

***INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA***



Filipe Simões Melo

Pesquisa operacional aplicada na definição de geometria de  
pista de pouso e decolagens.

*Trabalho de Graduação*

2014

***Civil***

Filipe Simões Melo

**Pesquisa operacional aplicada na definição de geometria de  
pista de pouso e decolagens.**

Orientador

Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA)

**Engenharia Civil-Aeronáutica**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
COMANDO-GERAL DE TECNOLOGIA AEROESPACIAL  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2014

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Melo, Filipe S.

Pesquisa operacional aplicada na definição de geometria de pista de pouso e decolagens./ Filipe Simões Melo.

São José dos Campos, 2014.

59 f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2014.

Orientador: Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho

1. Aeroportos. 2. Projeto Geométrico de Aeroportos. 3. Pesquisa Operacional. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. II. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

MELO, Filipe S. **Pesquisa operacional aplicada na definição de geometria de pista de pouso e decolagens**. 2014 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Filipe Simões Melo

TÍTULO DO TRABALHO: Pesquisa operacional aplicada na definição de geometria de pista de pouso e decolagens. TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2014

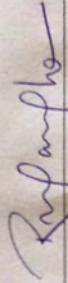
É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Filipe Simões Melo

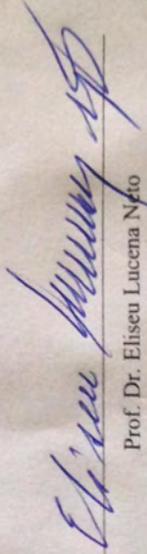
Rua Rafael Tobias, 2909, casa 8

CEP 60830-105 - Fortaleza - CE



Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 27 de novembro de 2014

Dedico esse trabalho à Leonardo da Vinci.

“Aprender é a única coisa que a mente nunca se cansa,  
nunca tem medo e nunca se arrepende.”

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, George e Roberta, por me proporcionarem a vida.

Aos familiares, pelo amor incondicional.

Aos amigos do ITA, pelo sentido desta jornada.

Aos amigos de Portugal, por me ensinarem que não se deve parar nunca.

Aos professores Ronaldo e Paulo Ivo, pela condução deste trabalho.

Aos mestres do ITA, por toda a paciência.

Ao Senhor Nelson Rocha, pelo aprendizado e confiança.

Aos engenheiros Thiago Fiorio, Ana Elisa e Paulo Júnior, pelos ensinamentos.

E em especial, à minha avó Cleide, pela educação, criação e motivação. Espero que a senhora possa ver onde cheguei até esse momento e que tenha orgulho de mim.

## **RESUMO**

Este trabalho dedica-se a elaborar uma metodologia capaz de otimizar os volumes de corte e aterro e a compensação entre ambos em determinado sítio aeroportuário, volumes estes provenientes de um projeto geométrico.

A metodologia aplicada é realizada através de uma pesquisa operacional onde a função objetivo é o valor da compensação entre corte e aterro, as variáveis de decisão são componentes geométricas do projeto geométrico e as condições de contorno são aquelas dispostas nas normas internacionais da ICAO.

## **ABSTRACT**

This work is dedicated to develop a methodology to optimize the cut and fill volumes and compensation between them at any given airport site, these volumes results of a geometric design.

The methodology applied is performed through an operational research where the objective function is the compensation value between cut and fill, the decision variables are geometric components of the geometric design and the boundary conditions are those willing to international ICAO standards.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Mapa de isolinhas simplificado. (INPE)</b> .....	16
<b>Figura 2: Modelo de superfície gerada por uma grade retangular. (INPE)</b> .....	17
<b>Figura 3: Modelo de superfície gerada por grade triangular. (INPE)</b> .....	18
<b>Figura 4: Elaboração de produto em uma superfície trabalhada. (UFSC)</b> .....	19
<b>Figura 5: Anemograma. (DIRENG)</b> .....	21
<b>Figura 6: Exemplo de estaqueamento de uma pista de pouso e decolagem. (ROCHA ENGENHARIA)</b> .....	23
<b>Figura 7: Alinhamento Vertical ou Perfil. (DIRENG)</b> .....	23
<b>Figura 8: Seção transversal tipo.</b> .....	25
<b>Figura 9: Modelamento da superfície e regiões de corte (azul) e aterro (rosa). (ROCHA ENGENHARIA)</b> .....	25
<b>Figura 10: Seções transversais e indicações de corte e aterro (DIRENG)</b> .....	26
<b>Figura 11: Prismóides considerados para o cálculo.</b> .....	27
<b>Figura 12: Exemplo de expansão e contração dos solos durante a terraplenagem. (DIRENG)</b> .....	29
<b>Figura 13: Canaleta superficial, longitudinal à pista de pouso. (ROCHA ENGENHARIA)</b> .....	30
<b>Figura 14: Tabela 1.1 doc. 9157 – parte 1 (ICAO-2006)</b> .....	33
<b>Figura 15: Exemplo de alinhamento vertical composto por duas tangentes e uma parábola.</b> .....	34
<b>Figura 16: Exemplo de seção transversal com as suas respectivas declividades.</b> .....	38
<b>Figura 17: Largura da pista de pouso em acordo com a norma da ICAO. (ICAO-2006)</b> ..	38
<b>Figura 18: Exemplo de seção transversal com os respectivos valores de j para cada offset.</b> .....	43
<b>Figura 19: Aeroporto de Crateús – CE.</b> .....	46

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Inserção de dados de entrada na planilha eletrônica.</b> .....	47
<b>Tabela 2: Larguras auxiliares para aquisição de dados topográficos.</b> .....	48
<b>Tabela 3: Tabela de inserção de dados de topografia 01/02.</b> .....	48
<b>Tabela 4: Tabela de inserção de dados de topografia 02/02.</b> .....	49
<b>Tabela 5: Chute inicial das variáveis de decisão.</b> .....	50
<b>Tabela 6: Pontos geométricos auxiliares.</b> .....	50
<b>Tabela 7: Tabela auxiliar de condições de contorno.</b> .....	51
<b>Tabela 8: Volumes gerado pelo chute inicial.</b> .....	51
<b>Tabela 9: Variáveis de decisão após pesquisa operacional.</b> .....	52
<b>Tabela 10: Volumes finais após o modelamento da pesquisa operacional.</b> .....	52
<b>Tabela 11: Cotas de projeto resultante do modelamento 01/02.</b> .....	53
<b>Tabela 12: Cotas de projeto resultante do modelamento 02/02.</b> .....	54

## **Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos**

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

RBAC – Regulamento Brasileiro de Aviação Civil

FAA – Federal Aviation Administration

ICAO – International Civil Aviation Organization

PBZPA – Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromos

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. AQUISIÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS.....	14
2.1. Aquisição de Dados.....	15
2.2. Geração de Grades .....	16
2.3. Elaboração do Produto .....	19
3. PROJETO GEOMÉTRICO.....	20
3.1. Alinhamento Horizontal ou Traçado.....	20
3.2. Alinhamento Vertical ou Perfil .....	23
3.3. Seções Transversais.....	24
3.4. Cálculo de Volumes .....	26
3.5. Camada Vegetal .....	27
3.6. Espessura do pavimento.....	28
3.7. Fator de homogeneização.....	28
3.8. Largura da Drenagem.....	29
4. MODELAMENTO MATEMÁTICO .....	31
4.1. Alinhamento Horizontal.....	31
4.2. Alinhamento Vertical .....	33
4.3. Seções Transversais.....	37
4.4. Mudança de nomenclatura .....	41
4.5. Cálculo de Volumes .....	43
5. ESTUDO DE CASO .....	46
5.1. Inserção dos dados de entrada.....	46
5.2. Inserção dos dados de topografia .....	48
5.3. Variáveis de decisão e condições de contorno – Comparação de volumes.....	49
6. CONCLUSÃO .....	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	58

## 1. INTRODUÇÃO

O serviço de terraplenagem tem como objetivo a conformação do relevo terrestre para implantação de obras de engenharia, tais como açudes, canais de navegação, canais de irrigação, rodovias, ferrovias, aeroportos, pátios industriais, edificações, barragens e plataformas diversas. Define-se assim que a terraplenagem é a técnica de engenharia de escavação e movimentação de solos e rochas.

A terraplanagem também pode ser definida como a arte de mudar a configuração do terreno. Resumidamente, refere-se a remoção de material de um determinado local (corte) para o preenchimento de um local que esteja em falta (aterro), tendo em vista a implantação de um determinado projeto[1].

Uma parte importante para elaboração de um projeto de infraestrutura é a sua geometria, esta impacta diretamente nas movimentações de terras que serão implementadas na fase de obra, impactando diretamente nos custos do empreendimento.

Desta forma, um bom projeto geométrico deve ser aquele que atende plenamente as recomendações preconizadas em norma de forma a prover segurança adequada aos usuários e deve buscar o menor volume de movimentação de terras possível, para que os custos de implementação da obra de infraestrutura sejam minimizados.

O presente trabalho visa elaborar um algoritmo capaz de reduzir os volumes de movimentação de terra preconizados por um projeto geométrico para implantação ou ampliação de pistas de aeroportos, e buscar o mínimo possível de compensação entre corte e aterro para que não seja possível ter de buscar ou descartar terras fora do sítio aeroportuário, seguindo as diretrizes normativas do Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC nº 154, da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2009), este amparado pelas normas e práticas recomendadas pelo Anexo 14, Volume 1 – Aerodrome Design and Operations (ICAO, 2004).

