistas e conseqüentemente na execução das obras.

## **2.2 Práticas atuais em estudo de traçado para obras lineares**

Na literatura técnica existe um consenso a respeito da importância do estudo de traçado para as obras lineares de infraestrutura. No entanto, quando se busca informações para melhorar a qualidade dos traçados pouca informação é disponibilizada para utilização.

É comum na engenharia nos departamentos com metodologias para realização de estudos, projetos, serviços e obras o que não ocorre no caso específico do estudo de traçado.

Ao longo do desenvolvimento dos estudos o traçado poderá sofrer modificações em virtude de dificuldades técnicas como: topografia desfavorável; áreas com solos de baixa capacidade de suporte; impedimentos ambientais; restrições de caráter sociais; entre outros. As modificações quando ocorrem devem manter os requisitos iniciais. A intenção destas modificações deve ser a de minimizar custos de implantação e/ou de operação da via, melhorando seu desempenho econômico e minimizando os impactos ambientais e sociais.

De acordo com Mattos (2006, p. 3)

“...os estudos de traçados levam à determinação da posição de uma rodovia sobre o terreno. Assim, deve-se levar em consideração a necessidade de adequado padrão técnico, econômico, operacional e de integração com o meio ambiente, tendo em vista as necessidades de segurança, conforto e conveniências do usuário.”

Lee (2005, p. 25) define estudo de traçado como sendo:

“Uma das fases preliminares, que antecede os trabalhos de execução do projeto geométrico propriamente dito, é a constituída pelos estudos de traçado, que tem por objetivos principais a delimitação dos locais convenientes para a passagem da rodovia, a partir da obtenção de informações básicas a respeito da geomorfologia da região, e a caracterização geométrica desses locais de forma a permitir o desenvolvimento do projeto pretendido.”

Segundo Pontes Filho (1998, p. 3) o estudo de traçado “tem por objetivo principal o levantamento e a análise de dados da região necessários à definição dos possíveis locais por onde a estrada possa passar”.

Costa e Figueiredo (2001) consideram os estudos topográficos como os mais importantes dentre os estudos necessários para implantação ou melhoria de uma estrada. Tal afirmativa deve-se ao fato de que os estudos resultam nos elementos fundamentais para a elaboração do projeto geométrico, espinha dorsal do projeto de uma estrada.

Pimenta e Oliveira (2004) mencionam que o projeto geométrico é a parte do projeto de estradas que estuda as diversas características geométricas do traçado em função das leis do movimento, do comportamento dos motoristas, das características de operação dos veículos e do tráfego, de maneira a garantir uma estrada segura, confortável e eficiente, com o menor custo possível não só de construção, mas durante a vida em serviço

DNIT (2006), em sua Instrução de Serviço 207 estabelece que o Estudo de Traçado seja composto das seguintes tarefas: definir as diretrizes tecnicamente possíveis da rodovia; determinar a viabilidade física das alternativas indicadas como sendo a adequada pelos estudos de tráfego para a ligação rodoviária proposta; definir certas soluções básicas para a elaboração dos trabalhos mais detalhados nos estudos posteriores do projeto final; estimar os custos aproximados de construção e de desapropriação para fins de avaliação econômica e financeira.

O órgão prevê uma avaliação preliminar comparativa, onde as alternativas operacionais e de traçado são comparadas entre si seguindo critérios técnicos, funcionais, econômicos, ambientais e financeiros. Esta avaliação busca reduzir as soluções básicas para que sejam estudadas em maior profundidade no anteprojeto, constituindo-se da fase definitiva dos estudos preliminares.

Segundo Corteletti (2009) define que o traçado ideal não é função apenas da menor distância geográfica, mas também da maior viabilidade técnica, econômica e ambiental. Entretanto, não existe uma metodologia consolidada, capaz de conciliar todas as ferramentas mais relevantes para determinação de traçados.

Definir o traçado de uma obra linear é a atividade inicial de onde surgirão todos os demais estudos e projetos, qualquer decisão equivocada nesta fase acarretará em retrabalhos e prejuízos financeiros e atrasos no andamento do projeto. As fases de anteprojeto ou projeto conceitual necessitam de ferramentas que auxiliem na decisão de qual faixa deverá ser estudada, a busca por parâmetros que permitam a decisão da região a ser explorada é o objetivo deste estudo.

Os traçados atualmente são estudados e desenvolvidos com base em observações subjetivas, não existindo um parâmetro que permita aos tomadores de decisão optar por uma das

alternativas estudadas com objetividade, mesmo quando são feitas alternativas de traçado e seus comparativos de custos, não é possível garantir que não existam opções mais viáveis, ficando assim a qualidade dos estudos dependendo da experiência e habilidade dos projetistas e analistas.

Os projetistas de estradas convivem com inúmeras solicitações por parte de proprietários de projetos para apresentarem argumentos que justifiquem a escolha de áreas para exploração e determinação dos traçados durante a fase de estudos para projetos de infraestrutura de transporte. Tais solicitações são mais frequentes em projetos ferroviários de carga onde existe a necessidade de se evitar núcleos urbanos e áreas de interesse especial, além das maiores exigências geométricas em virtude das características do transporte ferroviário.

Para a determinação do espaço onde serão desenvolvidos os estudos topográficos faz-se necessário definir parâmetros básicos, tais como: ponto inicial e final, pontos obrigatórios de passagens, áreas de restrição, classe do projeto; entre outros.

No caso mais simples de estudo, admitindo-se um ponto inicial e um final, existem infinitas alternativas de ligação entre esses pontos, matematicamente seria impossível uma varredura completa das alternativas, tal fato demonstra a complexidade da análise, isto posto observa-se a necessidade de se aplicar condições de contorno para que a análise atenda às questões práticas.

Na prática são solicitadas algumas poucas alternativas de traçado com suas respectivas justificativas, com quadros resumos que possam ilustrar as vantagens e as desvantagens de cada opção. Com os softwares disponíveis, torna-se mais fácil aferir as informações, ao mesmo tempo em que estas possibilitam aos analistas de projeto sugerir mais opções para um traçado, sendo assim as análises e comparações podem se estender em virtude do infindável número de hipóteses sugeridas para o trecho em estudo, o que atrasa a elaboração e aprovação do projeto.

Uma escolha inadequada de uma faixa para estudos acarretará na necessidade de levantamentos complementares ou, num caso mais extremo, toda área levantada poderá ser desprezada, gerando assim acréscimo no tempo de elaboração do projeto e onerando os custos dos estudos.

Pode-se observar que o custo de estudos topográficos tem peso considerável em projetos ferroviários, analisando o Editais de concorrência nº 007/2007 e 015/2008 que objetivava a concorrência para a contratação de empresa especializada para execução de serviços de levantamento aerofotogramétrico em trechos e ramais da Ferrovia Norte Sul e Ferrovia Leste Oeste, pode-se observar o preço médio para o levantamentos topográficos de R\$ 3.064,50 por quilometro, com esse valor médio e avaliando os custos de projetos apresentados nos editais para

os demais estudos e projetos é possível aferir que os estudos topográficos custam em média 25% do valor total do projeto.

Diante do exposto verifica-se a importância dos levantamentos topográficos tanto no que se refere a aspectos técnicos da engenharia, quanto aos custos de elaboração de um projeto. A dificuldade em se definir de forma adequada a região de estudo deverá ser enfrentada pelos projetistas a fim de garantir a utilização dos melhores espaços e possibilitar o melhor desempenho dos modais, gerando conseqüentemente uma economia e segurança ao transporte e desenvolvimento da região.

### **2.3 Principais técnicas utilizadas em estudos de traçado**

As ferramentas computacionais possibilitam a resolução de problemas relacionados à escolha do melhor traçado a ser seguido, essas soluções buscam caminho mais curto sendo bastante útil para as questões de trajeto urbano (GEISBERGER, 2011).

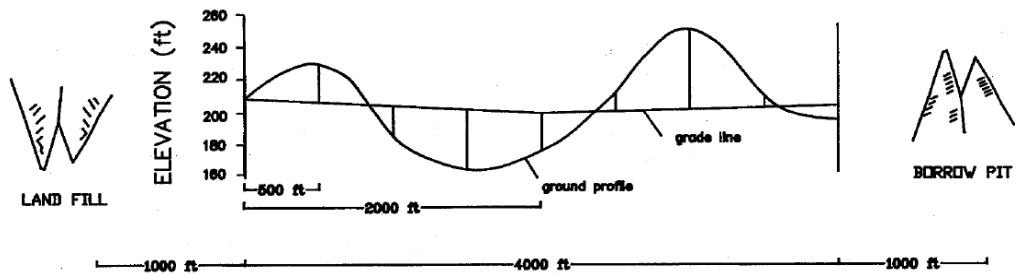
Dentre os vários autores que se dedicam ao estudo de otimização de traçados, verificam-se modelos e algoritmo diversos utilizados na tentativa de estabelecer os melhores caminhos para uma determinada via.

Chew, et al (1989) propôs um modelo parametrizado para resolver tridimensionalmente o problema otimizando simultaneamente os alinhamentos horizontais e verticais, utilizando programação linear, o modelo proposto visa a resolução dos problemas através de estágios denominados “subproblemas”.

O estudo de caso apresentado por Chew, et al (1989) mostra a capacidade do modelo na resolução de uma situação prática, é mencionado no estudo a possibilidade de incluir custos utilizando outras formulações matemáticas. Uma das ressalvas refere-se as variáveis iniciais que depende da experiência e intuição dos envolvidos na análise.

Moreb (1995) apresentou um modelo de solução do problema de alinhamento vertical (Figura 1) de forma iterativa, considerando os volumes de corte e aterro envolvidos e otimização das distancia de transporte.

Figura 1 – Otimização do alinhamento vertical



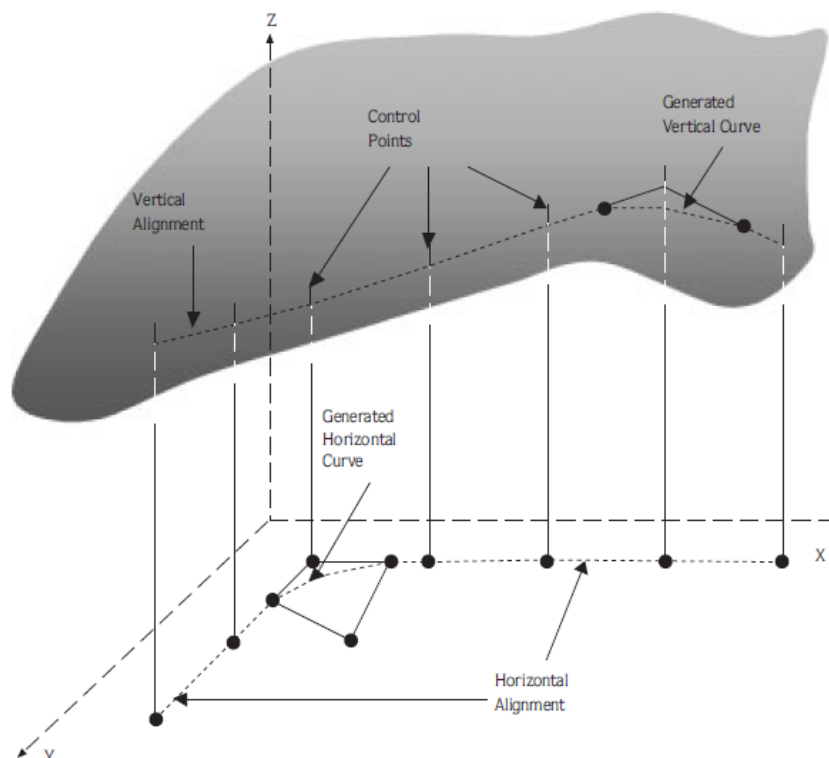
Fonte: MOREB (1995)

Ichihara *et al.* (1996) apresenta um método para projetar um perfil ideal de uma estrada utilizando um algoritmo genético, a definição da localização dos pontos de interseção em função das inclinações limites, foram feitos 420 perfis onde os mesmos foram avaliados e comparados com resultados reais, a aplicação do algoritmo reduziu o drasticamente o tempo de avaliação dos perfis mostrando-se bastante útil para aplicação em projetos.

Akay (2003) alerta sobre as dificuldades de se analisar os projetos de estradas tridimensionalmente. As técnicas existentes otimizam apenas uma das dimensões e apresentam possibilidade de analisar poucas alternativas de traçado.

Para determinação de traçados Akay (2003) propõe um modelo sujeito a restrições de caráter geométrico e considerações de distribuição de matérias para terraplenagem, tal modelo é gerado tridimensionalmente conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2- Geração dos alinhamentos verticais e horizontais por localização dos pontos de controle

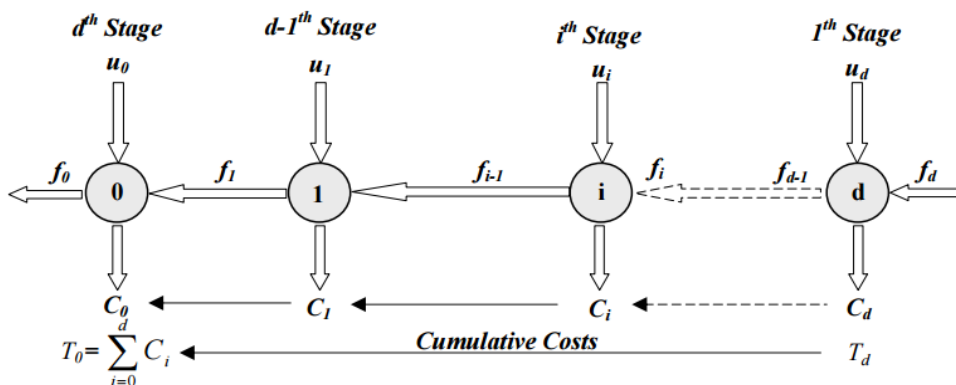


Fonte: AKAY (2003)

O modelo proposto por Akay (2003) foi desenvolvido visando proporcionar ao projeto de estradas um sistema de apoio à decisão para avaliar traçados de forma mais ágil, entretanto o modelo apresenta diversas limitações, algumas delas quanto as questões gráficas e outros referentes as condições de contorno como exemplo verifica-se que o modelo assume que os custos unitários de terraplenagem são constantes.

Goktepe (2005) apresenta um algoritmo de otimização apenas para alinhamentos verticais, utilizando programação dinâmica (Figura 3). Essa metodologia se restringe a alinhamentos verticais. O modelo proposto através de estágio se mostra bastante útil para otimizar traçados verticais, o algoritmo proposto aponta para possibilidade de implantação de custos de operação.

Figura 3 - Modelo de resolução por estágios

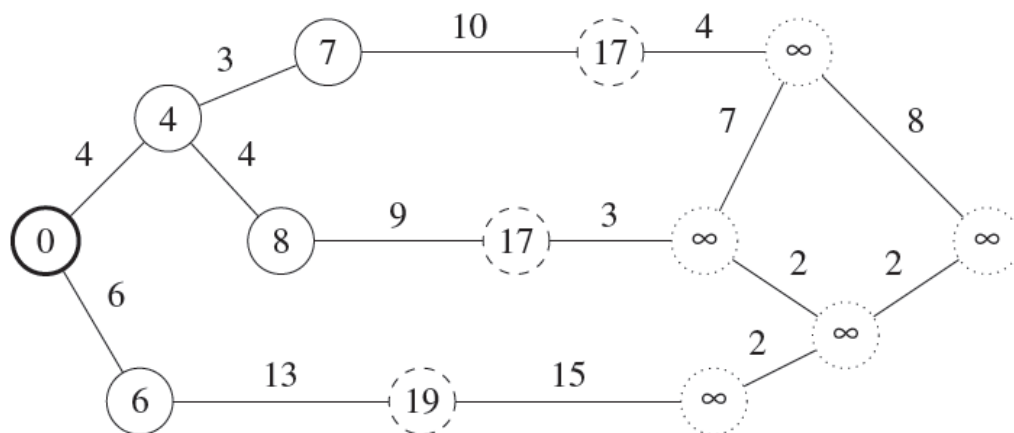


Fonte: GOKTEPE (2005)

Geisberger (2011), apresenta alguns algoritmos para determinação de melhor alternativa de traçado, são eles: Algoritmo de Dijkstra, Algoritmo Node Contraction, Algoritmo A\* Search e Combinação entre os algoritmos. A abordagem do estudo é voltada a aspectos matemáticos dos algoritmos.

O Algoritmo de Dijkstra é um dos algoritmos que calcula o caminho de custo mínimo entre vértices de um grafo (Figura 4). Escolhido um vértice como raiz da busca, este algoritmo calcula o custo mínimo deste vértice para todos os demais vértices do grafo. Ele é bastante simples e com um bom nível de performance. Ele não garante, contudo, a exatidão da solução caso haja a presença de arcos com valores negativos.

Figura 4 - Ilustração do algoritmo de Dijkstra após 5 nós solucionados.



Fonte: GEISBERGER (2011)

O Algoritmo Node Contraction acrescenta condições de contorno para restrições apresentadas no Algoritmo de Dijkstra, removendo pontos desconsiderados na análise e acrescentando traçados periféricos o que melhora sensivelmente a análise.

Algoritmo A\* Search ajuda a acelerar o algoritmo de Dijkstra tal algoritmo objetiva direcionar a análise de traçado ao ponto final considerado.

A utilização de algoritmos para resolução dos problemas de otimização de traçado e o uso de métodos baseando em multicritérios segue em ampla evolução o que sugere uma melhoria futura nas análises de traçados.

Segundo Kosijer, *et. al* (2012), as análises relacionadas a estudo de traçados ferroviários realizadas no passado, muitas vezes induziam a erros de investimento e foram a causa de impactos negativos sobre o meio ambiente, tanto durante a construção quanto na operação das vias, as razões são diversas dentre elas as deficiências nas metodologias utilizadas no planejamento e projeto de tais ferroviária. Estas metodologias foram baseadas em único critério financeira/econômica, ou seja, sem o pleno reconhecimento e avaliação de outros possíveis aspectos.

No estudo apresentado por Kosijer, *et. al* (2012) para aplicação da metodologia proposta para escolha de traçado, foram analisadas quatro alternativas de traçado, e aplicados os seguintes os critérios: Custo de construção da ferrovia, custos de manutenção, capacidade de carga da ferrovia, efeitos devido a construção no ambiente, investimentos em instalações ferroviárias, investimentos em renovação da frota, custos de operação, influência na fauna e flora, impactos gerados pelos ruídos e vibrações, custos de desapropriação, custos de impactos ao patrimônio histórico. O resultado foi organizado em uma matriz conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 – Matriz de decisão inicial

Criteria \ Alternatives	K <sub>1</sub> (mil. \$)	K <sub>2</sub> (mil.\$/god)	K <sub>3</sub> (number of trains)	K <sub>4</sub> (points)	K <sub>5</sub> (points)
	min	min	max	min	min
V <sub>1</sub>	212,12	20,2	106	35	18
V <sub>2</sub>	223,05	19,6	107	36	12
V <sub>3</sub>	250,05	19,8	106	30	11
V <sub>4</sub>	229,88	23,6	103	44	8

Fonte: KOSIJER, *ET. AL* (2012)

Os resultados obtidos no exemplo de Kosijer, *et. al* (2012) mostram a viabilidade da aplicação da metodologia uma das grandes vantagens do método proposto é a utilização de vários critérios, tal feito enriquece a análise, entretanto existe a limitação de se trabalhar com traçados pré-definidos, o que restringe o estudo.

O estudo de traçado é elaborado com auxílio de *softwares* geralmente em plataforma CAD, os principais serão apresentados no Quadro 1 com detalhes relevantes de cada um.

Quadro 1 – Principais software para estudo de traçado

<i>Software</i>	Plataforma	Fabricante	Destaques	Aplicações
<i>Topograph</i>	Microstation	Bentley	Facilidade de aplicação na topografia.	Topografia e engenharia de transporte.
<i>Civil 3D</i>	AutoCad	Autodesk	Grande número de ferramentas para projetos de infraestrutura. Plataforma CAD.	Engenharia civil.
<i>Inroads</i>	Microstation	Bentley	Grande número de ferramentas para projetos de infraestrutura.	Engenharia civil.
<i>ArcGIS Desktop</i>	ArcGIS	ESRI	Grande número de ferramentas para trabalho com dados topográficos.	Engenharia cartográfica e topografia.
<i>Quantum GIS</i>	QGIS	Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)	Gratuito, com várias comunidades na web para suporte e crescente aplicação.	Cartografia Geografia Agricultura Ciências Ambientais.

<i>Google Earth</i>	-	Google	Fácil acesso aos dados, ótima interface, visualização de foto e imagens tridimensionais.	Todas as áreas da engenharia.
<i>Globam Mapper</i>		Blue Marble GeoGraphics	Diversas ferramentas de visualização e obtenção de informações topográficas.	Engenharia cartográfica e topografia

Fonte: Elaborado pelo Autor.

## 2.4 Critérios para escolha de traçado

A escolha de traçado é o resultado de uma análise multicritérial onde são superpostos um conjunto de custos e benefícios das alternativas e avaliada a melhor solução.

O objetivo de um engenheiro, ao projetar uma rodovia, é escolher o traçado que providencie um balanço entre as necessidades da população e os custos (GRUBBA apud THAGESSEN,1996).

Deve-se observar que qualquer problema que não for enfrentado pelos engenheiros na fase de projeto terá de ser enfrentado pelos usuários toda vez que tiverem a necessidade de transpor o trecho correspondente (SENÇO, 1980).

“A seleção dos traçados no planejamento das primeiras rodovias, projetadas e construídas através de métodos da engenharia moderna, somente considerava aspectos geométricos e geotécnicos, baseados no mínimo custo para a construção com um relativo retorno financeiro dos investimentos” (LISBOA *apud*, LOBER, 2002).

Em alguns países é realizado um número mínimo de análise de alternativas que dependem da característica do projeto em estudo, no Brasil conforme PIARC (1995), geralmente são feitas avaliações de alternativas de traçado para obras viárias.

A Tabela 1 apresenta dados relativos à avaliação de alternativas de traçado em alguns países do mundo.

Tabela 1 - Avaliação de alternativas de traçado em diversos países

<b>Continente/ Países</b>	<b>Países</b>	<b>Durante o processo de avaliação, várias alternativas são analisadas?</b>
AMÉRICA LATINA	Argentina	Sempre
	Bolívia	Geralmente
	Brasil	Geralmente
	Colômbia	Geralmente
	Chile	Geralmente
	Equador	Não geralmente
	Guatemala	Nd
	Honduras	Nunca
	México	Sempre
	Nicarágua	Geralmente
	Uruguai	Geralmente
	Venezuela	Sempre

Fonte: World Road Congress – PIARC, 1995.

Tabela 1 - Continuação

LESTE EUROPEU	Eslovênia	Geralmente
	Polônia	Geralmente
	Romênia	Sempre
	Rep. Eslovaca	Sempre
	Rep. Tcheca	Geralmente
	Lituânia	Sempre
	Hungria	Sempre
	Turquia	Geralmente
	Estônia	Sempre
EUROPA OCIDENTAL, JAPÃO, CANADÁ, EUA	EUA	Sempre
	Suíça	Sempre
	Holanda	Sempre
	Reino Unido	Sempre
	Suécia	Sempre
	Finlândia	Sempre
	Áustria	Sempre
	Bélgica	Geralmente
	Espanha	Sempre
	Portugal	Geralmente
	Japão	Antes do EIA
	Canadá	Geralmente
Noruega	Geralmente	

Fonte: World Road Congress – PIARC, 1995.

O custo de implantação de uma obra viária é um parâmetro determinante para sua execução, tal custo deve ser visto como investimentos de uma cadeia produtiva ao invés de despesas como geralmente são tratados tais investimentos.

Eller, et al (2011) aborda a avaliação de custos como sendo dependente da natureza da região onde é implantada a obra e a quantidade de carga a ser transportada.

Eller, et al (2011) apresentou resultados comparativos de extrema importância, com base nesses dados é possível estimar uma ponderação para as fases de construção, manutenção e operação nos modais ferroviários e rodoviários.

Os custos médios em obras rodoviárias e ferroviárias bem como a manutenção e custos ambientais é exposto na Tabela 2.

Tabela 2 – Custos comparados dos modais rodoviário e ferroviário no Brasil, por tonelada-quilômetro útil em 2009.

<b>Etapa / Modal</b>	<b>Rodoviário (R\$)/TKU</b>	<b>Ferrovário (R\$)/TKU</b>
Implantação	1.861.523.896,20	1.981.296.580,00
Manutenção da via	34.000.000,00	5.480.960,00
Operação do veículo	36,36	13,40
Manutenção do veículo	35,08	137.520,92
Meio ambiente	3.583.242.621,60	716.648.524,32
	<b>R\$ 5.478.766.589,24</b>	<b>R\$ 2.703.563.598,64</b>

Fonte: Eller, et al (2011).

O custo operacional de uma via é um valor de difícil previsão tendo em vista a grande quantidade de variáveis envolvidas.

Para o custo de manutenção é possível se estabelecer relação direta com as características geométricas, porém os custos operacionais necessitam de simulações.

Carvalho (1970) apresenta o estudo onde a variação de rampa de 0% a 7% proporciona uma elevação no atrito de rolamento em caso extremo para 4,5 vezes o atrito normal (Tabela 3). No caso das ferrovias (Tabela 4), para uma variação de rampa de 0% a 3% a elevação do acréscimo do atrito normal é de 11 vezes o atrito normal, o que demonstra a elevação dos custos energéticos para os casos ferroviários.

Tabela 3 – Atrito de rolamento em função da rampa – rodovias.

<b>i%</b>	<b>Acréscimo relativo</b>
0	1 vez
1	1,5 vezes
2	2,0 vezes

3	2,5 vezes
4	3,0 vezes
5	3,5 vezes
6	4,0 vezes
7	4.5 vezes

Fonte: Carvalho (1970).

Tabela 4 – Atrito de rolamento em função da rampa – ferrovias.

i%	Acréscimo relativo
0	1 vez
0,5	2,7 vezes
1,0	4,3 vezes
1,5	6,0 vezes
2,0	7,7 vezes
2,5	9,3 vezes
3,0	11 vezes

Fonte: Carvalho (1970).

Segundo Carvalho (1970), ao se analisar uma variante de uma estrada e se comparar com o projeto original, muitas vezes é difícil tomar uma decisão pela melhor opção considerando os requisitos técnicos da engenharia por uma simples análise.

Em virtude da dificuldade em se apontar dentre um conjunto de opções de traçado o melhor tecnicamente, foram desenvolvidos métodos que permitem uma comparação eficaz entre duas possibilidades de traçado, principalmente em relação à operação da via, recorrendo-se aos conceitos físicos da mecânica clássica.

O conceito de comprimento virtual baseia-se no trabalho mecânico desenvolvido pelas composições para vencer determinados traçados, busca-se com o método converter o comprimento da alternativa em estudo em um comprimento equivalente plano e em nível, fazendo os acréscimos de modo a compensar os maiores esforços nos trechos curvos e nas rampas.

O comprimento virtual pode ser um parâmetro para estimativa de gasto de combustível nas composições ferroviárias baseando-se no trabalho e nas características de cada locomotiva. Assim, torna-se possível prever qual variante seria mais econômica em relação a outras no que se refere ao gasto de combustível, ou relacionado com a deterioração do material rodante.

Para o cálculo do comprimento virtual existem métodos consagrados: o método de Baum, método de Stevenson, método de Cotrin e o método adotado pela AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*, entidade norte-americana da indústria ferroviária responsável por estudar e publicar as melhores práticas para o projeto, construção e manutenção de infraestruturas ferroviárias, que são requisitos no Estados Unidos e Canadá.

Stevenson (1916) propôs a Equação (1) que permite o cálculo do comprimento virtual

$$L_v = L + \frac{(0,02 * K * A) + H}{r_v} \quad (1)$$

Em que:

$L_v$  : comprimento Virtual;

$L$  : comprimento real da estrada;

$A$  : soma dos ângulos centrais;

$H$  : soma de todos os desníveis em rampa;

$K$  : Coeficiente relacionado à bitola no caso de ferrovias;

$R_v$  : Resistencia normal média dos veículos de tração rebocados.

Braquehais (2014) desenvolveu um *software* para o cálculo do comprimento virtual nos métodos de Cotrin, Stevenson e AREMA baseado nas características geométricas do traçado.

Um comparativo entre as fórmulas de cálculo do comprimento virtual foi feita apresentada por Braquehais (2014), no estudo ficou evidenciado uma variação nos resultados, entretanto para efeitos de comparação de alternativas tais variações não comprometem o resultado final.

Para a metodologia proposta serão utilizados os conceitos de comprimento virtual segundo o trabalho mecânico proposto por Stevenson em 1916, por se enquadrarem melhor nos dados disponíveis para o estudo de caso.

Outra forma de se analisar alternativas de traçado são as simulações de desempenho, os simuladores de desempenho apresentam a cada dia melhores resultados em virtude da evolução computacional aliada à melhoria dos procedimentos de aferição utilizados em vias permanentes.

Fioroni (2008) buscou relacionar as principais ferramentas comerciais de simulação ou avaliação de operações ferroviárias, são elas:

Simsig: Simulador voltado para a representação de operações de sinalização de trens na malha. Reproduz com riqueza o ambiente encontrado em centros de controle de linhas férreas, como os SDS (*Signalling Display System*) e ARS (*Automatic Routesetting System*) (Simsig, 2002). É um *software* de aplicação operacional, usado também para treinamento de operadores de sinalização, não oferecendo recursos para estudos estratégicos ou táticos. O *software* é apresentado como um “jogo” extremamente realista, onde se podem reproduzir situações reais.

*Multirail freight edition version 3.0*: é uma ferramenta para a elaboração de planos de operação e análise do impacto das alterações nestes planos. Entre seus recursos, oferece um ambiente de criação de planos, considerando manutenção de trens, tamanho das composições,

níveis de tráfego, programação dos carros e toda a malha ferroviária. Através deste sistema, é possível avaliar as consequências da mudança em tempos de chegada, condições de tráfego, entre outros. O *software* também oferece ferramentas gráficas de análise, com criação de gráficos tempo-espaço.

*Fast track II*: é uma ferramenta para análise de capacidade e passagem em malhas ferroviárias. Permite a construção de toda a linha considerando os pontos de passagem e os pátios. Uma vez construída a malha, é possível testar planos de despacho, ou mesmo aproveitar a malha no *Multirail*. Esta ferramenta permite o estudo de cenários de investimento em pátios de cruzamento e seu impacto em determinados planos de despacho. Mas como é projetado para suportar simulações com horizonte de dias, não é adequado para estudos estratégicos.

*Train dispatcher 3*: Como o próprio nome indica, trata-se de uma ferramenta para simulação de operações de despacho. Permite controlar as operações de cada composição sobre a malha incluindo atuação sobre a sinalização. Apesar de eficiente no treinamento da prática de despacho, é limitado para realizar estudos estratégicos ou táticos. Entre outras limitações, permite simular apenas 90 dias de operação, e também não suporta trens de ciclo que são conservados dentro do sistema.

*Track builder 3*: O *Track Builder* é uma ferramenta de construção de malhas ferroviárias. Possui recursos para reproduzir redes bastante complexas, mas não é capaz de simular a malha. Para isso, o usuário deve abrir a malha construída no *Train Dispatcher*, descrito anteriormente. Apesar de serem ferramentas distintas, podem atuar em conjunto como uma suíte de *softwares*.

*Pc rail*: Conjunto de simuladores específicos para determinadas malhas ferroviárias previamente configuradas, a maioria britânicas. Permite simular operações de despacho sob diversas condições e atuar sobre o sistema durante a execução. Apesar de representar com eficiência as operações de despacho, é vendido como um jogo. A limitação da simulação com malhas previamente construídas limita o seu uso em malhas diferentes, ou mesmo nas mesmas malhas depois de certo tempo, caso sejam feitos investimentos ou modificações na infraestrutura. O sistema também não representa trens de ciclo.