A otimização dos volumes de terra será realizada através de uma pesquisa operacional, em que as variáveis de decisão são partes componentes do projeto geométrico e as restrições das variáveis são aquelas preconizadas por norma.

## 2. AQUISIÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS

De uma forma genérica, um projeto pode ser entendido como o detalhamento da implementação de um empreendimento. Todo projeto pode-se apresentar em maior ou menor grau de detalhamento em função da sua finalidade, importância, tempo e recursos disponíveis para a elaboração.

O projeto de terraplenagem de aeroportos se faz de maneira semelhante a projetos de terraplenagem de rodovias. As diferenças básicas ocorrem na geometria das seções e nas condições de compactação.

O primeiro passo para a elaboração de um projeto de terraplenagem é a realização de um levantamento topográfico e geotécnico consistente. Através do levantamento topográfico é possível conhecer a configuração planialtimétrica do terreno incluindo a identificação e locação de cursos d'água, estradas, edificações, redes diversas, etc.

Quanto mais refinado for o levantamento topográfico maior será a precisão da estimativa de volumes de movimentação de terras. Para um projeto de infraestrutura aeronáutica recomenda-se o levantamento de uma malha de pontos com distância aproximada de 20 m. As curvas de nível são obtidas a partir da interpolação dos pontos do nivelamento.

O levantamento geotécnico permitirá conhecer as características dos diversos materiais que constituem o subsolo local identificando a sua aplicabilidade ou não no projeto de terraplenagem[1].

Como este estudo apresenta um método exclusivamente numérico para a movimentação de terras na área do sítio aeroportuário, as características geotécnicas serão desconsideradas devido ao alto grau de complexidade e custo computacional necessário para contabilizar as suas prerrogativas.

Para a geração da superfície 3D do terreno, os principais softwares disponíveis na atualidade utilizam-se de um Modelo Digital do Terreno (MDT). O modelo digital do terreno é uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno pode ser variado.

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável a criação de um modelo digital, podendo ser por equações analíticas ou por uma rede de pontos na forma de uma grade de pontos regulares e ou irregulares. A partir dos modelos pode-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas

ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

No processo de modelagem numérica de terreno podemos distinguir três fases: aquisição dos dados, geração de grades e elaboração de produtos representando as informações obtidas.

### 2.1. Aquisição de Dados

A aquisição destes dados pode ser realizada por levantamentos de campo, digitalização de mapas, medidas fotogramétricas a partir de modelos estereoscópicos e dados altimétricos adquiridos de GPSs, aviões e satélites. Entretanto as aplicações ou produtos de MDT não são elaborados sobre os dados amostrados, mas sim dos modelos gerados no formato de grade regular ou irregular. Estes formatos simplificam a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápidos computacionalmente.

Os métodos de aquisição de dados podem ser por pontos amostrados com espaçamento irregular e regular bem como por mapa de isolinhas.

#### a) Amostragem por pontos:

O cuidado na escolha dos pontos e a quantidade de dados amostrados estão diretamente relacionados com a qualidade do produto final de uma aplicação sobre o modelo. Para aplicações onde se requer um grau de realismo maior, a quantidade de pontos amostrados, bem como o cuidado na escolha desses pontos, ou seja a qualidade dos dados, são decisivos. Quanto maior a quantidade de pontos representantes da superfície real, maior será o esforço computacional para que estes sejam armazenados, recuperados, processados, até que se alcance o produto final da aplicação.

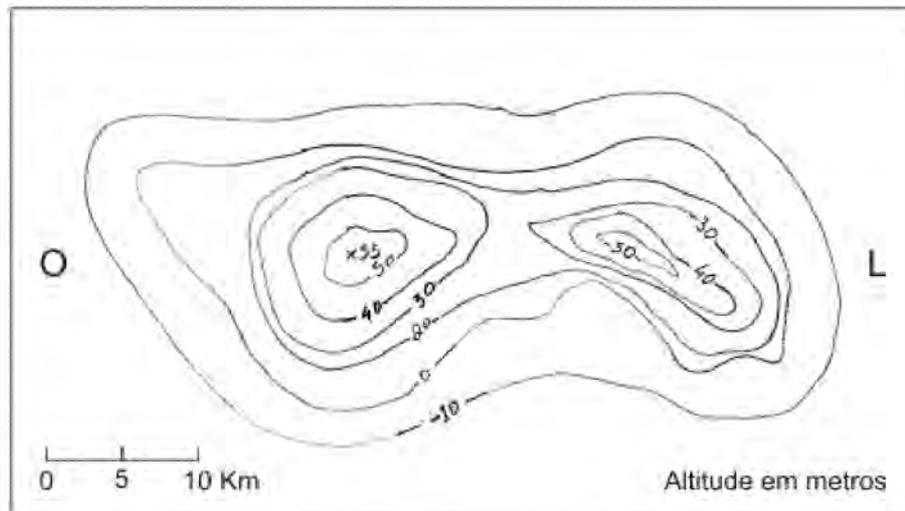
#### b) Amostragem por isolinhas:

Um mapa de isolinhas é a representação de uma superfície por meio de curvas de isovalor. Nos mapas topográficos as isolinhas foram impressas com o uso de equipamentos, como "stereoplotters", sobre uma base composta de fotografias em estéreo obtidas por aerolevantamento. Nestes mapas topográficos existem ainda pontos amostrados irregularmente que foram obtidos por trabalhos de campo.

A aquisição das isolinhas pode ser efetuada por meio de digitalização manual com uso de uma mesa digitalizadora, ou através de um processo automático por meio de "scanner". A digitalização manual consiste na operação de identificação de uma isolinha com um valor de cota e em aquisição pelo operador por um processo onde segue-se a linha ao longo do mapa. Na digitalização com o uso de "scanner", é obtida uma matriz de

pontos onde podem ser identificadas as isolinhas e os valores de cota. Processos de vetorização que sigam uma isolinha, transformam-na em uma sequência de pontos com coordenadas xy de mesmo valor em z, para cada isolinha.

A Figura 1 apresenta um mapa de isolinhas simplificado para ilustração e boa compreensão do método de aquisição de dados descrito acima[2].



**Figura 1: Mapa de isolinhas simplificado. (INPE)**

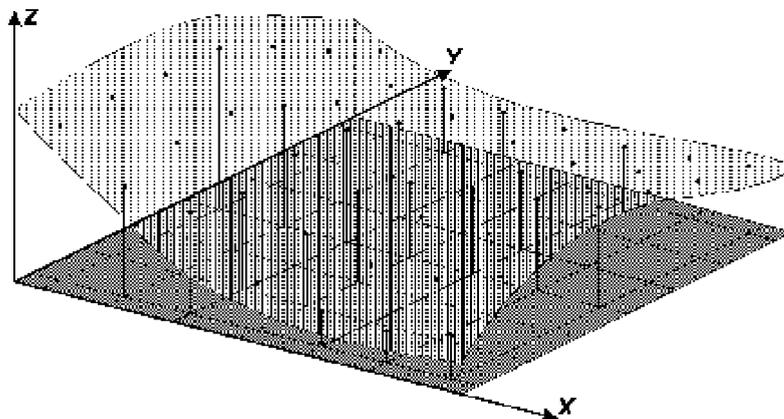
## 2.2. Geração de Grades

Existem diversas maneiras para efetuar a geração de grades, as principais são geração de grades regulares retangulares e geração de grades irregulares triangulares. A geração de grade é uma parte importante e é efetuada pelos principais softwares de modelamento de superfícies digitais.

A grade retangular ou regular é um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas posições xy que definem a grade desejada.

A geração de grade regular ou retangular deve ser efetuada quando os dados amostrados na superfície não são obtidos com espaçamento regular. Assim, a partir das informações contidas nas isolinhas ou nos pontos amostrados, gera-se uma grade que representa de maneira mais fiel possível a superfície. Os valores iniciais a serem determinados são os espaçamentos nas direções x e y de forma que possam representar os valores próximos aos pontos da grade em regiões com grande variação e que, ao

mesmo tempo, reduzam redundâncias em regiões quase planas. A Figura 2 apresenta um modelo de superfície gerada por uma grade retangular.



**Figura 2: Modelo de superfície gerada por uma grade retangular. (INPE)**

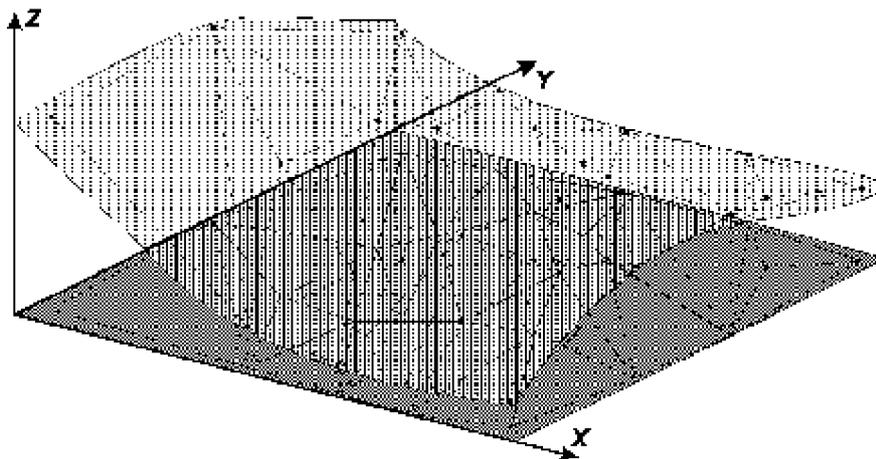
O espaçamento da grade, ou seja a resolução em x ou y, deve ser idealmente menor ou igual a menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Ao se gerar uma grade muito fina (densa), ou seja com distância entre os pontos muito pequena, existirá um maior número de informações sobre a superfície analisada necessitando maior tempo para sua geração. Ao contrário, considerando distância grandes entre os pontos, será criada uma grade grossa podendo acarretar perda de informação. Desta forma, para a resolução final da grade deve haver um compromisso entre a precisão dos dados e do tempo de geração da grade.