*Simcar*: Simulador elaborado pela CVRD especificamente para simular a Estrada de Ferro de Carajás. Não possui interface animada, mas apresenta gráficos de tempo-espaço e permite a realização de diversos tipos de estudos, como dimensionamento da frota, priorização de cruzamentos, programas de despacho e outros (Rosseto, C. S., 1997).

*Train Performance Calculator (TCD)*: é o simulador de um trem que auxilia a examinar rapidamente o número de viagem de trem, condições de paradas, capacidade da linha,

identifica pontos de conflito e alternativas de resolução de teste, consumo de trem, alternativas do material circulante, alternativas de traçado ferroviário e alternativas de tempo de viagem.

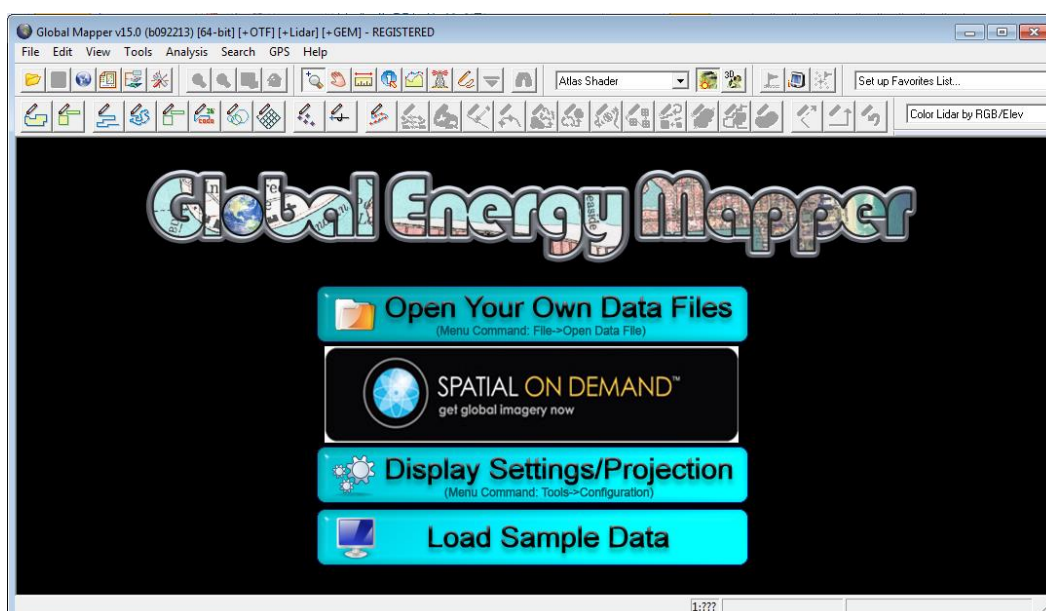
### 3 PROPOSTA

A metodologia proposta não tem intuito de definir o traçado a ser utilizado no projeto e sim definir a melhor área para que sejam estudadas as alternativas de traçado. Esta etapa antecede a definição do traçado na elaboração de um estudo de viabilidade ou anteprojeto.

A proposição do presente trabalho direciona-se inicialmente a projetos ferroviários de carga, podendo em futuros estudos ser ajustada para os demais projetos de obras lineares.

Para se iniciar a análise sob a ótica das características topográficas da região, necessita-se de informações que possibilitem a reprodução do espaço em estudo, essas informações foram obtidas através do software *Global Mapper* apresentado na Figura 6.

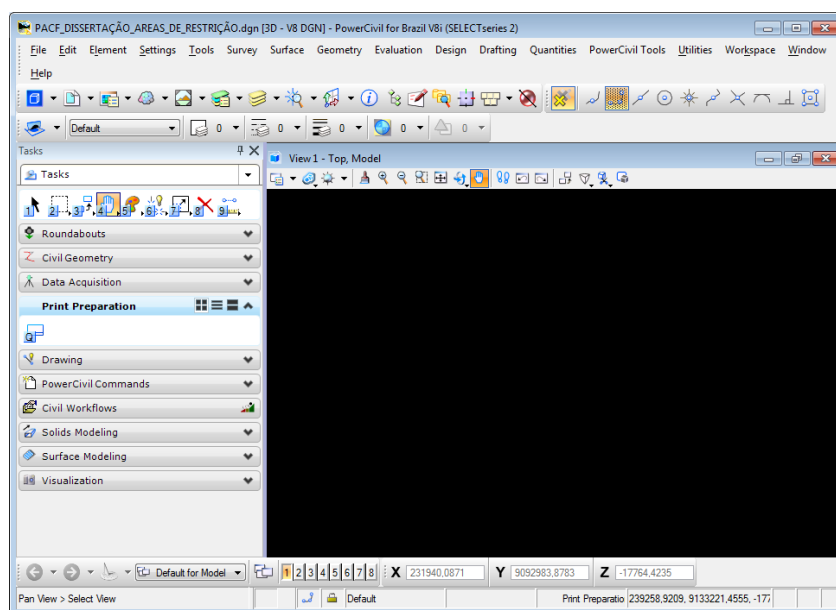
Figura 6 - Tela de abertura do Global Mapper.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O software utilizado para a modelagem das superfícies e o lançamento da geometria foi o *Inroads* e o *PowerCivil* da Bentley, mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Tela de abertura do PowerCivil do pacote Inroads da Bentley



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os demais cálculos e organização dos dados foram realizados no Excel.

Alguns conceitos foram criados ou adaptados para possibilitar o melhor entendimento da metodologia proposta e serão descritos a seguir:

- Pontos obrigatórios: são todos os pontos por onde uma estrada deverá passar obrigatoriamente.
- Ponto inicial: ponto devidamente identificado com suas coordenadas topográficas onde se inicia o estudo de traçado.
- Ponto final: ponto devidamente identificado com suas coordenadas topográficas onde o estudo de traçado será finalizado.
- Áreas de restrição ( $A_{ex}$ ): são as regiões onde o projeto não poderá se desenvolver, essas áreas geralmente são áreas de preservação ambiental, indígena, histórica, zonas industriais, áreas de adensamento urbano, etc.
- Número de Alternativas por ponto ( $n$ ): quantidade de alternativas a serem verificadas por ponto.
- Ângulo de abertura entre os passos das alternativas ( $\alpha$ ): ângulo formado entre cada um dos segmentos das alternativas.
- Passo das Tangentes ( $T$ ): extensão máxima das tangentes que formam as alternativas.
- Diretriz primária: ligação entre os pontos obrigatórios, formando assim a alternativa principal.

- Tangente de fechamento: tangente que une diretamente o ponto inicial da análise ao ponto final.
- Coeficiente de traçado de implantação: coeficiente adimensional calculado em função dos volumes de terraplenagem que servirá para o cálculo do coeficiente de traçado.
- Coeficiente de traçado de operação: coeficiente adimensional calculado em função comprimento virtual que servirá para o cálculo do coeficiente de traçado.
- Coeficiente de traçado: coeficiente adimensional que servirá para hierarquizar as alternativas analisadas.

As escolhas de áreas para estudo e posteriores alternativas de traçado ficam a mercê de explicações subjetivas, como: “a área apresenta menores” volumes de corte e aterro; “na região estudada foram verificados menores impactos ambientais”; “o traçado proposto apresenta melhores características geométricas”; etc.

Mesmo quando são apresentados estudos detalhados, estes podem ser direcionados a uma escolha por fatores econômicos e políticos, interferindo diretamente na escolha da melhor opção.

As discussões durante a elaboração de projetos de ferrovias, na busca da defesa de estudos de traçados, tornaram mais evidente a necessidade da definição de um parâmetro numérico que possa subsidiar esta escolha. Esta necessidade torna-se visível ao se observar outros domínios do conhecimento da engenharia aonde critério mais confiáveis são utilizados para a determinação de cálculos de componentes de uma obra, como por exemplo: a determinação da seção de uma obra hidráulica com uma dada vazão, a espessura das camadas que compõem um pavimento em função dos índices de CBR ou do módulo de resiliência, a resistência de um elemento de concreto baseada no FCK, o coeficiente de segurança ao deslizamento de um talude em função da sua coesão e do ângulo de atrito interno, dentre outras.

Os exemplos citados ilustram que os parâmetros utilizados, apesar de servirem para a tomada de decisão dos projetistas, ainda possuem limitações e questionamentos. É possível que muitos desses parâmetros em breve sejam substituídos por técnicas mais modernas; porém, serviram, por muito tempo, para garantir o mínimo de desempenho e qualidade aos projetos.

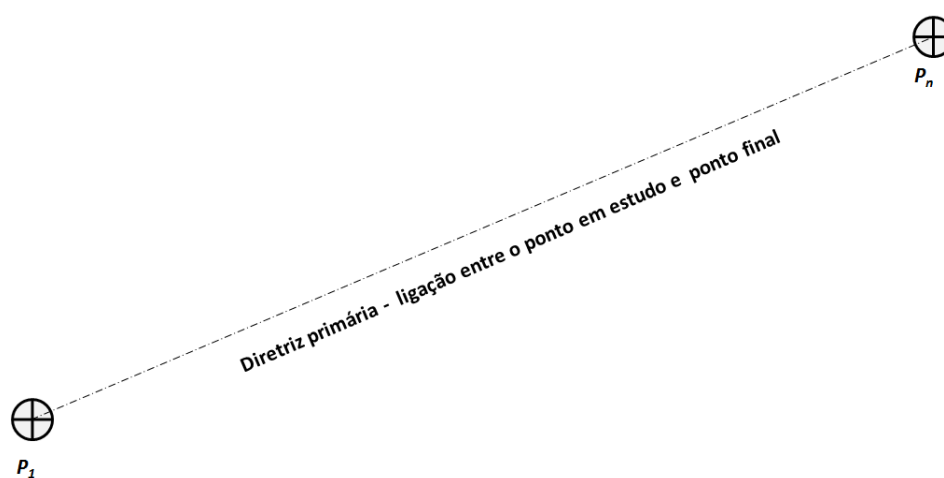
No caso dos estudos de traçados o mesmo não ocorre. A determinação de um parâmetro de traçado é o que se pretende apresentar neste Capítulo na metodologia proposta.

A metodologia proposta consiste na análise de uma região entre dois pontos extremos, essa região é definida por uma malha composta por pontos previamente calculados em função das características a seguir descritas, utilizando dados topográficos obtidos de informações de satélites.

Considere-se dois pontos com suas respectivas coordenadas  $P_1(N_1, E_1, H_1)$  e  $P_n(N_n, E_n, H_n)$  e existem entre elas inúmeras possibilidades de ligações, verifique quais as ligações possíveis que atendem os limites de contorno e as restrições impostas pelas características topográficas, geológicas e geotécnicas da região as quais garantam a elaboração de projetos viários.

O primeiro e mais simples dos casos seria uma ligação por intermédio de uma única tangente, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Determinação da diretriz primária.

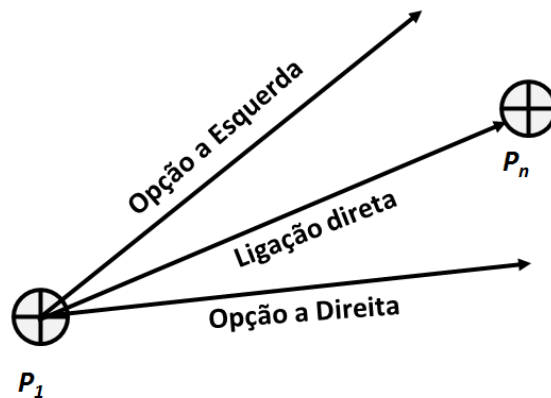


Fonte: Elaborada pelo Autor.

A primeira alternativa exercerá uma forte influência na determinação das demais, para que se possa garantir o direcionamento do estudo do lançamento, visando evitar grandes desvios em relação ao ponto final do segmento.

Partindo-se das premissas mais simples de análise de um caminho, além da opção da linha reta entre dois pontos, podem-se avaliar as opções que se desviam, tanto para a direita, quanto para a esquerda da direção final desejada, o que é geralmente feito intuitivamente no nosso dia a dia, quando se deseja avaliar alternativa de caminhos, conforme ilustrado na Figura 9.

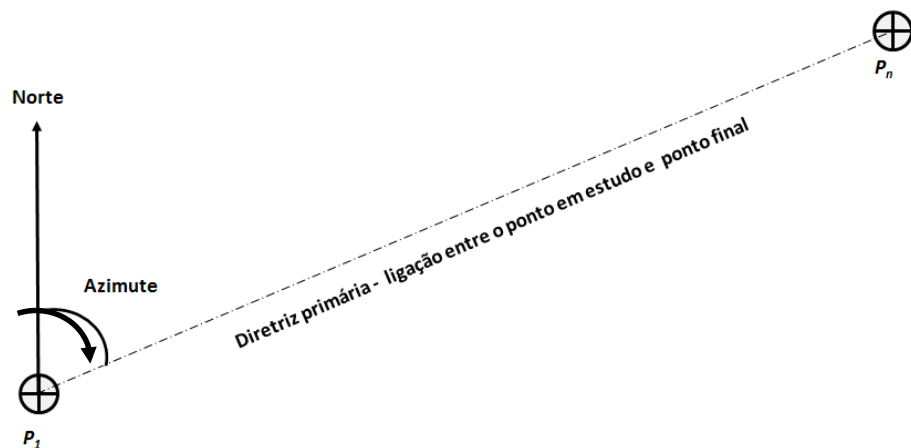
Figura 9 - Opções de caminhos entre dois pontos



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para garantir o direcionamento correto no estudo do traçado foi preciso obter elementos que permitissem assegurar, a cada avaliação, que as alternativas se aproximem do destino final. Para isso foi utilizado o conceito de azimute na determinação do ângulo formado entre o eixo Norte e Sul, no sistema adotado para as coordenadas em estudo, e a direção entre o ponto inicial e o final, conforme pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Cálculo do azimute entre os pontos em estudo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

De posse das coordenadas dos pontos inicial e final, utilizando conceitos da Topografia e da Trigonometria determina-se o Rumo utilizando-se a Equação 2:

$$Rumo = Arc \tan \left( \frac{X_n - X_1}{Y_n - Y_1} \right) \quad (2)$$

Em que:

$X_1$  – Coordenada Norte do Ponto 1;

$Y_1$  – Coordenada Este do Ponto 1;

$X_n$  – Coordenada Norte do Ponto n;

$Y_n$  – Coordenada Este do Ponto n.

Para a obtenção do azimute em função do rumo deve ser observado o quadrante em que se encontra o ângulo e utilizar as correlações conforme mostra a Tabela 5.

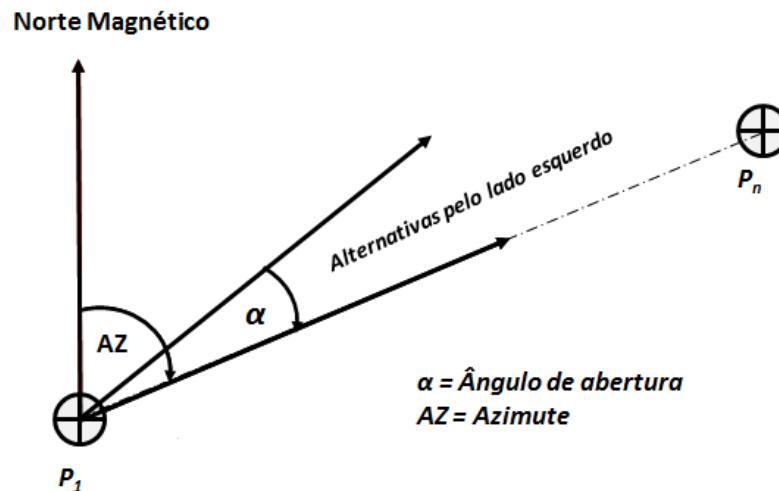
Tabela 5 - Conversão entre Rumo e Azimute.

Quadrante	Correlação
1°	Azimute = Rumo
2°	Azimute = $180^\circ -$ Rumo
3°	Azimute = $180^\circ +$ Rumo
4°	Azimute = $360^\circ -$ Rumo

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Determinado o azimute, define-se o ângulo de abertura entre as alternativas para que seja possível prosseguir com as avaliações. As alternativas à esquerda serão determinadas em função do azimute subtraindo-se o valor do ângulo de abertura, Figura 11.

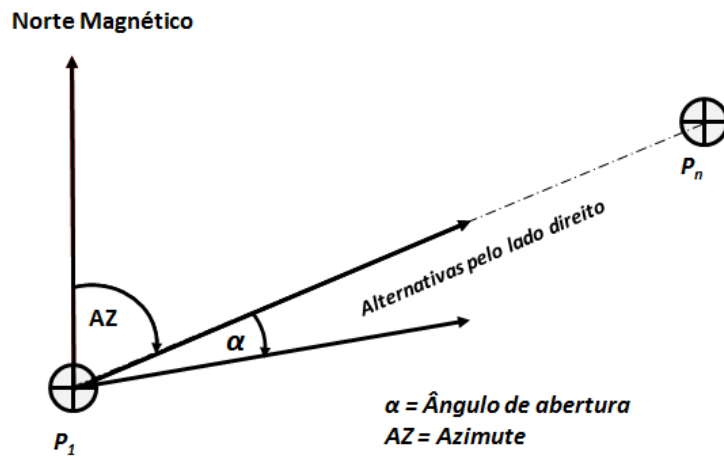
Figura 11 - Alternativas pelo lado esquerdo



Fonte: Elaborada pelo Autor.

De maneira análoga as alternativas à direita serão determinadas em função do azimute somando-se o valor do ângulo de abertura, conforme apresentado na Figura 12.

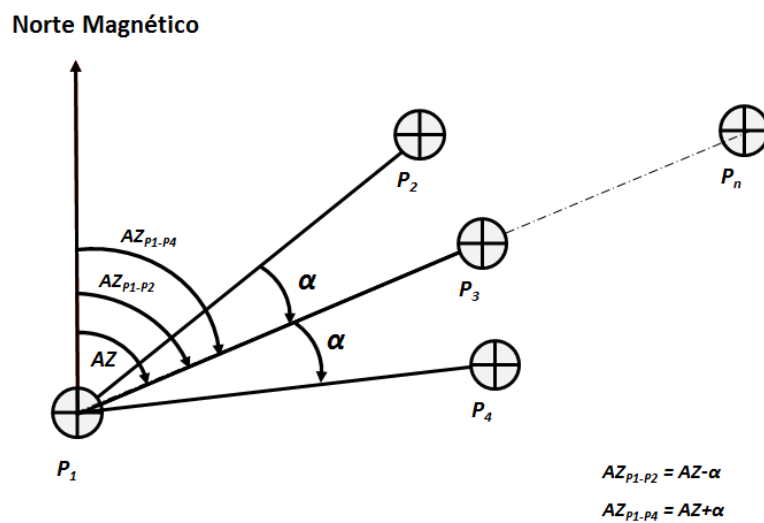
Figura 12 - Alternativas pelo lado direito.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Definidas as direções das alternativas de acordo com as Figuras 11 e 12, estabeleceu-se um parâmetro denominado passo da tangente ( $T$ ) com a finalidade de limitar a extensão delas. Desta forma o método permite determinar os pontos da malha que posteriormente darão origem aos alinhamentos a serem avaliados, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Cálculo dos pontos para formação da malha de alternativas.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

O cálculo das coordenadas de cada um dos pontos que formarão a malha de alternativas, e conseqüentemente, os alinhamentos para a avaliação, foi realizado em planilhas em Excel, conforme apresentado na Tabela 6.

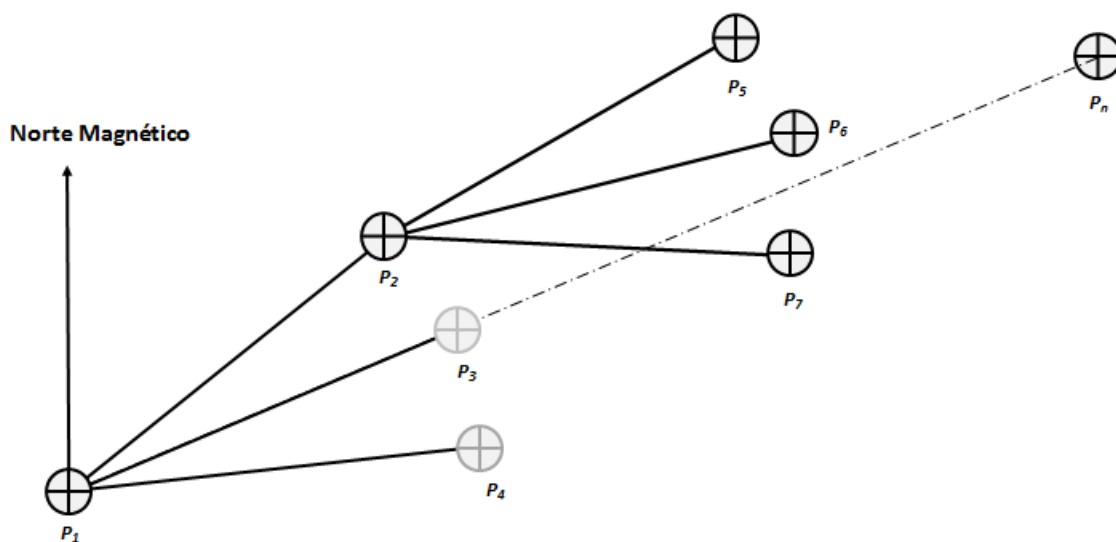
Tabela 6 - Determinação das coordenadas dos pontos da malha de alternativas.

00001		
	Norte (Y)	Este (X)
Ponto inicial	Ni	Ei
Ponto final	Nf	Ef
$\Delta n$	-	
$\Delta e$	-	
Rumo	-	
Azimute	-	
Passo da tangente	-	
Azimute (rad)	-	
Ângulo ponto a (rad)	-	
Ângulo ponto c (rad)	-	
<b>Ponto 2</b>	<b>N1</b>	<b>E1</b>
<b>Ponto 3</b>	<b>N2</b>	<b>E2</b>
<b>Ponto 4</b>	<b>N3</b>	<b>E3</b>

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para cada um dos pontos determinados repete-se o procedimento, calculando-se um novo azimute e as alternativas à esquerda e à direita como se observa na Figura 14.

Figura 14 - Montagem da malha de alternativas



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Em função da distância entre o ponto inicial e final e da extensão máxima admitida (passo das tangentes) determina-se o número médio dos segmentos que serão necessários para as alternativas se aproximarem do ponto final, determinada pela Equação 3.

$$N_{optan} = \frac{L_{total}}{T} \quad (3)$$

Onde:

$N_{optan}$  : número médio de passos das tangentes por alternativa;

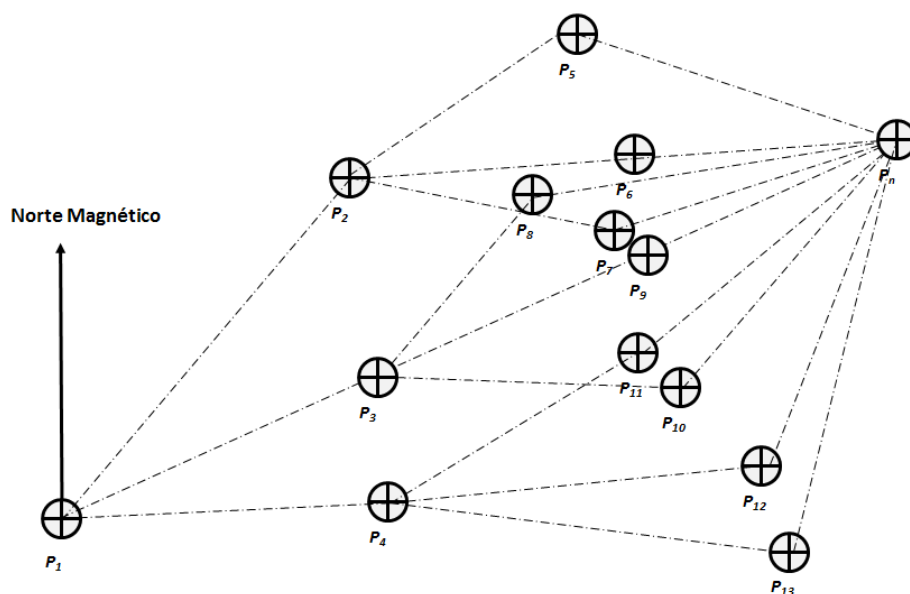
$L_{total}$  : Extensão total do trecho, distância entre o ponto inicial e final;

$T$  : Passo da Tangente.

O último trecho que formará as alternativas será constituído da tangente de fechamento, a qual será utilizada quando a distância entre um ponto qualquer e o ponto final for menor que o passo da tangente. Nesses casos será feita uma ligação por intermédio de uma tangente dispensando os cálculos do azimute e a utilização de ângulos de abertura. Tal procedimento se faz necessário para garantir que todas as alternativas finalizem no mesmo ponto, proporcionando uma melhor comparação entre as mesmas.

O resultado final, após as várias iterações, será uma malha formada pelos pontos calculados, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Malha de pontos para montagem das alternativas.

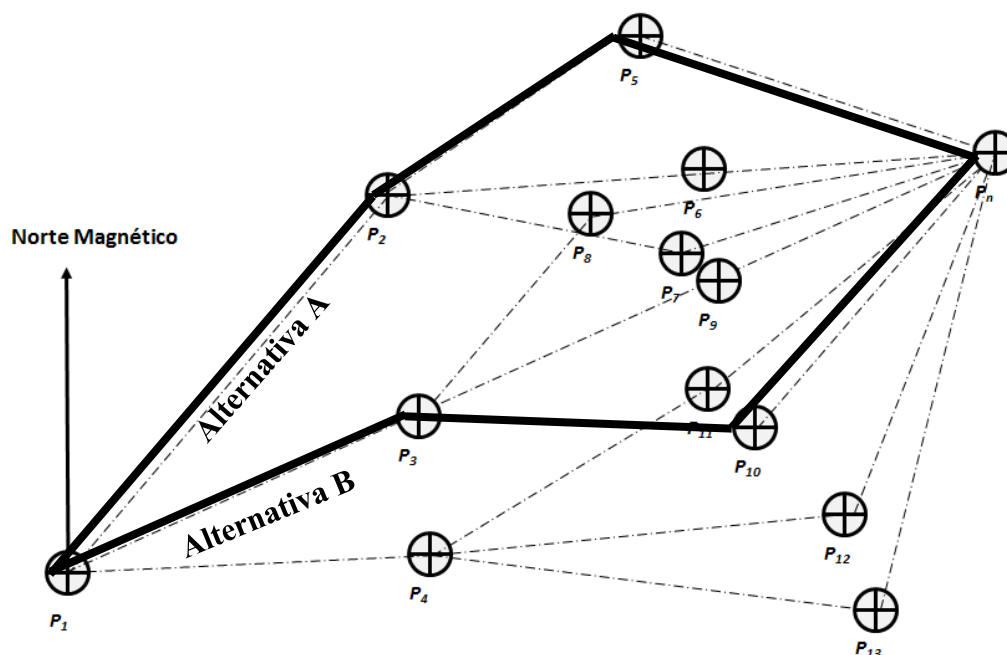


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Os alinhamentos a serem formados pelos pontos seguem uma sequência de ligações e a organização e numeração dos pontos dessa atividade é uma etapa de extrema importância.

No estudo em questão a organização foi realizada com o auxílio de ferramentas do Excel. A Figura 16 ilustra graficamente as alternativas A e B, ambas partindo do ponto  $P_1$  para o Ponto  $P_n$ .

Figura 16 – Montagem de alternativas.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

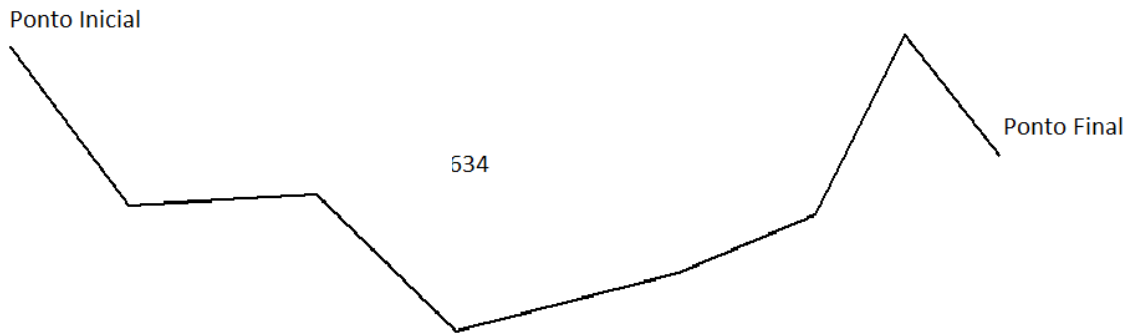
A alternativa A composta pela ligação dos pontos  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_5$  e  $P_n$  e a Alternativa B composta pela ligação dos pontos  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$  e  $P_n$ , e assim sucessivamente.

As alternativas são os resultados das ligações entre os pontos que formam a malha. Entretanto, os alinhamentos horizontais para a realização dos estudos de traçados de vias de transporte são compostos de tangentes e curvas. As curvas são utilizadas para concordarem as mudanças de direções das tangentes visando permitir que o veículo prossiga seu trajeto sem maiores problemas.

Para solucionar o problema das concordâncias, foi atribuído para todos os pontos de interseção formados pelos passos das tangentes curvas com um raio mínimo, sendo o valor do raio mínimo um dos dados de entrada para a análise das alternativas. Desta forma, a malha de alternativas muda seu formato fazendo com que os alinhamentos se aproximem das alternativas que geralmente são estudadas, evitando assim, resultados que possam ser inexecutáveis por não admitirem concordâncias horizontais.

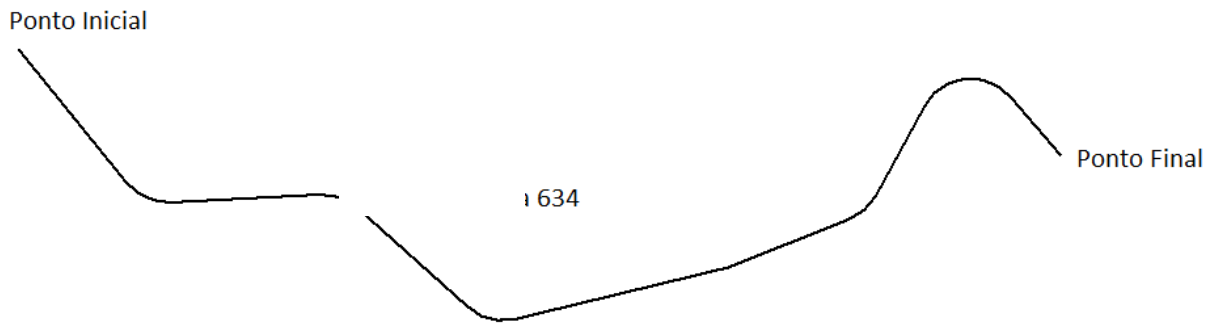
Nas figuras 17 e 18 apresenta-se um exemplo de uma alternativa sem curvas de concordância horizontal e com curvas de concordância horizontal respectivamente.

Figura 17 - Alternativa sem curvas horizontais.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 18 - Alternativa com curvas horizontais

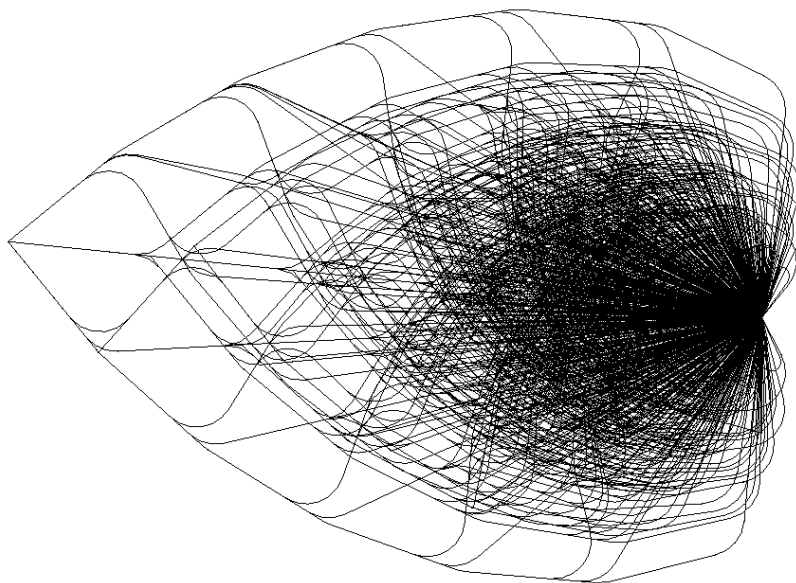


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após a verificação de que todas as alternativas são viáveis sob o aspecto da geometria mínima exigida para o tipo de projeto em questão, será necessário verificar as condições de alinhamento vertical para cada uma das alternativas.