Uma vez definida a resolução e conseqüentemente as coordenadas de cada ponto da grade, pode-se aplicar um dos métodos de interpolação para calcular o valor aproximado da elevação: vizinho mais próximo, média simples, média ponderada, média ponderada por quadrante e média ponderada por cota e por quadrante.

Uma grade regular pode ainda ser gerada a partir de outra grade regular ou de uma irregular. Para a geração de uma nova grade regular a partir de outra grade retangular podem ser utilizados os interpoladores linear e bicúbico. Para a geração de grade retangular a partir de um TIN ("Triangular Irregular Network") pode-se ajustar uma superfície plana ou uma superfície de quinto grau, que garante suavidade ao modelo.

Na modelagem da superfície por meio de grade irregular triangular, cada polígono que forma uma face do poliedro é um triângulo. Os vértices do triângulo são geralmente

os pontos amostrados da superfície. Esta modelagem permite que as informações morfológicas importantes como as descontinuidades, representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície[2]. A Figura 3 apresenta um modelo de superfície gerada por grade triangular.



**Figura 3: Modelo de superfície gerada por grade triangular. (INPE)**

O número de redundâncias é bastante reduzido comparado a grade retangular, uma vez que a malha é mais fina em regiões de grandes variações e mais espaçada em regiões quase planas. As descontinuidades da superfície podem ser modelados através de linhas e pontos característicos.

Esta grade tem a vantagem de utilizar os próprios pontos amostrados para modelar a superfície, sem a necessidade de qualquer tipo de interpolação sobre os mesmos. A desvantagem da grade irregular é que os procedimentos para obtenção de dados derivados de grades triangulares tendem a ser mais complexos e conseqüentemente mais demorados que os da grade retangular.

Os métodos para a geração de grade triangular são divididos em método com as linhas de quebra e método sem as linhas de quebra.

Durante a geração de grades triangulares com as linhas de quebra, estas linhas de quebra (que modelam as informações morfológicas de descontinuidade), são incorporadas à triangulação, constituindo arestas de triângulos. O modelo final terá estas

informações adicionais de linha de quebra incorporadas, possibilitando uma representação mais fiel do terreno, uma vez que não suaviza a superfície ao longo de feições como vales e cristas.

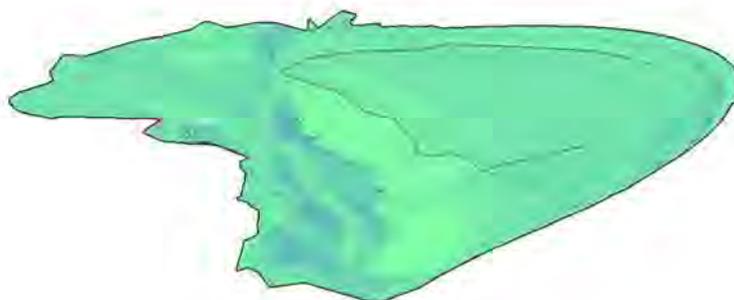
O método sem linhas de quebra realiza a triangulação sem considerar as linhas de quebra, resultando em um modelo de terreno suavizado também ao longo das linhas de quebra[2].

### 2.3. Elaboração do Produto

A elaboração do produto é a fase do projeto que requer a participação ativa do projetista. Fatores como experiência, conhecimento visual do terreno e de suas singularidades são fundamentais para a confecção de um bom produto de modelação digital do terreno.

A atuação do projetista nesta fase é fundamental, pois as grades geradas pelos principais softwares de modelamento digital podem ou não expressar um bom modelo de superfície. Apesar dos diversos recursos disponíveis para uma geração de grade bem orientada e com uma boa aplicabilidade para a forma com que a aquisição de pontos foi gerada, a alteração manual da grade previamente gerada é, em geral, necessária.

A alteração manual é, em geral, em menor proporção quando trata-se de um terreno natural em que não houve histórico prévio de movimentação de terras, sendo, deste modo, em maior proporção em áreas onde houve movimentação de terras prévias com taludes definidos e obras de infraestrutura e drenagem presentes. A Figura 4 apresenta um produto gerado para uma superfície gerada trabalhada. Note a redução de pontos de singularidade e a perfeita representação dos taludes[2].



**Figura 4: Elaboração de produto em uma superfície trabalhada. (UFSC)**

### 3. PROJETO GEOMÉTRICO

A pista de pouso pode ser definida como uma área retangular preparada no aeródromo que se destina ao pouso e decolagem de aeronaves[3]. Estende-se à concepção do projeto geométrico da pista de pouso as áreas de acostamentos, faixa preparada e taludes de concordância com o terreno natural.

O projeto geométrico ou geometria de pistas de aeródromos pode dividir-se em 3 fases. A primeira é o traçado ou alinhamento horizontal, que para o caso dos aeródromos, constitui um alinhamento reto que define o eixo da pista, com orientação definida pelos estudos de vento através de anemogramas.

A segunda fase de projeto é o greide ou alinhamento vertical, onde se define os alinhamentos retos e curvas verticais do eixo da pista de pouso e decolagem, sendo este alinhamento uma linha contínua contida no plano cartesiano vertical que contém o traçado. Pode-se dizer, portanto, que o greide nada mais é que a inserção da coordenada “z” nos pontos do traçado.

A terceira fase do projeto geométrico é a definição das suas seções transversais, um conjunto de segmentos de reta com inclinações transversais variáveis, simétricos ou não ao eixo, contidas em uma infinidade de planos cartesianos perpendicular ao plano cartesiano vertical que contém o traçado e presentes em toda a área em que se define o escopo do projeto. Cada ponto do alinhamento vertical define para si uma seção transversal e um plano perpendicular ao traçado, onde a seção transversal definida intercepta o greide neste ponto.

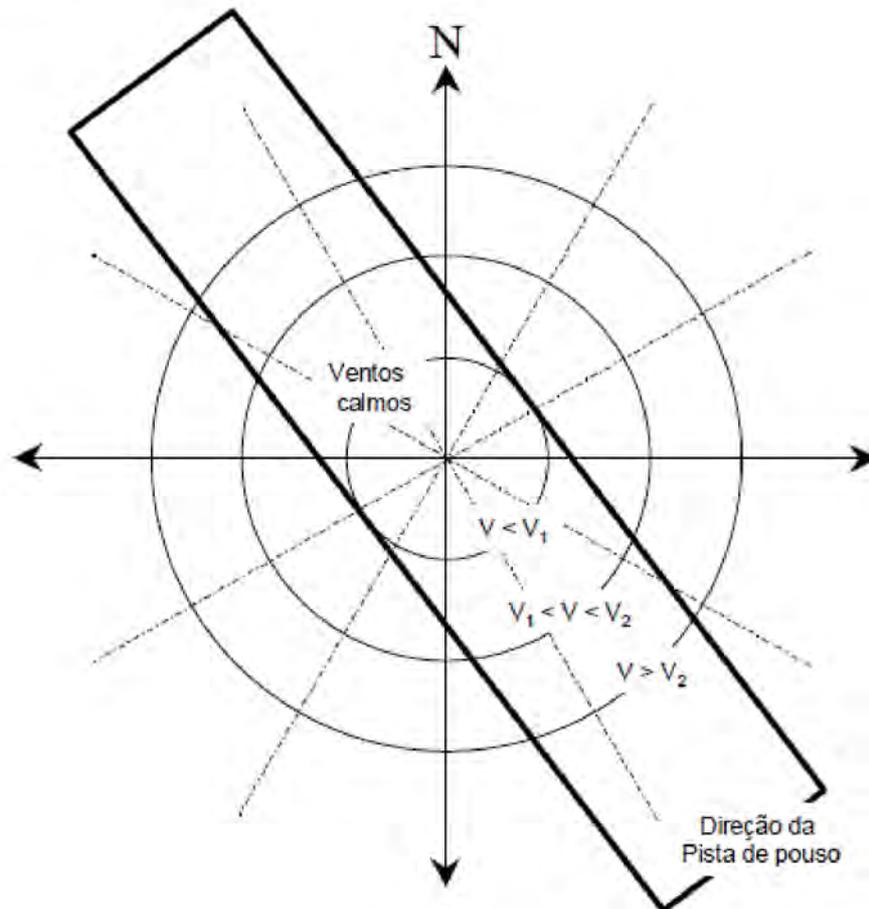
Deste modo, entende-se que as fases de um projeto geométrico definem uma superfície tridimensional na seguinte sequência: a primeira fase define um segmento de reta bidimensional, a segunda fase define um segmento de reta tridimensional e a terceira fase define uma superfície tridimensional. Cada fase do projeto geométrico será descrita de maneira matemática nos próximos itens.