Na Figura 19 é ilustrado o conjunto de todas as alternativas possíveis para uma análise.

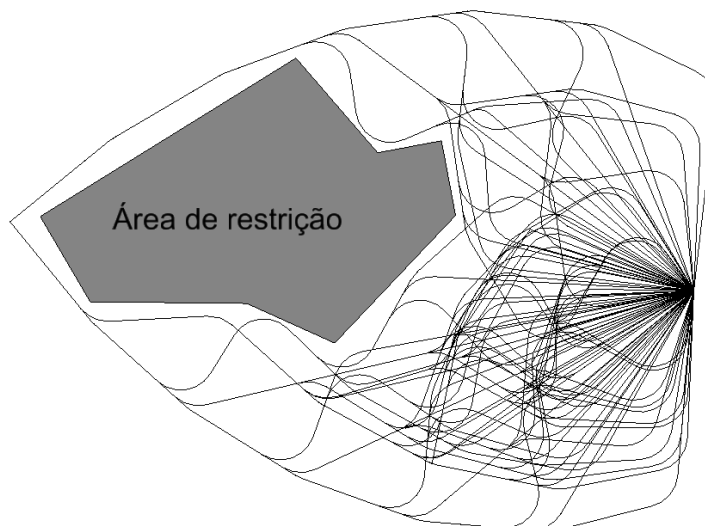
Figura 19 - Exemplo de todas as alternativas possíveis para um estudo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Definidos os alinhamentos horizontais e observadas as áreas de restrições como Ilustrado na Figura 20, os alinhamentos que as cruzarem deverão ser eliminados da análise.

Figura 20 - Alternativas após verificação da área de restrição.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

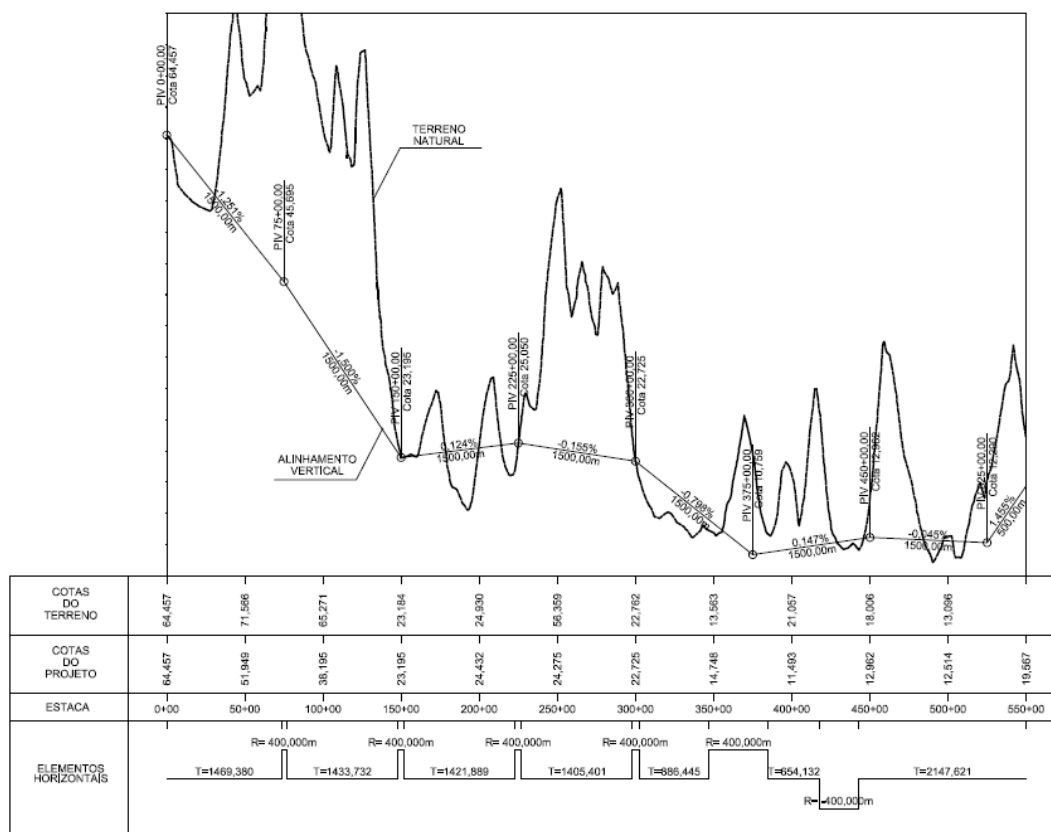
Após a identificação das alternativas elegíveis, será preciso a definição dos alinhamentos verticais.

De forma semelhante às dificuldades em se definir os alinhamentos horizontais existem inúmeras possibilidades de se definir uma ligação entre os pontos que formarão o

alinhamento vertical. A definição de um alinhamento vertical parte do conhecimento das seguintes informações: cota dos pontos de início e fim do trecho em estudo, rampas máximas e mínimas permitidas, concordâncias verticais e localização dos pontos de interseção vertical para as mudança de direção dos segmentos que compõe o alinhamento.

As cotas de projeto, as rampas máximas e mínimas e as concordâncias verticais, são dados de entrada da análise, sendo a definição da localização dos pontos de interseção uma definição que envolve diversas variáveis. Para possibilitar a análise, foi adotada a localização do ponto de interseção vertical coincidindo com os pontos de interseção horizontais e com a mesma altitude do terreno natural. Tal definição possibilita o lançamento dos alinhamentos verticais, cabendo ressaltar que os alinhamentos aqui propostos não têm o objetivo de definir um projeto geométrico de uma via e sim de indicar qual é a melhor área para estudos que em etapas futuras darão melhor subsídio ao projeto geométrico, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Exemplo de um alinhamento vertical

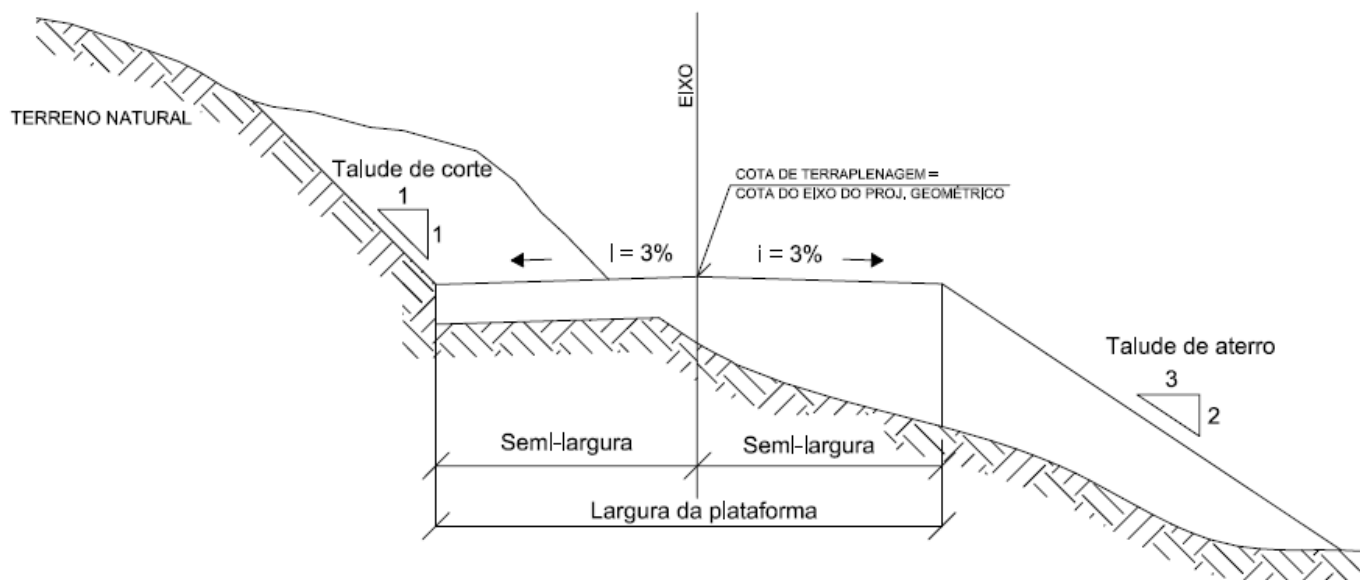


Fonte: Elaborada pelo Autor.

O último elemento a ser definido para permitir a modelagem das alternativas e assim possibilitar uma comparação entre os volumes de terraplenagem são as seções transversais tipo. As seções tipo, assim comumente denominadas, são condições impostas na modelagem que

permitam garantir as larguras das plataformas as condições de taludes e os demais elementos necessários à realização de um projeto viário, Como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Exemplo de uma seção tipo.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

### 3.1.1 Modelagem das alternativas

Feitas as modelagens de todas as alternativas, será possível calcular dois elementos que servirão para determinar a estimativa de custo de cada uma das opções estudadas. O primeiro se refere ao volume de terraplenagem obtido pelo cálculo dos volumes compreendidos nas seções transversais. O segundo será o cálculo do comprimento virtual que servirá para analisar o impacto no desempenho operacional dos veículos em cada uma das alternativas.

### 3.1.2 Modelo de relatórios de volumes de terraplenagem

De posse da modelagem computacional serão gerados quadros de volumes de escavação que servirão para determinar a estimativa de custo de implantação.

A Figura 23 apresenta o modelo do relatório de volume de terraplenagem.

Figura 23 - Modelo do relatório de volume de terraplenagem.

End Area Volume Report															
Report Created: 2/13/2014 Time: 5:51pm															
Cross Section Set Name: Alternativa 3															
Alignment Name: Alternativa 3															
Input Grid Factor: 1.000000    Note: All units in this report are in meters, square meters and cubic meters unless specified otherwise.															
Baseline Station	Factor	Station Quantities						Added Quantities						Mass Ordinate	
		Cut			Fill			Cut			Fill				
		Area	Volume	Adjusted	Factor	Area	Volume	Adjusted	Factor	Volume	Adjusted	Factor	Volume	Adjusted	
90000+00,000	1,0000	17,92	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	0,00
90001+00,000	1,0000	15,20	331,26	331,26	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	331,26
90002+00,000	1,0000	12,05	272,54	272,54	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	603,80
90003+00,000	1,0000	8,34	203,93	203,93	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	807,74
90004+00,000	1,0000	4,99	133,38	133,38	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	941,11
90005+00,000	1,0000	2,83	78,28	78,28	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1019,39
90006+00,000	1,0000	0,00	28,35	28,35	1,0000	1,06	10,59	10,59	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1037,16
90007+00,000	1,0000	0,00	0,01	0,01	1,0000	3,40	44,57	44,57	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	992,59
90008+00,000	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	5,09	84,84	84,84	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	907,75
90009+00,000	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	4,08	91,63	91,63	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	816,13
90010+00,000	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	2,60	66,80	66,80	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	749,32
90011+00,000	1,0000	0,79	7,89	7,89	1,0000	1,06	36,68	36,68	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	720,54
90012+00,000	1,0000	9,82	106,05	106,05	1,0000	0,00	10,65	10,65	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	815,94
90012+05,344	1,0000	18,54	75,76	75,76	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	891,70
90013+00,000	1,0000	45,75	471,07	471,07	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1362,77
90014+00,000	1,0000	91,71	1350,60	1350,60	1,0000	0,00	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00	2713,37

Fonte: Elaborada pelo Autor.

A primeira coluna (*Baseline Station*) refere-se a estaca ou quilometragem do alinhamento, a segunda coluna (*Cut Factor*) diz respeito ao fator de homogeneização do material que compõe a superfície, a terceira coluna (*Cut Area*) apresenta o valor da área de corte da seção, a quarta coluna (*Cut Volume*) fornece o volume de corte até a estaca em estudo, a quinta coluna (*Cut Adjusted*) apresenta o valor ajustado em função do fator de corte, a sexta coluna (*Fill Factor*) apresenta o valor do fator de homogeneização para aterros, a sétima coluna (*Fill Area*) apresenta a área de aterro da seção, a oitava coluna (*Fill Volume*) fornece o volume de aterro, a nona coluna representa o volume com a correção do fator de aterro, as demais colunas se referem a quantidades adicionais que não serão utilizadas nesse estudo.

### 3.1.3 Modelo de relatórios de características geométricas

Outro produto da modelagem serão os relatórios dos alinhamentos horizontais e verticais que subsidiarão o cálculo do comprimento virtual.

O relatório de alinhamento horizontal apresenta todos os elementos planimétricos referentes a geometria do traçado, todos os pontos notáveis das curvas (PC, PI e PT), ângulos

(Ângulo central, delta), comprimentos (*Tangent length, length*) direções (*Tangent direction*), coordenadas, (*northing, easting*), extensão dos elementos, etc.

A Figura 24 apresenta um modelo de relatório de alinhamento horizontal.

Figura 24 - Modelo de relatório de alinhamento horizontal.

Project Name: GEOMETRIA				
Description: GEOMETRIA PARA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ALUNO PEDRO ALMI DA COSTA FREIRE				
Horizontal Alignment Name: 01				
Description:				
Style: Default				
		STATION	NORTHING	EASTING
Element: Linear				
POB ( )		0+000,000	9080555,609	271363,610
PC ( )		1+469,380	9081485,153	272501,602
Tangent Direction:	N 50°45'25,59" E			
Tangent Length:	1469,3804			
Element: Circular				
PC ( )		1+469,380	9081485,153	272501,602
PI ( )		1+500,000	9081504,523	272525,316
CC ( )			9081175,365	272754,646
PT ( )		1+530,500	9081520,058	272551,702
Radius:	400,0000			
Delta:	8°45'17,24" Right			
Degree of Curvature(Arc):	14°19'26,20"			
Length:	61,1200			
Tangent:	30,6196			
Chord:	61,0605			
Middle Ordinate:	1,1668			
External:	1,1702			
Tangent Direction:	N 50°45'25,59" E			
Radial Direction:	S 39°14'34,41" E			
Chord Direction:	N 55°08'04,21" E			
Radial Direction:	S 30°29'17,17" E			
Tangent Direction:	N 59°30'42,83" E			
Element: Linear				
PT ( )		1+530,500	9081520,058	272551,702
PC ( )		2+964,259	9082247,490	273787,222
Tangent Direction:	N 59°30'42,83" E			
Tangent Length:	1433,7588			

Fonte: Elaborada pelo Autor.

O relatório vertical apresenta os dados referentes ao plano vertical da geometria em análise, nesse relatório serão apresentadas as extensões das rampas (*Tangent length*) e suas declividades (*Tangent grade*) conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Modelo do relatório de alinhamento vertical.

Project Name: GEOMETRIA			
Description: GEOMETRIA PARA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ALUNO PEDRO ALMI DA COSTA FREIRE			
Horizontal Alignment Name:	01		
Description:	Style: Default		
Vertical Alignment Name:	01		
Description:	Style: Default		
		STATION	ELEVATION
Element: Linear			
	POB	0+000,000	64,456
	PVI	1+500,000	86,956
	Tangent Grade:	1,500	
	Tangent Length:	1500,0000	
Element: Linear			
	PVI	1+500,000	86,956
	PVI	3+000,000	64,456
	Tangent Grade:	-1,500	
	Tangent Length:	1500,0000	
Element: Linear			
	PVI	3+000,000	64,456
	PVI	4+500,000	41,956
	Tangent Grade:	-1,500	
	Tangent Length:	1500,0000	
Element: Linear			
	PVI	4+500,000	41,956
	PVI	6+000,000	19,456
	Tangent Grade:	-1,500	
	Tangent Length:	1500,0000	

Fonte: Elaborada pelo Autor.