#### 3.1. Alinhamento Horizontal ou Traçado

Como citado anteriormente, o alinhamento horizontal ou traçado, é um segmento de reta bidimensional definido pela união dos pontos que localizam as duas cabeceiras do aeródromo, definindo, deste modo, o eixo da pista de pouso e decolagem. Este segmento de reta deve ter direção e comprimento definidos previamente.

Um dos grandes desafios do planejamento de aeroportos é, a partir da definição dos ventos predominantes, escolher um sítio para a implantação do aeródromo, que permita construir uma pista nesse sentido.

A identificação do sentido dos ventos predominantes é feita com o auxílio do anemograma, apresentada na Figura 5. Nela são inseridos, para cada sentido e para cada faixa de intensidade, o percentual de ocorrência dos ventos, a partir de dados observados por no mínimo cinco anos.



**Figura 5: Anemograma. (DIRENG)**

Com a rosa dos ventos preenchida, identifica-se com auxílio de um retângulo do tamanho do círculo de ventos fracos (calmaria) a direção de onde ocorrem a maioria dos ventos. A identificação é feita multiplicando-se o percentual de ocorrência dos ventos pela área do retângulo inserida na faixa de ocorrência.

Uma pista construída em um sentido diferente do sentido predominante dos ventos pode limitar a operação de determinadas aeronaves, principalmente as de pequeno e médio porte. No entanto, quando construída no sentido correto, pode aumentar a capacidade da pista[4].

Conforme exposto, a direção do traçado é definida pelo estudo dos ventos, em intensidade e frequência, através de um anemograma da região na qual o aeródromo será implantado. Como a direção do traçado não é importante para este modelo, este assunto não será devidamente aprofundado.

O comprimento da pista de pouso é geralmente determinado na fase de planejamento aeroportuário, em função da previsão da demanda do transporte aéreo na região a ser atendida e do seu crescimento para o período de projeto, além dos comprimentos relativos de pouso e decolagem para a aeronave crítica.

Os dados referentes à aeronave de projeto, altitude, temperatura, gradiente de declividade da pista, topografia, presença de obstáculos e vento são de grande importância para a determinação do comprimento da pista de pouso.

Os fatores que condicionam o comprimento de pista de pouso e decolagem podem ser agrupados basicamente em três categorias:

- a) Normas e regulamentos fixados pela autoridade aeronáutica;
- b) Condições atmosféricas e climáticas da região; e
- c) Pesos de decolagem e de pouso da aeronave de projeto[3].

Depois de analisarem-se todos esses fatores, a escolha do comprimento de pista se faz pelo maior dentre os diversos comprimentos, definidos de forma a garantir um certo nível de segurança nas operações de pouso e decolagem.

Uma vez conhecidos comprimento e direção da pista de pouso, definindo-se assim as características limitantes desta fase do projeto geométrico, o traçado do projeto é determinado.

O alinhamento horizontal ou traçado deverá ser dividido em segmentos sucessivos de comprimento igual a 20 m denominados estacas. Convenciona-se um determinado ponto como origem (estaca 0) e são atribuídos valores inteiros positivos (1, 2, 3, ...) para as estacas sucessivas num sentido e valores negativos (-1, -2, -3, ...) para as estacas sucessivas no sentido oposto. Pontos intermediários são representados pelo valor da estaca anterior acrescido da distância até o ponto. Exemplo: ponto 13 + 5 m (5 m após a estaca 13)[1].

Por conveniência do nosso modelo, a direção do traçado será o eixo “x” do nosso sistema e o ponto da cabeceira de menor número será atribuído como ponto de origem (estaca 0), com coordenadas x e y iguais a 0 e 0, respectivamente. A Figura 6 apresenta

um exemplo de alinhamento horizontal, com o seu respectivo estaqueamento, de uma pista de pouso e decolagem.



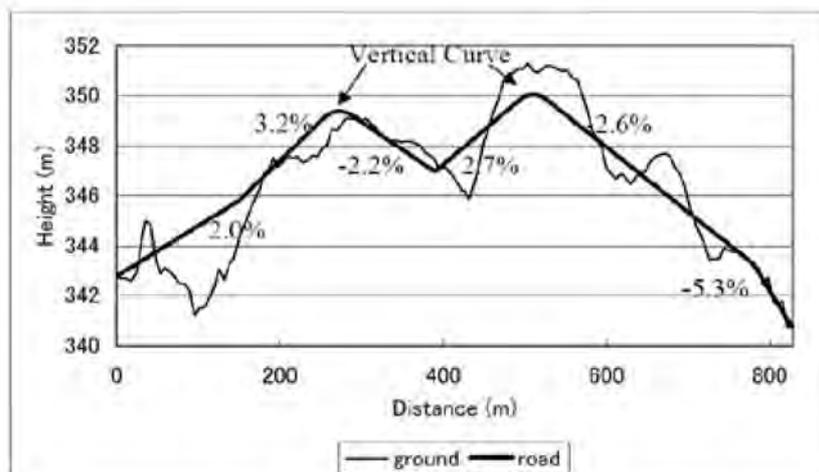
**Figura 6: Exemplo de estaqueamento de uma pista de pouso e decolagem. (ROCHA ENGENHARIA)**

Outra forma de denominação das estacas é através da notação quilométrica, na qual a posição de um ponto é dada indicando-se a sua distância à origem, pelo número inteiro em quilômetros, acrescido de uma fração[1].

Exemplo: imagine que a cabeceira de maior número está localizada a 1830 m da cabeceira de menor número, convencionada como origem. Pela notação convencional a cabeceira estaria na estaca 91 + 10 m, pela notação quilométrica a estaca seria 1 + 830 m. No Brasil, a notação convencional é amplamente adotada para projetos geométricos de aeródromos.

### 3.2. Alinhamento Vertical ou Perfil

A próxima fase de projeto é a construção do alinhamento vertical ou perfil ao longo do eixo do alinhamento horizontal ou traçado do projeto geométrico conforme apresentado na Figura 7.



**Figura 7: Alinhamento Vertical ou Perfil. (DIRENG)**

Com base nas limitações geométricas recomendadas pelas normas de projeto é escolhido o traçado do greide da pista também denominado alinhamento vertical.

Observe que foram indicadas as estacas dos pontos notáveis assim como informações das curvas verticais implantadas. A seguir é apresentada a nomenclatura básica utilizadas:

- PIV – ponto de interseção das tangentes verticais;
- PCV – ponto de curva vertical;
- PTV – ponto de tangente vertical;
- L – comprimento do trecho[1].

Conforme será exposto no item 4.2 deste relatório, o alinhamento vertical poderá ter no máximo uma curva parabólica ao longo de todo o seu desenvolvimento com os seus respectivos PIV, PCV, PTV e L.

### 3.3. Seções Transversais

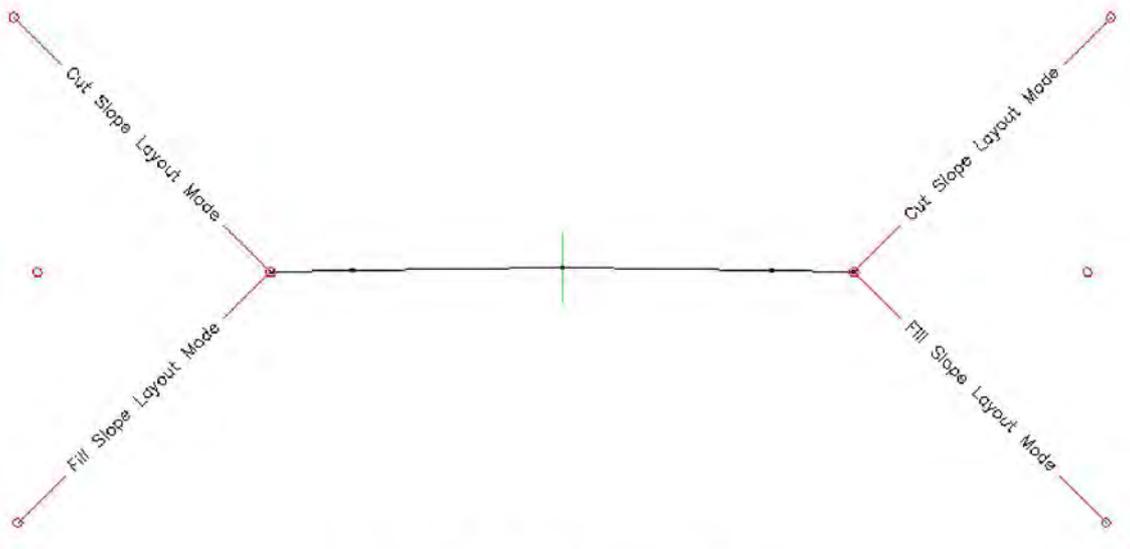
Uma vez conhecidos os elementos geométricos axiais definidos pelo alinhamento horizontal e vertical do eixo de implantação é hora da definição da configuração transversal do projeto.

Visando o escoamento satisfatório de águas pluviais e com base nas limitações geométricas recomendadas pelas normas de projeto é escolhida a configuração de seção tipo a ser empregada. A seção tipo corresponde ao modelo padronizado de seção que o projeto deve obedecer podendo eventualmente variar ao longo do desenvolvimento do traçado[1].

Para esta modelação, as seções tipos serão simétricas em relação ao eixo, com segmentos definidos em: pista de pouso e decolagem, acostamento da pista + faixa de pista e nos taludes da lateral para compatibilização com o terreno natural. As seções tipo não sofrem variação ao longo do desenvolvimento do traçado.

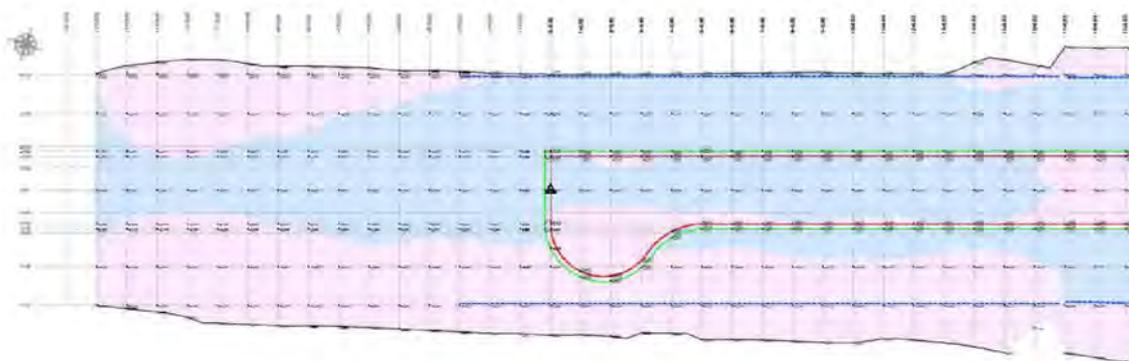
Os elementos compreendidos entre os bordos da faixa de pista definem a plataforma de projeto. A configuração desta plataforma não varia com o tipo de seção analisada. A partir dos bordos, podem-se ter diferentes configurações de projeto em função da seção estar em corte ou aterro ou em função da cota para a compatibilização do talude com o terreno natural[1].

A Figura 8 apresenta uma configuração de seção tipo para se determinar a solução de projeto escolhida.



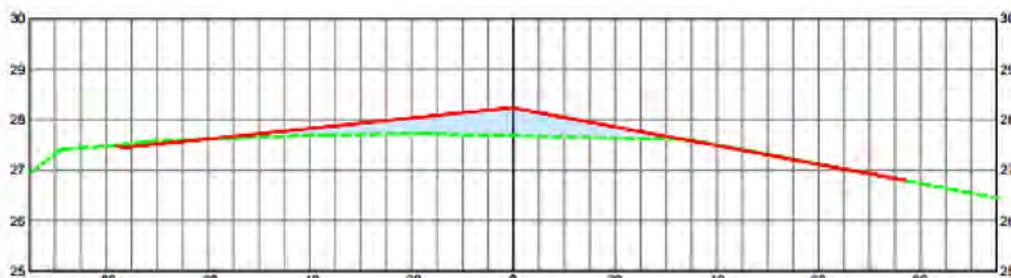
**Figura 8: Seção transversal tipo.**

Após a definição da seção tipo, deve-se modelar o projeto e gerar uma superfície digital de projeto apta a gerar, além região de escopo do projeto, as zonas de corte e aterro e os respectivos volumes de corte e aterro. A Figura 9 apresenta o modelamento da superfície e as regiões de corte e aterro e a Figura 10 apresenta algumas seções de tipo em pontos de estaca cheia (pontos do tipo A + 00,00, onde A é inteiro) para melhor representação de como se comporta o projeto mediante o terreno natural.



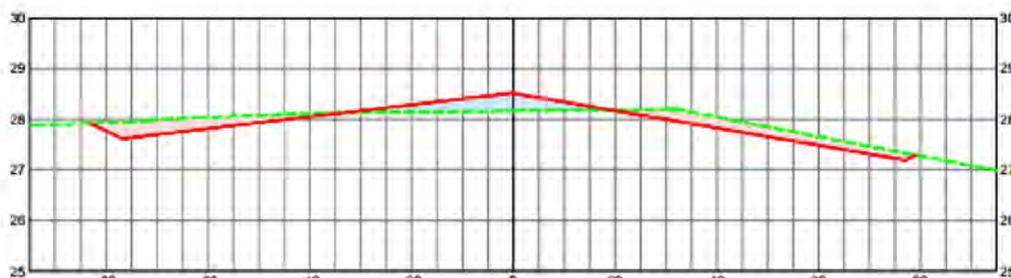
**Figura 9: Modelamento da superfície e regiões de corte (azul) e aterro (rosa).  
(ROCHA ENGENHARIA)**

ESCALA: H: 1:1.000 - V:1:100  
E-15+0,00(-300,00m)



Offset (m)	-80	-60	-40	-20	0,00	20	40	60	80
Terreno Natural (m)	27,49	27,49	27,50	27,50	27,68	27,68	27,68	27,68	27,68
Terraplenagem (m)	27,49	27,45	27,45	27,45	28,24	28,24	28,24	28,24	28,24
Cota Vermelha (m)	0,00	-0,05	-0,05	-0,05	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55

E-14+0,00(-280,00m)



Offset (m)	-80	-60	-40	-20	0,00	20	40	60	80
Terreno Natural (m)	27,92	27,92	27,93	27,93	28,17	28,17	28,17	28,17	28,17
Terraplenagem (m)	27,92	27,82	27,82	27,82	28,52	28,52	28,52	28,52	28,52
Cota Vermelha (m)	0,00	-0,32	-0,32	-0,32	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

**Figura 10: Seções transversais e indicações de corte e aterro (DIRENG)**

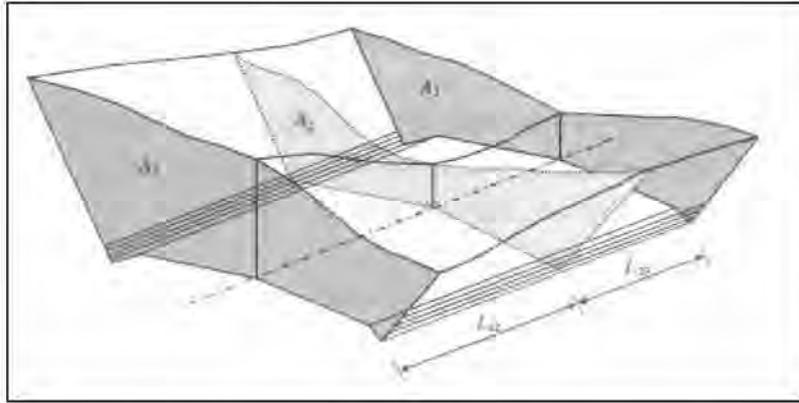
### 3.4. Cálculo de Volumes

Para a estimativa de cálculo dos volumes de terraplenagem, é necessário supor que existe um determinado sólido geométrico cujo volume será facilmente calculado.

O método usual consiste em considerar o volume como proveniente de uma série de prismóides (sólidos geométricos limitados nos extremos por faces paralelas e lateralmente por superfícies planas).

Uma fórmula aproximada comumente utilizada para o cálculo dos volumes médios é chamada método das áreas médias.

Conforme esquematizado na Figura 11, o volume de terraplenagem acumulado entre duas seções consecutivas é determinado pelo produto da soma das áreas das seções pela semi-distância entre elas[1].



**Figura 11: Prismóides considerados para o cálculo.**

$$V_{12} = \frac{L_{12}}{2} \cdot (A_1 + A_2)$$

$$V_{23} = \frac{L_{23}}{2} \cdot (A_2 + A_3)$$
(1)

Este modelo deve ser implementado tanto para áreas de corte quanto para as áreas de aterro. De forma generalizada pode-se escrever para as áreas de corte:

$$V_0^{corte} = 0$$

$$V_i^{corte} = V_{(i-1)i}^{corte} = \frac{L_{(i-1)i}}{2} \cdot (A_{(i-1)}^{corte} + A_i^{corte})$$

$$V_{acumulado}^{corte} = \sum V_i^{corte},$$
(2)

e para as áreas de aterro como:

$$V_0^{aterro} = 0$$

$$V_i^{aterro} = V_{(i-1)i}^{aterro} = \frac{L_{(i-1)i}}{2} \cdot (A_{(i-1)}^{aterro} + A_i^{aterro})$$

$$V_{acumulado}^{aterro} = \sum V_i^{aterro}.$$
(3)

Os volumes de corte e aterro serão e as metodologias para cálculo serão reelaborados posteriormente de modo que o seu cálculo seja feito de forma automatizada mediante as variáveis de decisão do modelo sejam definidas e possam gerar todo o modelo digital do projeto de forma que a compensação entre corte e aterro seja satisfatória.

### 3.5. Camada Vegetal

A camada superficial do solo, também chamada de camada vegetal, é rica em material orgânico e portanto imprópria para a execução de aterros sob áreas pavimentadas. Este material deve ser descartado e enviado para o local de bota-fora da obra.

Para o cálculo preciso dos volumes de terraplenagem, é importante que seja subtraída das cotas da superfície do terreno, o valor da espessura média da camada vegetal. Este procedimento é frequentemente esquecido pelos engenheiros projetistas acarretando erros significativos nas estimativas de volumes de movimentação de terra[1].

### 3.6. Espessura do pavimento

Outra observação importante para o cálculo dos volumes de terraplenagem refere-se à consideração da espessura do pavimento. Normalmente, o projeto executivo apresenta as cotas finais do piso acabado. Para a obtenção das cotas de subleito, é necessário subtrair o valor correspondente às alturas das camadas do pavimento.

Novamente, para o cálculo preciso dos volumes de terraplenagem, é importante que as áreas de corte e aterro de cada seção transversal sejam determinadas a partir da superfície de subleito e não de piso acabado[1].