### 3.1.4 Parâmetros para hierarquização

Os volumes de corte e de aterro permitirão que sejam estimados os custos de implantação de cada uma das alternativas, estes dados são obtidos do modelo do relatório de volume de terraplenagem da Figura 23.

Para cada alternativa será calculado o comprimento virtual ( $L_v$ ) usando a Equação (1), o qual servirá como parâmetro para calcular o coeficiente de traçado de operação  $CT^i_{Operação}$  (Equação 8).

### 3.1.5 Coeficientes de traçado

Para a obtenção do valor do coeficiente de traçado de implantação  $CT^i_{Implantação}$ , utilizam-se os volumes de corte e de aterro, obtidos dos quadros de volume de terraplenagem conforme Figura 23.

A Equação (4) possibilita o cálculo do volume total de terraplenagem.

$$Vol_{total} = Vol_{aterro} + Vol_{de\ corte} \quad (4)$$

Em que:

$Vol_{total}$  : Volume total de corte e de aterro em m<sup>3</sup>;

$Vol_{aterro}$  : Volume total de aterro em m<sup>3</sup>;

$Vol_{corte}$ : Volume total de corte em m<sup>3</sup>.

Em virtude do valor calculado na Equação 4 fornecer apenas dados referentes aos volumes necessários à compensação de cortes e aterros e não trazer nenhuma informação quanto ao balanço dos volumes e do equilíbrio das operações de terraplenagem, contornou-se esta situação calculando-se a diferença entre os volumes de corte e de aterro. A finalidade deste cálculo é a de observar o possível desequilíbrio entre os volumes de corte e aterro. Caso haja desequilíbrio, a quantidade de material necessária ao complemento das operações de terraplenagem, seja bota-fora ou empréstimo, devem ser calculadas pela Equação 5.

$$Dif_{Terraplenagem} = |Vol_{aterro} - Vol_{corte}| \quad (5)$$

Em que:

$Dif_{terrapienagem}$  : Diferença entre o volume de corte e de aterro em m<sup>3</sup>;

$Vol_{aterro}$  : Volume total de aterro em m<sup>3</sup>;

$Vol_{corte}$ : Volume total de corte em m<sup>3</sup>.

A soma do resultado das Equações 4 e 5 fornecerá o volume do coeficiente de traçado  $Vol_{Coeficiente\ de\ traçado}$  obtido pela Equação 6.

$$Vol_{Coeficiente\ de\ traçado} = Vol_{total} + Dif_{Terraplenagem} \quad (6)$$

Em que:

$Vol_{Coeficiente\ de\ traçado}$  : Volume que será considerado para cálculo do coeficiente de traçado de implantação;

$Vol_{total}$  : Volume total de corte e de aterro em m<sup>3</sup>;

$Dif_{terrapienagem}$  : Diferença entre o volume de corte e de aterro em m<sup>3</sup>.

O  $Vol_{Coeficiente\ de\ traçado}$  apresentado na Equação 6, permite avaliar os volumes movimentados de cada uma das alternativas, sendo assim, valores elevados para os  $Vol_{Coeficiente\ de\ traçado}$  remeterão a altos custos de implantação independentemente dos volumes de corte e de aterro se encontrarem compensados. Da mesma forma valores baixos para os  $Vol_{Coeficiente\ de\ traçado}$  indicarão baixos custos de implantação independentemente do equilíbrio entre os volumes de corte e de aterro.

Para se obter o  $CT^i_{Implantação}$  (Equação 7) organizou-se por ordem crescente todos os resultados da Equação 6 obtidos para as “n” alternativas de traçado.

Ordenados os valores da Equação 6, calcula-se o valor da Equação 7 que representa o cociente da diferença entre o volume do coeficiente de traçado obtido da Equação 6 ( $Vol^i$ ), para a  $i$ -ésima alternativa, e o menor volume considerado das alternativas ( $Vol^1$ ), divida pela diferença entre o maior volume considerado das alternativas ( $Vol^n$ ),  $n$ -ésimo volume do coeficiente de traçado, e o menor volume considerado das alternativas ( $Vol^1$ ).

$$CT_{Imp}^i = \frac{(Vol_{Ctra}^{min} - Vol_{Ctra}^1)}{(Vol_{Ctra}^n - Vol_{Ctra}^1)} \quad (7)$$

Onde:

$CT_{Imp}^i$ : Coeficiente de traçado de implantação da  $i$ -ésima alternativa;

$Vol_{Ctra}^i$ : Volume de coeficiente de traçado que será considerado para cálculo do coeficiente de traçado de implantação para a  $i$ -ésima alternativa ;

$Vol_{Ctra}^{min}$ : Menor volume de coeficiente de traçado considerado entre as  $n$  alternativas ;

$Vol_{Ctra}^n$ : Maior volume de coeficiente de traçado considerado entre as  $n$  alternativas ;

O coeficiente de traçado de operação utiliza o comprimento virtual  $Lv$  obtido da Equação 1.

Para se obter o  $CT_{Op}^i$  (Equação 8) organizou-se por ordem crescente o resultado de  $Lv$ , obtidos pela Equação 1, para as  $n$  alternativas de traçado.

Ordenados os valores dos  $Lv$ , calcula-se o valor do  $CT_{Op}^i$  a partir da Equação 8 que representa o cociente da diferença entre o comprimento virtual obtido da Equação 1 para a  $i$ -ésima alternativa ( $Lv^i$ ) e o menor comprimento virtual considerado ( $Lv^1$ ), dividido pela diferença do maior comprimento virtual ( $Lv^n$ ), considerado das alternativas , e o  $Lv^1$ .

$$CT_{Op}^i = \frac{(Lv^{min} - Lv^1)}{(Lv^n - Lv^1)} \quad (8)$$

Em que:

$CT_{Op}^i$  = Coeficiente de traçado de operação da  $i$ -ésima alternativa;

$Lv^i$  = Comprimento virtual será considerado para cálculo do coeficiente de traçado de operação para a  $i$ -ésima alternativa ;

$Lv^{min}$  = Menor comprimento virtual considerado entre as “ $n$ ” alternativas ;

$Lv^n$  = Maior comprimento virtual considerado entre as “ $n$ ” alternativas ;

A variável  $CT_{Imp}^i$  antes representada pela Equação 6, teve que ser modificada na Equação 7 (adimensional) procedimento este também aplicado a variável  $CT_{Op}^i$ . Isto se deu devido

à necessidade de se obter uma compatibilidade entre as duas variáveis tornando-as adimensionais, o que permitiu que elas pudessem ser somadas para obtenção da variável CT (coeficiente de traçado) obtida no item 3.3.8.

### **3.1.6 Coeficiente de traçado**

A Equação (7) desenvolvida para o cálculo do  $CT^i_{imp}$  e a Equação (8) desenvolvida para o cálculo do  $CT^i_{op}$  possibilitam a determinação do coeficiente de traçado CT da Equação 9.

$$CT^i = CT^i_{implantação} + CT^i_{operação} \quad (9)$$

Em que:

$CT^i$  : Coeficiente da i-ésima alternativa;

$CT^i_{op}$ : Coeficiente de traçado de operação da i-ésima alternativa;

$CT^i_{imp}$ : Coeficiente de traçado de implantação da i-ésima alternativa.

O coeficiente de traçado proposto na Equação (9), representa a qualidade do traçado estudado considerando uma parcela relativa as características topográficas da área associadas aos volumes de corte e de aterro e uma segunda parcela que diz respeito as condições operacionais associada ao comprimento virtual da via.

Os coeficientes de traçado de implantação e o de operação da Equação 9 apresentam pesos equivalentes, entretanto as avaliações de traçados não consideram pesos iguais nas suas análises, o que sugere a necessidade da adoção de fatores que possibilitem a ponderação destes dois coeficientes. Para isto foram concebidos os pesos para a implantação ( $W_i$ ) e para a operação ( $W_o$ ), respectivamente.

$$CT^i = W_i \times CT^i_{implantação} + W_o \times CT^i_{operação} \quad (10)$$

Em que:

$CT^i$  : Coeficiente da i-ésima alternativa;

$CT^i_{operação}$  : Coeficiente de traçado de operação da i-ésima alternativa;

$CT^i_{implantação}$  : Coeficiente de traçado de implantação da i-ésima alternativa.

$W_i$ : Índice de ponderação para a implantação;

$W_o$ : Índice de ponderação para a operação.

Os índices de ponderação da Equação (10) permitem avaliar os estudos de traçados no que diz respeito aos custos associados a implantação ou a operação.

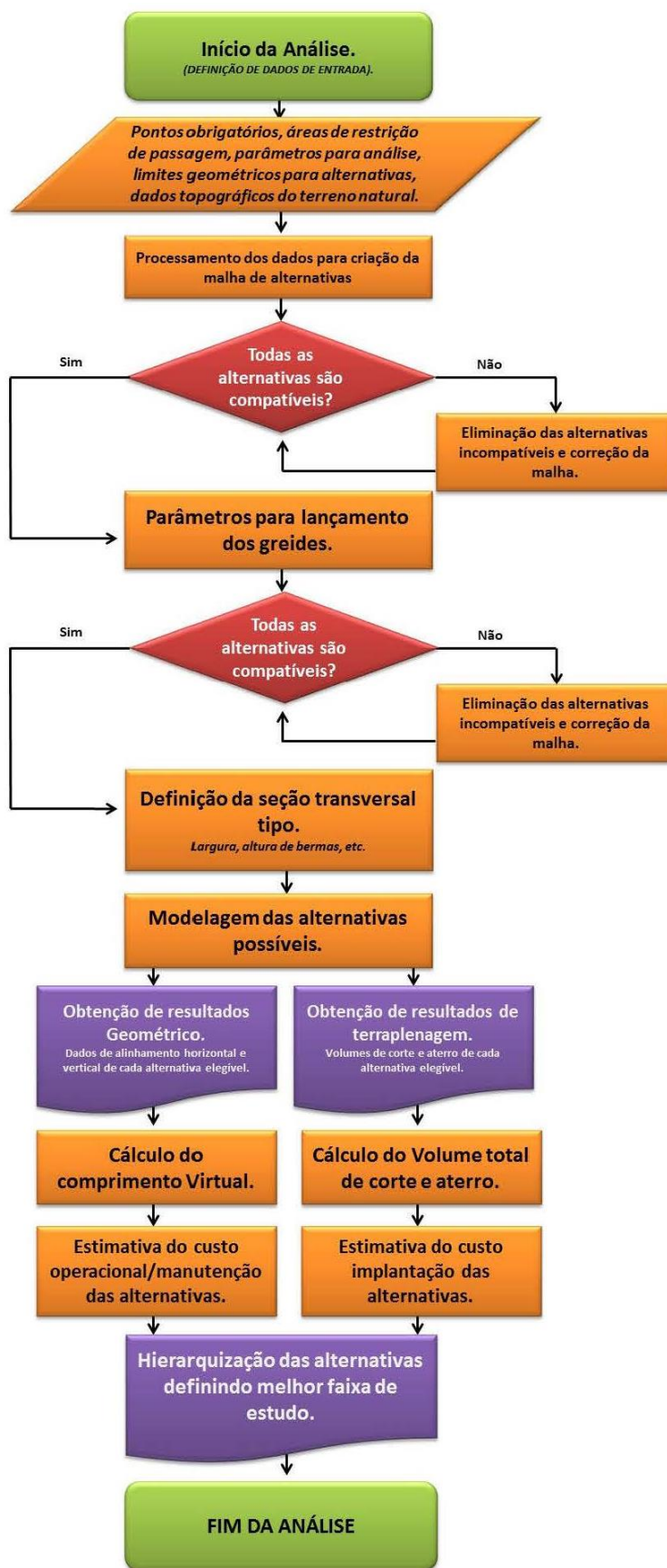
A atribuição de pesos para implantação próximos a 1,00 significam que a avaliação da alternativa de traçado deverá considerar de forma mais predominante a influência dos volumes de corte e de aterro relacionados as operações de terraplenagem.

A atribuição de pesos de operação próximos a 1,00 significam que a avaliação da alternativa de traçado deverá considerar de forma mais predominante a influência das características geométricas da alternativa relacionadas ao desempenho operacional da via.

As alternativas de traçado serão hierarquizadas tomando como base o coeficiente de traçado definidos pela Equação (10), o que propocionará a avaliação a área para o desenvolvimento do reconhecimento para estudos de traçado.

Na Figura 26 é apresentada uma síntese da sequência das etapas da metodologia desenvolvida e utilizadas para a elaboração das atividades do estudo de caso desta pesquisa.

Figura 26 – Diagrama da metodologia



Fonte: Elaborada pelo Autor.



O estudo para uma variante no trecho SPS-09 foi determinado por uma interferência do projeto inicial com dois grandes empreendimentos imobiliários, que apesar de serem posteriores ao projeto da ferrovia são obras de grande importância para a região. As características técnicas do projeto constam na Tabela 7.

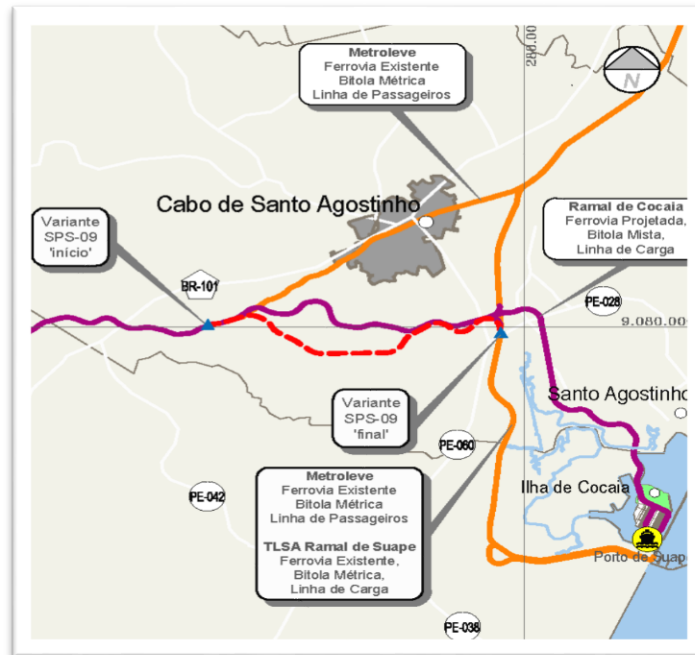
Tabela 7 - Características técnicas do projeto extraídas do projeto executivo elaborado pela HG Consultoria e Engenharia.

Critérios de projeto	
Bitola	1,00/1,60 m (Mista)
Raio mínimo de curva horizontal	400,00 m
Rampa máxima compensada	1,50 %
Velocidade Diretriz	80 km/h
Trem tipo	TB 360
Trem característico	104 vagões Hopper + 03 Locomotivas DASH
AMV linha principal	1:14 (Padrão AREMA com agulha otimizada)
Trilhos	UIC-60
Fixação	Elástica (Tipo DEENIK ou Pandrol fastclip)
Dormente Linha corrida	Monobloco de concreto
Dormente AMV	Madeira tratada
Faixa de domínio	80,00 m
Gabarito vertical livre de passagem	8,00 m (A parti do boleto)
Gabarito horizontal livre de passagem	2,80 m (A parti do eixo)

Fonte: HG Consultoria e Engenharia (2013).

O projeto da variante ferroviária se localiza no estado de Pernambuco, o ponto inicial possui as coordenadas norte = 9.080.555,6094 e este = 271.363,6096 e o ponto final as coordenadas norte = 9.079.758,3291 e este = 279.271,5685, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Trecho para estudo de caso.