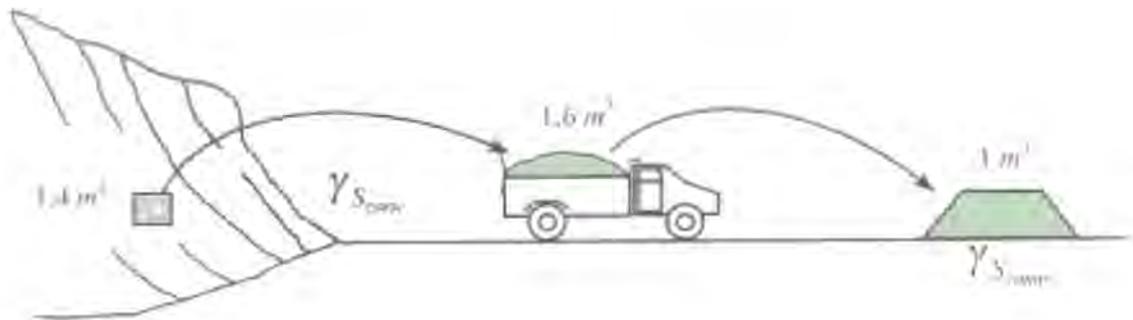
### 3.7. Fator de homogeneização

Para otimização dos custos de terraplenagem, é interessante que todo material utilizado na execução do aterro seja proveniente de áreas de corte, isto é, sempre que possível deve-se evitar a utilização de jazidas de empréstimo. Desta forma, o volume acumulado de corte deve ser maior ou igual ao volume acumulado de aterro corrigido por um fator conhecido como fator de homogeneização[1].

$$V_{corte} = F_h \cdot V_{aterro} \quad (4)$$

O fator de homogeneização ( $F_h$ ) é a relação entre o volume de material no corte de origem e o volume de aterro compactado resultante. Conforme apresentado na Figura 12, a escavação provoca uma expansão volumétrica do solo e a compactação, uma redução volumétrica do mesmo[1]. Levando em consideração os pesos secos das amostras e que ao longo do processo de transporte ocorrem perdas de material da ordem de 5%, temos que o fator de homogeneização pode ser estimado como:

$$F_h = 1,05 \frac{\gamma_{s,comp}}{\gamma_{s,corte}}, \quad (5)$$



**Figura 12: Exemplo de expansão e contração dos solos durante a terraplenagem. (DIRENG)**

### 3.8. Largura da Drenagem

A maior parte dos aeródromos no território nacional tem um sistema de coleta de águas pluviais formado por canaletas (coleta linear) longitudinais e paralelas à pista de pouso e decolagens, sendo necessária a contabilização desta plataforma de drenagem para um melhor aprimoramento do cálculo dos volumes de corte e aterro do projeto de terraplenagem.

São dois os principais motivos para a contabilização desta largura destinada à drenagem.

a) Erros de execução e descalçamento da canaleta:

Erros de execução na plataforma de terraplenagem pode, em um dos bordos da canaleta, colocar o nível do terreno abaixo do nível do bordo da canaleta, não drenando corretamente as chuvadas naquela região, promovendo a erosão dos finos e, em casos mais extremos, acarretando no descalçamento da canaleta por falta de solo em uma de suas laterais.

b) Erros no cálculo de volumes:

O projetista pode erroneamente considerar como ponto baixo do sistema de drenagem a linha do limite da faixa preparada. Contabilizando a partir daí o talude, tem-se um erro de cálculo dos volumes, pois a canaleta não pode ser centrada nesta linha, dado que uma de suas metades estaria dentro da faixa preparada irregularmente.

A Figura 13 apresenta uma canaleta pertencente à um sistema descrito neste item, superficial, longitudinal e paralela ao eixo da pista de pouso.



**Figura 13: Canaleta superficial, longitudinal à pista de pouso. (ROCHA ENGENHARIA)**

#### 4. MODELAMENTO MATEMÁTICO

A Pesquisa Operacional (PO) trata da modelagem matemática de fenômenos estáticos ou dinâmicos. Os problemas estáticos são denominados por determinísticos. Nestes problemas, todos os componentes são conhecidos a priori e nenhuma aleatoriedade em sua ocorrência é admitida. Os problemas dinâmicos são denominados estocásticos, e seus elementos apresentam uma probabilidade de ocorrência em uma determinada forma. Conforme será apresentado adiante, o modelo aqui exposto é um caso de um problema determinístico[5].

O principal parâmetro do método consiste em sua função objetivo (F.O.), definida como a diferença entre o volume de corte acumulado ( $V_{acumulado}^{corte}$ ) e o volume de aterro acumulado ( $V_{acumulado}^{aterro}$ ), define-se portanto através da equação da função objetivo

$$F.O.: \text{Min } Z = |V_{acumulado}^{corte} - V_{acumulado}^{aterro}|. \quad (6)$$

Sendo a equação em formato modular, podem-se descartar os métodos simplificados de pesquisa operacional voltados para resolução de problemas lineares.

Os valores de corte e aterro acumulados são a própria consequência do projeto geométrico, sendo um projeto geométrico balanceado em termos de volume o principal objetivo do trabalho. Busca-se, desta forma, apesar da ampla variabilidade de tomadas de decisão, enquadrar um número de variáveis restritas capaz de descrever e gerar um bom projeto geométrico dentre as suas fases de alinhamento horizontal, alinhamento vertical e seções transversais.

Outro fator determinante para a elaboração do método é discutir dentre os parâmetros de projeto quais entram no método na forma de dados de entrada e quais são, de fato, variáveis de decisão.

##### 4.1. Alinhamento Horizontal

O alinhamento horizontal de um aeródromo é definido por um segmento de reta. Define-se, desta forma, o segmento de reta que interliga o ponto da cabeceira de menor número ( $C_{min}$ ) e o ponto da cabeceira de maior número ( $C_{max}$ ). Pode-se adotar o sistema de coordenadas arbitrariamente nos eixos  $x$  e  $y$  sem que o modelo e os cálculos de corte e aterro sejam prejudicados, admitindo que  $C_{min}$  pertence ao eixo  $z$  do sistema de coordenadas, tem-se:

$$C_{min} = (0, 0, Z) = Z_0^0, \quad (7)$$

onde  $Z$  é a cota altimétrica de projeto do ponto. Seja ele qualquer ponto do sistema, o valor de cota ( $Z$ ) gerado pelo modelo pode ser apresentado com dois indicadores: o superior direito é o offset horizontal em relação ao eixo (convencionado em 0) e o indicador inferior direito é o valor numérico da estaca a qual pertence à seção transversal da pista que contém o ponto, utilizando a notação padrão adotada no Brasil. Deste modo o valor da cota de qualquer ponto do sistema pode ser escrito por:

$$Z_{ESTACA}^{offset\ horizontal} . \quad (8)$$

Do mesmo modo, cada ponto do terreno pode ter a sua cota topográfica ( $T$ ) determinado por:

$$T_{ESTACA}^{offset\ horizontal} . \quad (9)$$

Exemplo do item 3.1: imagine que a cabeceira de maior número está localizada a 1830 m da cabeceira de menor número, convencionada como origem. Pela notação convencional a cabeceira estaria na estaca 91 + 10 m, logo a sua cota do projeto geométrico pode ser descrita como:  $Z_{91+10}^0$ .

A única variável do problema para o alinhamento horizontal é, portanto, o número de estacas do projeto geométrico. Como discutido no item 3.1, as causas para a definição do tamanho da pista de pouso e decolagem não são influenciadas pelo tipo de terreno destinado à implantação do aeródromo, logo o número de estacas é requerido como dado de entrada do modelo. As cotas topográficas ( $T$ ) dos referidos pontos de projeto, também serão dados de entrada do programa e podem ser facilmente extraídas, no alinhamento (offset horizontal) através dos softwares utilizados para elaboração de projetos geométricos.

Segundo a Tabela 1.1 do documento 9157 – Manual de Design de Aeródromos da ICAO (2006) – Parte 1, todo aeródromo pode ser caracterizado por um código alfanumérico em acordo com as suas características. A Figura 14 apresenta a tabela citada, deste modo, o código de referência do aeródromo também entra como dado de entrada no modelo. O número do código já é diretamente relacionado com o número de estacas. No entanto, a letra deve ser discriminada para que as condições de contorno e offsets horizontais sejam estabelecidas como será explicado e posto em ênfase nos próximos itens. Outro fator importante, e que também é dado, de entrada reside em saber se o aeródromo opera com ou sem precisão.

CODE ELEMENT 1		CODE ELEMENT 2		
Code number	Aeroplane reference field length	Code letter	Wing span	Outer main gear wheel span <sup>a</sup>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Less than 800 m	A	Up to but not including 15 m	Up to but not including 4.5 m
2	800 m up to but not including 1 200 m	B	15 m up to but not including 24 m	4.5 m up to but not including 6 m
3	1 200 m up to but not including 1 800 m	C	24 m up to but not including 36 m	6 m up to but not including 9 m
4	1 800 m and over	D	36 m up to but not including 52 m	9 m up to but not including 14 m
		E	52 m up to but not including 65 m	9 m up to but not including 14 m
		F	65 m up to but not including 80 m	14 m up to but not including 16 m

a. Distance between the outside edges of the main gear wheels.

**Figura 14: Tabela 1.1 doc. 9157 – parte 1 (ICAO-2006).**

#### 4.2. Alinhamento Vertical

A definição do alinhamento vertical pode levar a uma infinidade de soluções com uma variabilidade gigantesca de variáveis. O intuito de modelo matemático é expressar, com um número restrito de variáveis, uma solução geométrica capaz de resolver uma boa diversidade de problemas com o conhecimento exato das limitações do método.

Deste modo, a solução adotada para este modelo parte do princípio em que um projeto geométrico composto por até dois segmentos de reta e uma parábola de transição é capaz de expressar bem a realidade encontrada em diversos problemas de engenharia de projetos geométricos de pistas de aeródromos.

Tomando como exemplo a Figura 15, durante todo o espaço amostral do projeto, o eixo pode ser definido por 2 segmentos de reta ( $r_1$  e  $r_2$ ) e a parábola de transição ( $\lambda_T$ ) com os seus pontos PIV, PCV e PTV definidos conforme exposto no item 3.2. Define-se em termos matemáticos:

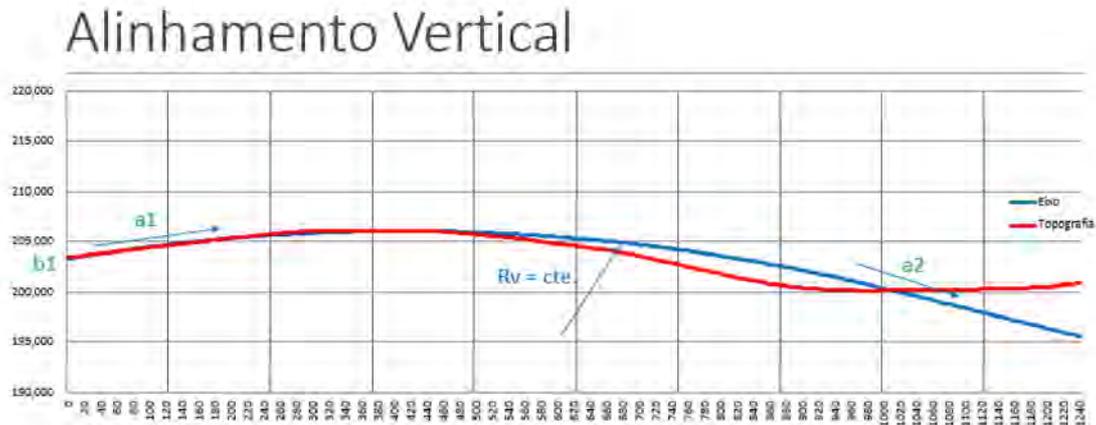
$$\begin{aligned} r_1: z &= a_1 * x + b_1 \\ r_2: z &= a_2 * x + b_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Percebe-se que  $a_1$  e  $a_2$  são os coeficientes angulares das retas e  $b_1$  e  $b_2$  são os coeficientes lineares. Adotando  $x$  em notação quilométrica, pode-se definir o posicionamento em  $x$  do PIV, em notação quilométrica, como:

$$x_{PIV} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2} \quad (11)$$

pode-se perceber que se  $a1$  e  $a2$  tiverem o mesmo valor, a parábola não se faz necessária, da mesma forma, pode-se definir a cota altimétrica do PIV por:

$$Z_{PIV} = a1 * x_{PIV} + b1. \quad (12)$$



**Figura 15: Exemplo de alinhamento vertical composto por duas tangentes e uma parábola.**

Segundo o item 5.1.7 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006) a transição de uma inclinação vertical para outra deve ser realizada através de uma curva vertical (parabólica) e deve ter valores mínimos em acordo com as seguintes taxas de transição:

$$R_v \geq \begin{cases} \frac{30 \text{ m}}{0,1\%}, & \text{para código de pista número 4} \\ \frac{30 \text{ m}}{0,2\%}, & \text{para código de pista número 3} \\ \frac{30 \text{ m}}{0,4\%}, & \text{para código de pista números 1 e 2.} \end{cases} \quad (13)$$

Deste modo o comprimento total da parábola ( $L$ ) pode ser determinado por:

$$L = R_v * |a1 - a2|. \quad (14)$$

Por questões de facilidade de modelo o raio vertical da parábola ( $R_v$ ) sempre receberá o valor mínimo preconizado por norma e não é, desta forma, variável de decisão, como consequência do número do código de referência também não se faz necessário como dado de entrada.

Com a definição do valor do comprimento da parábola ( $L$ ) e do valor de  $x_{PIV}$ , pode-se definir o posicionamento em  $x$  dos pontos PCV e PTV, em notação quilométrica, como:

$$\begin{aligned} x_{PCV} &= x_{PIV} - L/2 \\ x_{PTV} &= x_{PIV} + L/2. \end{aligned} \quad (15)$$

Da mesma forma os valores das cotas altimétricas dos pontos PCV e PTV, podem ser definidas por:

$$\begin{aligned} Z_{PCV} &= a1 * x_{PCV} + b1 \\ Z_{PTV} &= a2 * x_{PTV} + b2. \end{aligned} \quad (16)$$

Colocando a parábola de transição ( $\lambda_T$ ) em termos matemáticos tem-se:

$$\lambda_T: z = a3.x^2 + b3.x + c3, \quad (17)$$

onde

$$\begin{aligned} a3 &= \frac{(a2 - a1) * L}{2} \\ b3 &= a1 - 2 * x_{PCV} * a3 \\ c3 &= Z_{PCV} - a3 * (x_{PCV})^2 - b3 * x_{PCV}. \end{aligned} \quad (18)$$

Pode-se determinar a cota de todos os pontos do eixo da pista e dessa forma definir o alinhamento vertical como:

$$\begin{aligned} &a1 * x_{ESTACA} + b1, \quad \text{se } x_{ESTACA} \leq x_{PCV} \\ Z_{ESTACA}^0 &= \begin{cases} a3 * (x_{ESTACA})^2 + b3 * x_{ESTACA} + c3, & \text{se } x_{PCV} \leq x_{ESTACA} \leq x_{PTV} \\ a2 * x_{ESTACA} + b2, & \text{se } x_{ESTACA} \geq x_{PTV}. \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

onde  $x_{ESTACA}$  é o valor da própria estaca em notação quilométrica. Desta forma, pode-se perceber que as únicas variáveis de decisão nesta etapa de projeto pelo modelo estabelecido em duas retas e uma parábola de transição são os coeficientes angulares e lineares das duas retas  $a1$ ,  $a2$ ,  $b1$  e  $b2$ . Eles são suficientes para definir todas as cotas altimétricas do projeto geométrico ao longo do eixo e, desta forma, definir o alinhamento vertical.

A partir das variáveis de decisão estabelecidos tem-se que determinar as condições de contorno, os próximos parágrafos com o apoio da norma internacional relativo ao tema tratarão das prerrogativas de norma necessárias para que se estabeleçam as condições de contorno do modelo.

Segundo o item 5.1.4 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006) a declividade máxima da pista de pouso ( $a_{max}$ ), ou seja, a diferença entre as cotas máxima ( $Z_{EMAX}^0$ ) e mínima ( $Z_{EMIN}^0$ ) do eixo dividido pela distância entre os pontos definidos em termos matemáticos por:

$$a_{max} = \frac{\max(Z_{EMAX}^0) - \min(Z_{EMIN}^0)}{20 * |EMAX - EMIN|}, \quad (20)$$

onde  $EMAX$  é o número da estaca correspondente ao ponto de cota máxima do eixo e  $EMIN$  é o número da estaca correspondente ao ponto de cota mínima do eixo não deve ser superior aos seguintes valores:

$$a_{max} \leq \begin{cases} 1,0\%, & \text{para os códigos números 3 e 4} \\ 2,0\%, & \text{para os códigos números 1 e 2.} \end{cases} \quad (21)$$

Segundo o item 5.1.4 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006) ao longo de nenhuma porção da pista de pouso e decolagem a declividade longitudinal deve exceder os seguintes limites, em termos das inclinações das retas do modelo de projeto tem-se:

$$|a1, a2| \leq \begin{cases} 1,25\%, & \text{para o código número 4} \\ 1,50\%, & \text{para o código número 3} \\ 2,00\%, & \text{para os códigos número 1 e 2.} \end{cases} \quad (22)$$

Para pistas de código número 4 e código 3 IFR II ou II há ainda uma consideração extra a se fazer para o primeiro e último quarto da pista onde

$$|a1, a2| \leq 0,80\%. \quad (23)$$

Como o modelo estabelece apenas uma curva de transição vertical, estabelece-se que se as declividades superarem o limite estabelecido acima, elas devem ter declividade de 0,80%, positivo ou negativo em acordo com qual limite esteja sendo excedido, nesses trechos sem que haja uma concordância a nível de curva vertical, havendo apenas uma composição de segmentos de reta. A nível de movimentação de terra, essa suposição faz-se coerente. No entanto, a nível de ser um projeto aceito por norma, essa suposição não pode ser assumida.

Como há apenas o dado de entrada de se há ou não operações com precisão, considera-se para todos os casos de operações com precisão para código número 3 a suposição acima.