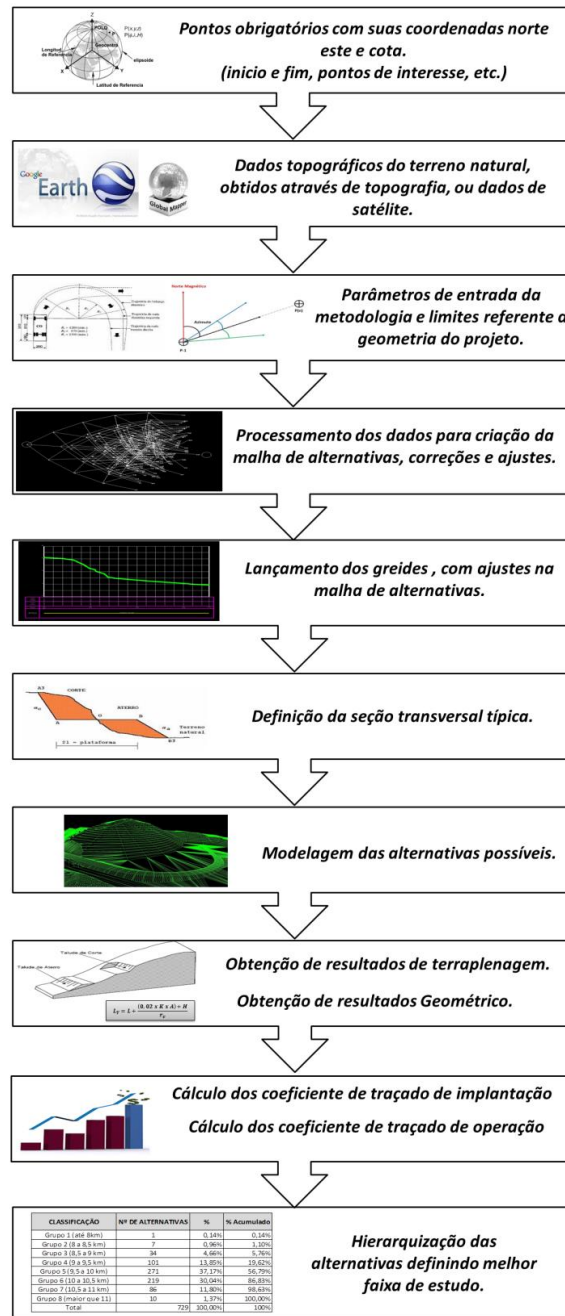
Fonte: HG Consultoria e Engenharia (2012).

As áreas de restrição foram definidas, porém a aplicação inicialmente foi feita desprezando-se as áreas de restrição e em um segundo momento considerando-as.

#### 4.2 Aplicação da metodologia proposta

A aplicação da metodologia segue as etapas indicadas na Figura 29.

Figura 29 - Aplicação da metodologia no estudo de caso

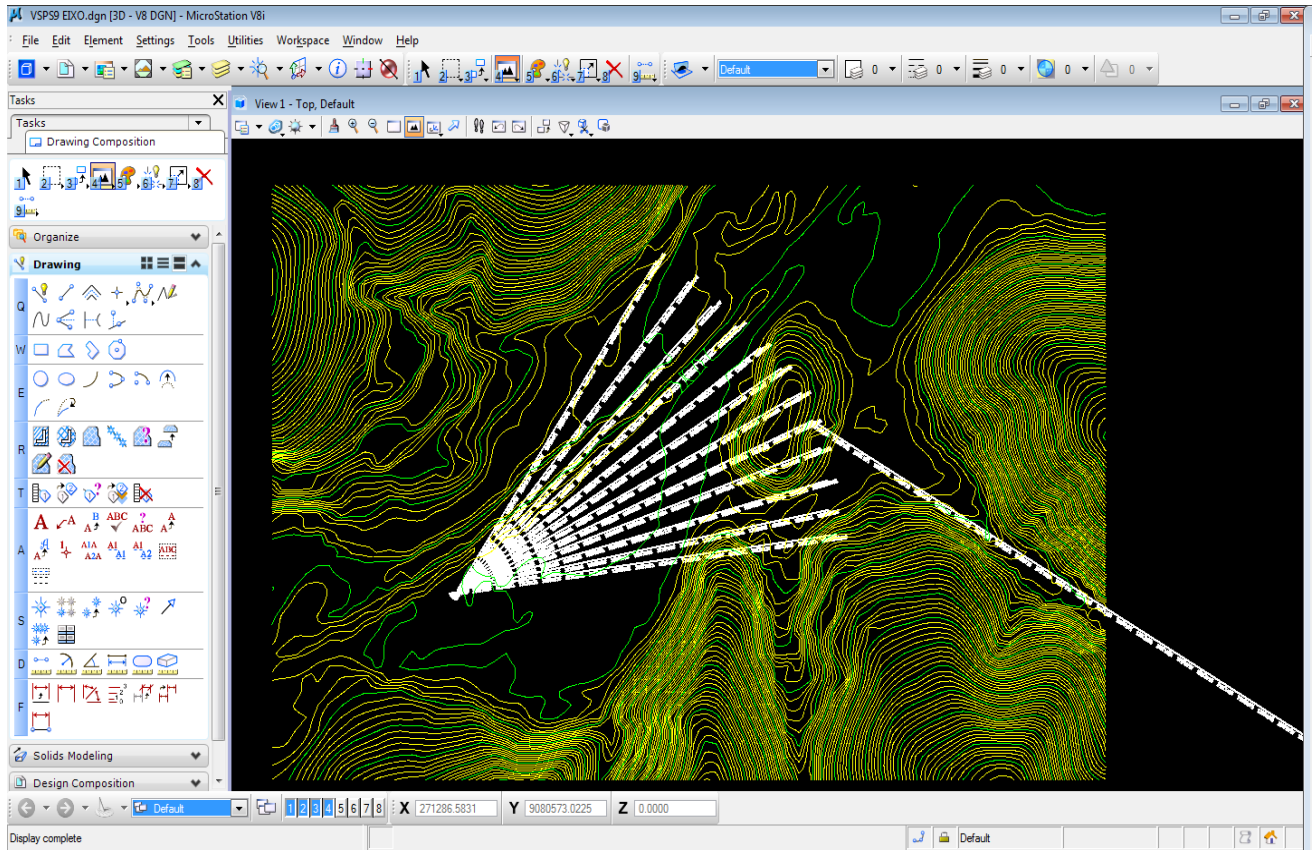


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após todos os ajustes nos cálculos dos pontos, verificação dos alinhamentos e superfície digital do terreno, foi feita uma primeira tentativa de aplicação da metodologia com os seguintes parâmetros:

- Numero de alternativas por pontos: 9
- Ângulo de abertura para cada alternativa: 15°
- Extensão máxima das tangentes: 500 m

Figura 30 - Início dos trabalhos de lançamento das alternativas.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após as primeiras iterações (Figura 30) foram necessários ajustes nos parâmetros tendo em vistas o grande número de processamentos requeridos com as premissas iniciais.

O número de alternativas é função direta da quantidade de alternativas por pontos e da extensão determinada para os passos das tangentes, conforme Equação (10).

$$Q_{Al} = n^{\left(\frac{Ext}{p}\right)} \quad (10)$$

Em que:

$Q_{Alt}$  : Quantidade de alternativas;

$n$ : número de alternativas por cada ponto;

$Ext$  : extensão total do trecho;

$p$  : passo das tangentes.

Para o caso proposto ter-se-ia:

$$Q_{Alternativas} = 9^{\left(\frac{9000}{500}\right)} = 1,50 \times 10^{17}$$

Em virtude do tempo necessário e das limitações existentes optou-se por minimizar os parâmetros de análise a fim de se obter resultados que possibilitassem a conclusão dos estudos em tempo hábil.

Em um segundo momento, os parâmetros foram ajustados e refeitos os lançamentos iniciais.

Foram definidos os seguintes parâmetros para aplicação da metodologia.

- Número de alternativas por pontos: 3
- Ângulo de abertura para cada alternativa: 45°
- Extensão máxima das tangentes: 1500 m

$$Q_{Alternativas} = 3^{\left(\frac{9000}{1500}\right)} = 729$$

Para iniciar a aplicação da metodologia foi necessário obter dados topográficos para a criação do modelo digital do terreno natural. Estes dados foram obtidos de informações de satélites usando o *Global Mapper*.

Para o presente estudo de caso foi calculado o conjunto formado por 1.093 pontos que permitiram a montagem das 729 alternativas.

Na Tabela 8 é apresentado um exemplo dos dados necessários para a construção da malha de pontos para a montagem de todas as 729 alternativas. Para ilustração, é apresentada somente a tabela de pontos da malha que contém os últimos três pontos calculados, de um total de 364 tabelas utilizadas.

Tabela 8- Pontos calculados para montagem das alternativas

TABELA DE CALCULO DOS PONTOS DA MALHA - 364		
	Norte (Y)	Este (X)
PONTO INICIAL	9.076.966,8120	277.608,4755
PONTO FINAL	9.079.758,3291	279.271,5685
□N	2791,5171	
□E	1663,0930	
Rumo	30,7851	
Azimute	30,7851	
Extensão do passo	1500	
Azimute (RAD)	0,5373	
Ângulo Ponto A (RAD)	-0,2481	
Ângulo Ponto C (RAD)	1,3227	
PONTO 1091	9078420,8841	277240,1357
PONTO 1092	9078255,4518	278376,2042
PONTO 1093	9077335,1518	279062,5477

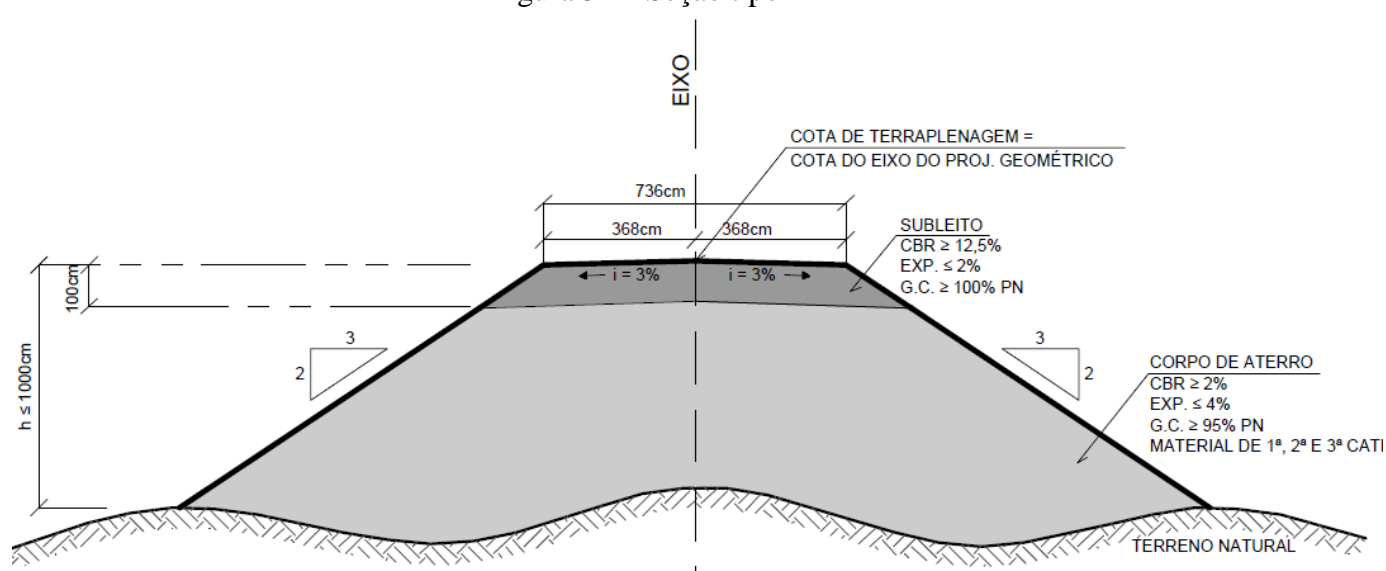
Fonte: Elaborada pelo Autor.

De posse das 364 tabelas que forneceram os 1.093 pontos foram montadas as 729 alternativas de traçado.

### 4.3 Modelagem das alternativas

Definidos os alinhamentos horizontais e os alinhamentos verticais conforme explicado no item 3.3, foi efetuada a modelagem de cada uma das alternativas, utilizando-se a seção tipo adotada do projeto, Figura 31.

Figura 31 – Seção tipo



Fonte: HG consultoria e engenharia 2013.

#### 4.4 Relatórios de volumes de terraplenagem

Concluída a modelagem de cada alternativa foi possível obter os relatórios de volumes de terraplenagem, contendo os volumes totais de corte e de aterro. A Tabela 9 apresenta os cinco primeiros e os cinco últimos resultados dos volumes obtidos.

Tabela 9 - Resultados obtidos para volumes de terraplenagem

<b>Nº da Alternativa</b>	<b>Volume Corte (m³)</b>	<b>Volume Aterro (m³)</b>
1	636.651,74	4.130.894,43
2	596.287,80	4.194.137,49
3	4.173.516,90	120.367,89
4	3.636.463,97	836.885,91
5	3.815.234,56	629.126,39
⋮	⋮	⋮
725	8.769.635,68	816.270,46
726	8.756.476,45	795.293,08
727	9.856.285,53	246.964,65
728	8.849.622,36	300.391,71
729	8.955.542,95	246.888,55

Fonte: Elaborada pelo Autor.

#### 4.5 Relatórios de características geométricas

Os relatórios de características geométricas foram obtidos após a definição dos alinhamentos horizontais, alinhamentos verticais e suas respectivas concordâncias. Os dados contidos nos relatórios subsidiaram o cálculo do comprimento virtual das 729 alternativas.

A Tabela 10 apresenta os cinco primeiros e os cinco últimos resultados dos comprimentos virtuais.

Tabela 10 - Resultados obtidos para comprimento virtual

<b>Nº da Alternativa</b>	<b>Comprimento Virtual (km)</b>
1	11,36
2	10,70
3	11,00
4	10,73
5	10,09
⋮	⋮
725	10,09
726	10,73
727	11,00
728	10,70
729	11,36

Fonte: Elaborada pelo Autor.

#### 4.6 Coeficiente de traçado de implantação

Os coeficientes de traçado de implantação foram calculados para as alternativas conforme exemplificado na Tabela 11 que apresenta os cinco primeiros e os cinco últimos resultados dentre os 729 coeficientes de traçado de implantação (*Cti*) determinados.

Tabela 11 - Resultados do coeficiente de traçado de implantação

<b>Nº da Alternativa</b>	<b>Volume Corte (m³)</b>	<b>Volume Aterro (m³)</b>	<b>Cti implantação</b>
1	636.651,74	4.130.894,43	0,185
2	596.287,80	4.194.137,49	0,188
3	4.173.516,90	120.367,89	0,187
4	3.636.463,97	836.885,91	0,161
5	3.815.234,56	629.126,39	0,170
⋮	⋮	⋮	⋮
725	8.769.635,68	816.270,46	0,404
726	8.756.476,45	795.293,08	0,403
727	9.856.285,53	246.964,65	0,455
728	8.849.622,36	300.391,71	0,408
729	8.955.542,95	246.888,55	0,413

Fonte: Elaborada pelo Autor.

#### 4.7 Coeficiente de traçado de operação

Os coeficientes de traçado de operação foram calculados para as alternativas conforme exemplificado na Tabela 12.

A Tabela 12 apresenta os cinco primeiros e os cinco últimos resultados dentre os 729 coeficientes de traçado de operação (*Cto*) determinados.

Tabela 12 - Resultados do coeficiente de traçado de operação

<b>Nº da Alternativa</b>	<b>Comprimento Virtual (km)</b>	<b>C<sub>ti</sub> operação</b>
1	11,359	1,000
2	10,701	0,942
3	10,998	0,968
4	10,732	0,945
5	10,093	0,888
⋮	⋮	⋮
725	10,09	0,889
726	10,73	0,945
727	11,00	0,968
728	10,70	0,942
729	11,36	1,000

Fonte: Elaborada pelo Autor.

#### 4.8 Coeficiente de traçado

Calculados os coeficientes de traçado de implantação e de operação e admitindo-se os pesos ( $W_i$  e  $W_o$ ), foi possível obter os coeficientes de traçado apresentados na Tabela 13, o que possibilitou hierarquizar as alternativas e definir a melhor área para o estudo de traçado na fase de reconhecimento.

O traçado definido de forma subjetiva pela consultora, responsável pela elaboração do projeto executivo, buscou soluções que apresentassem baixos custos de implantação.

Nesta pesquisa foram adotados os valores de 0,80 para ( $W_i$ ) e 0,20 para ( $W_o$ ). A atribuição de um maior peso para implantação ( $W_i$ ) empregada no modelo visou à obtenção de uma resposta do modelo quanto à influência da implantação ( $I_i$ ) na definição das melhores áreas a serem avaliadas na fase de reconhecimento dos estudos de traçado.

Os resultados obtidos (Tabela 13) foram comparados com a solução apresentada pela consultora.

Tabela 13 - Resultados do coeficiente de traçado

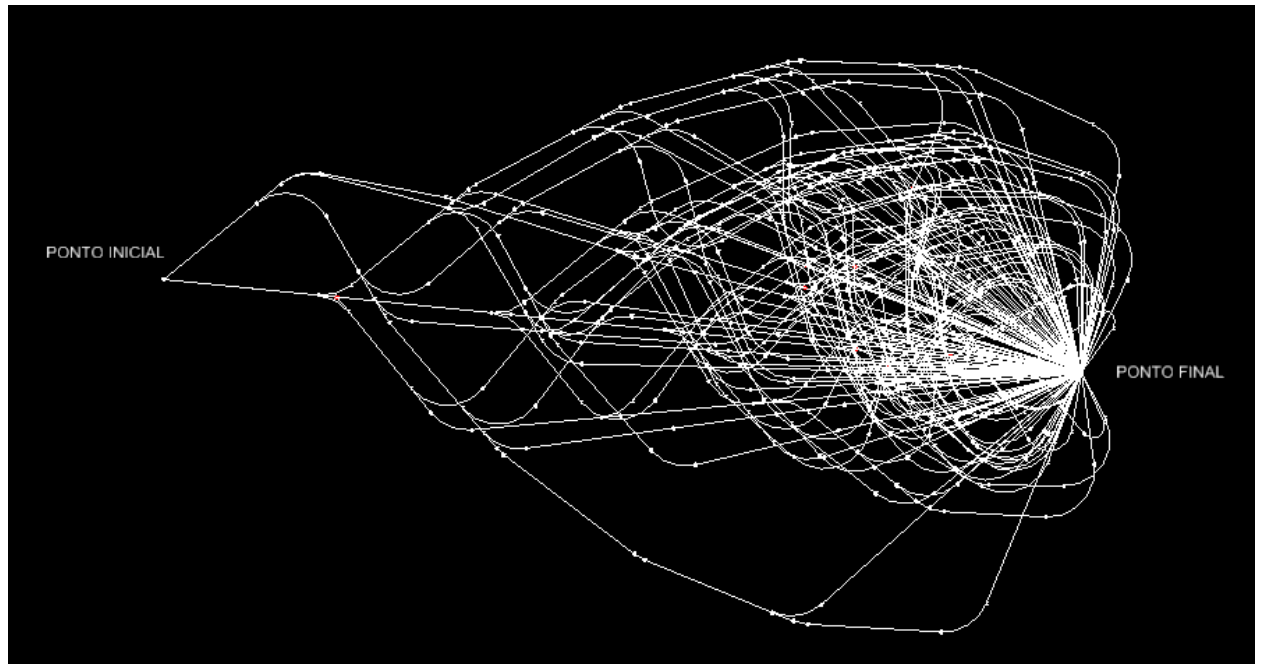
<b>Nº da Alternativa</b>	<b>Cti Implantação</b>	<b>Cti operação</b>	<b>Índice de ponderação de implantação (Ii)</b>	<b>Índice de ponderação de operação (Io)</b>	<b>Ct</b>
1,00	0,1848	1,0000	0,80	0,20	0,3478
2,00	0,1878	0,9420	0,80	0,20	0,3386
3,00	0,1868	0,9681	0,80	0,20	0,3431
4,00	0,1614	0,9448	0,80	0,20	0,3181
5,00	0,1699	0,8885	0,80	0,20	0,3136
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
725	0,404	0,889	0,80	0,20	0,50
726	0,403	0,945	0,80	0,20	0,51
727	0,455	0,968	0,80	0,20	0,56
728	0,408	0,942	0,80	0,20	0,51
729	0,413	1,000	0,80	0,20	0,53

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com os resultados do coeficiente de traçado tornou-se possível definir a área onde se concentram as melhores alternativas de traçado e assim utiliza-la para a fase de reconhecimento de estudos de traçado.

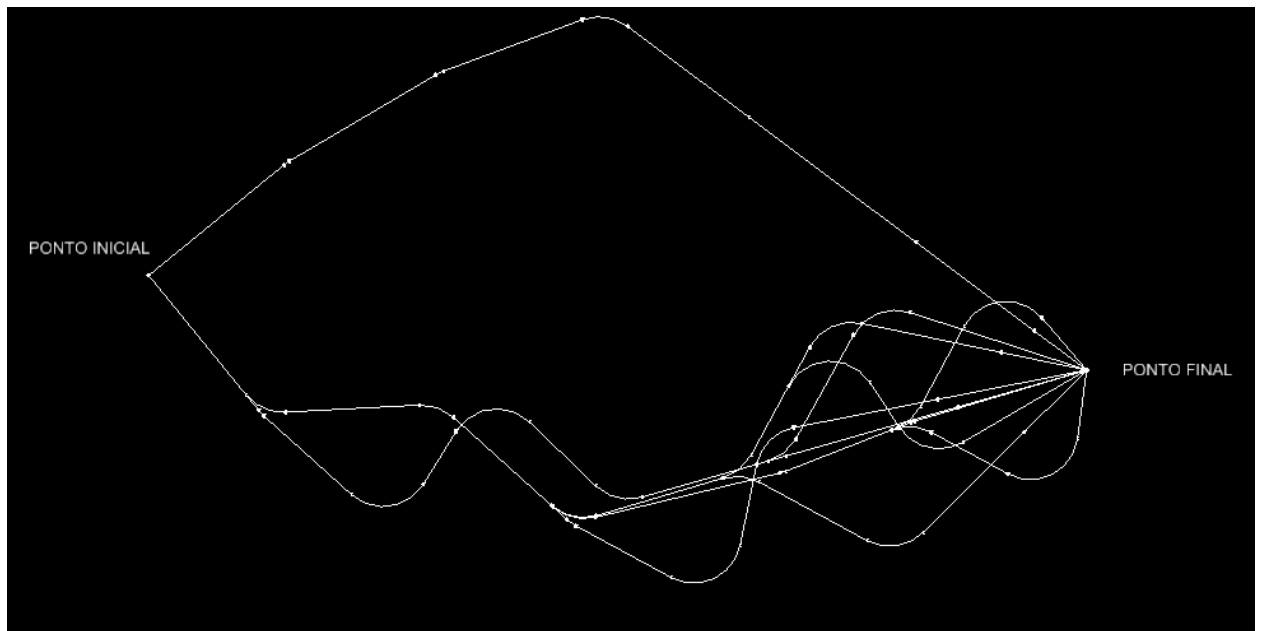
Com a hierarquização das alternativas foi possível determinar a área mais propícia para a realização do reconhecimento necessário para o estudo de traçado, essa definição foi feita determinando a região onde se concentram as alternativas com melhores coeficientes de traçado. Nas Figuras 32 e 33 apresentam as melhores alternativas sem considerar as áreas de restrição e considerando as áreas de restrição respectivamente, utilizando os pesos ( $W_i$ ) 0,80 e ( $W_o$ ) 0,20.

Figura 32 - Melhores alternativas de traçado sem considerar áreas de restrição



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 33 - Melhores alternativas de traçado considerando áreas de restrição



Fonte: Elaborada pelo Autor.

## **5 CONCLUSÃO**

### **5.1 Considerações finais**

A proposição desta metodologia para se analisar áreas destinadas ao estudo de traçado de obras lineares contribui para o preenchimento de uma lacuna observada na literatura, adotar uma metodologia de análise com parâmetros objetivos melhorará substancialmente o resultado final dos projetos de obras lineares e conseqüentemente a execução das obras.

### **5.2 Benefícios da abordagem proposta**

Com a adoção de uma metodologia para se analisar as alternativas de traçado é possível definir objetivamente os benefícios de se escolher um traçado em detrimento de outros, afastando fatores subjetivos que por vezes prejudicam tecnicamente o resultado final de uma obra.

A possibilidade de hierarquizar alternativas de traçado com parâmetros objetivos dará aos projetistas mais subsídios para defesa dos melhores traçado sob a luz de aspectos técnicos.

Os resultados obtidos mostraram que a metodologia é viável e que a mesma poderá se estender para outras obras.

A não consideração da área de restrição também foi útil para avaliarmos qual seria a melhor área caso não houvesse impedimento algum e neste caso a área coincide exatamente com o local onde se encontra a ferrovia existente.

Abre-se uma gama de estudos para correção e ajustes do modelo proposto e seus diversos parâmetros, bem como o acréscimo de outros elementos importantes na avaliação de um traçado de um projeto de obras lineares.

### **5.3 Limitações do estudo**

O estudo apresentado limita-se a ao estudo de traçado para obras ferroviárias. Entretanto nada impede que ajustes sejam feitos para ampliar seu campo de utilização.

Em virtude das limitações temporais foram feitas simplificações para possibilitar a aplicação em um estudo de caso. Entre as simplificações que limitam o estudo destacam-se:

A coincidência das curvas horizontais e concordâncias verticais.

A metodologia não prevê a avaliação da distância média de transporte, pois não foram consideradas a localização das ocorrências dos cortes e dos aterros.

A qualidade dos materiais de terraplenagem não é considerada.

### **5.4 Sugestões para estudos futuros**

Para estudos futuros seguindo a mesma linha de pesquisa sugere-se:

Que o centro de massa de cada ocorrência (corte ou aterro) seja levado em consideração.

A inclusão de parâmetros como as características geotécnicas da região e os custos de desapropriação sejam inseridos para melhorar os resultados.

Para o lançamento das alternativas utilizar uma defasagem entre os pontos de interseção horizontais e verticais em um estudo futuro.

A metodologia necessita que sejam agregados recursos computacionais que possibilitem a sua aplicação de forma que os parâmetros de varredura da área possam ser ampliados.

O desenvolvimento de algoritmos que minimizem os passos da metodologia tornando-a mais simples o processamento das informações, tornando-a viável ao planejamento e ao estudo de obras lineares.

## **6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AKAY, A. E., A New Method of Designing Forest Roads. Kahramanmaraş S.t • . Ümam University, Faculty of Forestry, Department of Forest Engineering, 2003.

ANDRADE, J. B. de. Fotogrametria. Curitiba: SBEE. 1998.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E. Sistemas de Informações Geográficas: aplicações na agricultura. 2ª edição. Brasília: Embrapa. 1998.

ASSALIM, L., Avaliação da conformidade como ferramenta de aprendizagem organizacional em projetos de engenharia de grandes empreendimentos, Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

BRAQUEHAIS, D. D., Estudo do comprimento virtual de um trecho de ferrovia: uma análise comparativa. Monografia. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Fortaleza 2014.

BRINA, H.L. , Estradas de Ferro, São Paulo, Livros Técnicos e Científicos S.A. , 1983.

CARVALHO, M. P.. Curso de Estradas: estudos, projetos e locação de ferrovias e rodovias. 4 ed., v. 1. Rio de Janeiro: Científica, 1970.

CHEW, E.P., C.J. Goh and T.F. Fwa. 1989. Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignment for highways. Transportation Research, 23B: 315-329.

CNI, Confederação Nacional da Indústria. Infraestrutura - O custo do atraso e as reformas necessárias. Brasília, CNI 2014.

CORTELETTI, R.C., Desenvolvimento de metodologia para concepção de Traçados de dutos de transporte de gás natural, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

COSTA, P. S. e FIGUEIREDO, W. C. Estradas Estudos e Projetos. EDUFBA, Salvador, 2001.

DINSMORE, P. C. Transformando estratégias empresariais em resultados através da gerência por projetos. Rio de Janeiro: Qualimark, 2004. 284 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. Diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários. Rio de Janeiro, 2010. 564p.

ELLER, R. A. G., Sousa Junior, W. C. and Curi, M. L. C. Custos do transporte de carga no Brasil: rodoviário versus ferroviário. Journal of Transport Literature, vol. 5, n. 1, pp. 50-64. 2011.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. Cap.7. p.1. Disponível em: [http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/aulas\\_files/cap7-mnt.pdf](http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/aulas_files/cap7-mnt.pdf). Acesso em: 30/09/2007.

FILHO, G.P. Estradas de rodagem: projeto geométrico. São Carlos: Bidim, 1998. 432p

FIORONI, M. M., Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: Avaliação de alternativas para direcionamento de composições. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

GARCIA, J.L.K., Oportunidades e desafios para a engenharia consultiva no Brasil: Infraestrutura de transporte, Rio de Janeiro, IPEA, 2014.

GEISBERGER, R. Advanced Route Planning in Transportation Networks. zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften von der Fakultät für Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie genehmigte. München 2011.

GOKTEPE, A. B. Dynamic optimization algorithm for vertical alignment. Department of Civil Engineering, 35100, Bornova, Izmir, Istanbul Technical University, Department of Civil Engineering, 34469, Ayazaga, Istanbul. 2005,

GRUBBA , D. C. R. P., SONCIM, P. S., SILVA JR, W.S., LEOMAR, J. F. Aperfeiçoamento metodológico do ensino de projeto geométrico de rodovias com auxílio de uma ferramenta computacional. USP - Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Transporte. 2008.

HELDMAN, K. Gerência de projetos: guia para o exame oficial do PMI. 3. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

ICHIHARA, K., T. Tanaka, I. Sawaguchi, S. Umeda and K. Toyokawa. 1996. The method for designing the profile of forest roads supported by genetic algorithm. The Japanese Forestry Society, Journal of Forestry Research, 1: 45-49.

K, M. Multicriteria decision-making in railway route planning and design, University of Belgrad Faculty of Transport and Traffic Engineering. Građevinar 2012.

LEE, S.H. Introdução ao projeto geométrico de rodovias. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002. 418p.

LISBOA, M. V., Contribuição para tomada de decisão na classificação e seleção de alternativas de traçado para rodovias em trechos urbanizados, Escola Politécnica da UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. SÃO PAULO, 2002. 194P.

LOBER, R. e Wilson R.L., Route Location. Proceedings of the Institution of Civil Engineer North Wales Coastal St Asaph to Aber, part 1, p.895-937. 1988.

MANGHI, G., CAVALLINI, P. e NEVES, V. Quantum GIS: Um desktop potente e amigável. Revista FOSSGIS Brasil, Junho 2011. Disponível em: [www.fossgisbrasil.com.br](http://www.fossgisbrasil.com.br). Acesso dia 10/10/2011.

MATTOS, J. R .G. e ALBANO, J . F., Ensino de projeto rodoviário na Escola de Engenharia da UFRGS, VI SEPROSUL – Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana Novembro de 2006, UFSC, Florianópolis, SC.

MOREB, A. A., Linear programming model for finding optimal roadway grades that minimize earthwork cost. European Journal of Operational Research Department of Industrial Engineering, King Abdul Aziz University, P.O. Box 9027, Jeddah 21413, Saudi Arabia. 1995.

PIMENTA, C.R.T. e OLIVEIRA, M.P. Projeto geométrico de rodovias. São Carlos: RiMa. 2001. 198p.

PITERI, M. A. C. et al. Triangulação de Delaunay e o princípio de inserção randomizado. II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Presidente Prudente, ISSN 1981-6251, p. 655-663, jun. 2007.

PLOWMAN, E. G. e Imhoff, E. A, The Inevitable Compromise – Higway Vs. The ENVIRONMENT. TRAFFIC QUARTELY, V.26, N.2, P.177-188. 1972.

ROSSETO, C. F., Modelo para programação de despachos de trens em vias singelas, 152 p. Dissertação de Mestrado. USP, Escola Politécnica de São Paulo. 1997.

SENÇO, W. Estradas de Rodagem: Projeto. São Paulo: Grêmio Politécnico. 1980.

SENÇO, W., Manual de Técnicas de Projetos Rodoviários. São Paulo: PINI, 2008.

WORLD ROAD CONGRESS, 20., Montreal, 1955. The Environment. Paris: PIARC, 1995.