Segundo o item 5.1.6 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006) onde mudanças de declividade não puderem ser evitadas, a diferença entre as declividades não devem exceder:

$$|a1 - a2| \leq \begin{cases} 1,50\%, & \text{para os códigos número 3 e 4.} \\ 2,00\%, & \text{para os códigos número 1 e 2.} \end{cases} \quad (24)$$

Desta forma, as três condições de contorno em torno das variáveis podem ser consideradas de forma a compor o problema numérico de pesquisa operacional e seguir a norma de projeto internacional vinculada ao assunto. Portanto, esta fase de projeto

compõe e acrescenta ao modelo 4 variáveis de decisão ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  e  $b_2$ ) e 3 condições de contorno ( $a_{max}$ ,  $|a_1, a_2|$  e  $|a_1 - a_2|$ ).

#### 4.3. Seções Transversais

Da mesma forma que foi comentada no item acima, a definição das seções transversais também pode levar a uma infinidade de soluções com uma variabilidade gigantesca de variáveis. Deve-se lembrar que o intuito de modelo matemático é expressar, com um número restrito de variáveis, uma solução geométrica capaz de resolver uma boa diversidade de problemas com o conhecimento exato das limitações do método.

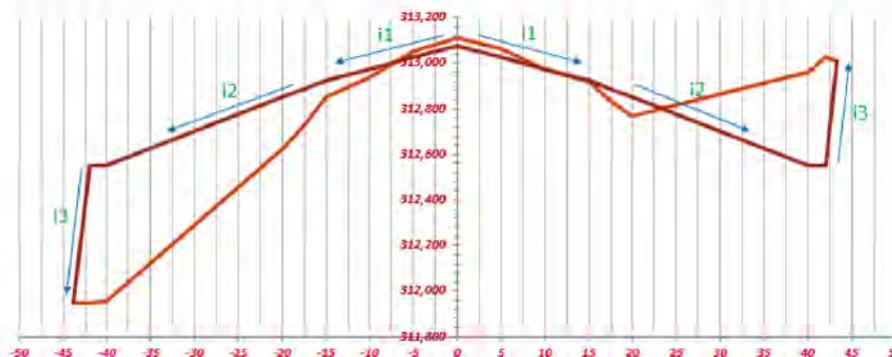
As declividades transversais são de fundamental importância para um bom escoamento das águas provenientes de grandes chuvadas e para a conformação dos taludes das laterais para uma boa conformação do terreno natural, com taludes estáveis que não prejudiquem o sistema de drenagem e não interfiram na superfície de transição do plano básico da zona de proteção de aeródromos.

Deste modo, três tipos diferentes de declividades serão adotados como variáveis de decisão sendo elas:

- Declividade da área pavimentada da pista de pouso e decolagem, excetuando os acostamentos –  $i_1$ ;
- Declividade na porção não pavimentada da faixa preparada da pista de pouso e decolagem e áreas pavimentadas de acostamento, quando houver –  $i_2$ ;
- Declividade dos taludes das laterais para conformação com o terreno natural –  $i_3$ ;

A Figura 16 apresenta uma representação gráfica de um exemplo de seção transversal e todas as suas declividades citadas acima –  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ . A simetria adotada tem o intuito de facilitar o modelo e é relevante em termos práticos para que não haja erros de execução na fase de obras. Note que há uma região plana na seção como discutido no item 3.8, que representa a largura da drenagem, caso a drenagem seja do tipo superficial, longitudinal e paralela a pista de pouso, com as prerrogativas citadas no referido item.

## Seções transversais



**Figura 16: Exemplo de seção transversal com as suas respectivas declividades.**

Segundo o item 5.1.12 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006), a seção transversal, na porção relativa à pista de pouso, deve apresentar declividades que idealmente tenha o limite superior estabelecido abaixo e não deve ter declividades inferiores à 1,00%, desta forma:

$$\begin{aligned} 1,00\% \leq i_1 \leq 1,50\%, & \text{ para os códigos letras C, D, E e F} \\ 1,00\% \leq i_1 \leq 2,00\%, & \text{ para os códigos letras A e B.} \end{aligned} \quad (25)$$

Conforme apresentado na Figura 16, o sentido da declividade é descendente para a facilitação do escoamento das águas referentes ao sistema de drenagem. A largura da pista de pouso e decolagem ( $L_{PPD}$ ), em acordo com o código de referência do aeródromo pode ser encontrada na Tabela 5-1 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006), a Figura 17 apresenta a tabela extraída da norma da ICAO.

**Table 5-1. Runway widths**

Code Number	Code Letter					
	A	B	C	D	E	F
1 <sup>a</sup>	18 m	18 m	23 m	—	—	—
2 <sup>a</sup>	23 m	23 m	30 m	—	—	—
3	30 m	30 m	30 m	45 m	—	—
4	—	—	45 m	45 m	45 m	60 m

a. The width of a precision approach runway should be not less than 30 m where the code number is 1 or 2.

**Figura 17: Largura da pista de pouso em acordo com a norma da ICAO. (ICAO-2006)**

A importância de saber a largura preconizada por norma é de fundamental relevância para o modelo, pois uma largura acima da preconizada acarretaria um custo adicional à obra, desnecessário para o tipo de operações de aeronaves para o qual o aeroporto está sendo projetado. Deste modo a partir da Figura 17 pode-se estabelecer a largura da pista de pouso e decolagem como mínimo estabelecido. Esta informação é de fundamental relevância para o modelo, pois o dado de entrada de topografia nesses alinhamentos e a variável de decisão  $i1$  podem definir uma nova abrangência de pontos fundamental para os cálculos de volume realizados posteriormente.

Define-se deste modo as cotas dos seguintes pontos, nos alinhamentos referentes aos bordos da pista de pouso e decolagem:

$$Z_{ESTACA}^{-L_{PPD}/2} = Z_{ESTACA}^{L_{PPD}/2} = Z_{ESTACA}^0 - i1 * L_{PPD}/2. \quad (26)$$

Segundo o item 5.3.18 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006), a seção transversal, na porção relativa à faixa preparada não pavimentada, deve apresentar declividades que idealmente tenha o limite superior estabelecido abaixo e não deve ter declividades inferiores à 1,00%, desta forma:

$$\begin{aligned} 1,00\% \leq i2 \leq 2,50\%, & \text{ para os códigos números 3 e 4} \\ 1,00\% \leq i2 \leq 3,00\%, & \text{ para os códigos número 1 e 2.} \end{aligned} \quad (27)$$

Inclui-se essa condição de contorno para as regiões em que, por ventura, tenham acostamentos. Para o cálculo dos volumes referentes à região do caixão do pavimento do acostamento a consideração será efetuada diretamente nos cálculos de corte e aterro, abordado desta forma posteriormente. A largura da faixa preparada ( $L_{FP}/2$ ), em acordo com o código de referência do aeródromo é estabelecida segundo os itens 5.3.20 e 5.3.21 do documento 9157 – parte 1 (ICAO-2006), onde

$$\begin{aligned} L_{FP}/2 \geq 75 \text{ m}, & \text{ para os códigos números 3 e 4} \\ L_{FP}/2 \geq 40 \text{ m}, & \text{ para os códigos número 1 e 2,} \end{aligned} \quad (28)$$

sendo permitido

$$L_{FP}/2 \geq 30 \text{ m}, \text{ para o código número 1 em operações sem precisão.}$$

O conhecimento da largura mínima de faixa preparada é de fundamental importância para se discutir uma nova abrangência de pontos, no limite da faixa preparada, fundamental para o cálculo dos volumes, de modo análogo ao exposto para a largura da pista de pouso, as larguras mínimas serão adotadas no projeto e os alinhamentos de pontos topográficos nesses offsets são dados de entrada para o modelo.

Define-se deste modo as cotas dos seguintes pontos, nos alinhamentos referentes aos bordos da faixa preparada:

$$Z_{ESTACA}^{-L_{FP}/2} = Z_{ESTACA}^{L_{FP}/2} = Z_{ESTACA}^{L_{PPD}/2} - i2 * (L_{FP} - L_{PPD})/2. \quad (29)$$

Conforme exposto no item 3.8, há região do projeto plana destinada a colocação da drenagem com largura associada ( $L_{DREN}$ ) desta forma as cotas destes pontos de projeto podem ser encontrados por:

$$Z_{ESTACA}^{-L_{FP}/2} = Z_{ESTACA}^{L_{FP}/2} = Z_{ESTACA}^{\frac{-L_{FP}-L_{DREN}}{2}} = Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}+L_{DREN}}{2}} \quad (30)$$

A última fase do projeto geométrico requer bom senso e escolha do projetista pela falta de argumentos claros em norma para a definição dos taludes das laterais. Fica-se definido um limite mínimo para um bom escoamento da drenagem e um limite máximo para a estabilização do talude com os seguintes valores:

$$1,00\% \leq i3 \leq \frac{1}{3}, \text{positivo em aterros e negativos em cortes.} \quad (31)$$

Para determinação se há corte ou aterro, duas novas linhas de pontos, uma para cada lateral, devem ser introduzidas como dado de entrada. Por definição do modelo, a linha deve estar a 20 m de  $L_{FP}$  afastando-se do eixo da pista de pouso e decolagem. Com base nos seguintes pontos coletados com cotas topográficas e introduzidos como base de entrada  $T_{ESTACA}^{L_{FP}/2}$  e  $T_{ESTACA}^{20+L_{FP}/2}$ , para a lateral direita, por exemplo, interpola-se o ponto do bordo externo da linha de drenagem por:

$$T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}+L_{DREN}}{2}} = T_{ESTACA}^{L_{FP}/2} + \frac{\left( T_{ESTACA}^{20+\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}} \right) * L_{DREN}}{20}. \quad (32)$$

Compara-se desta forma:

$$\begin{aligned} \text{Se } T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}+L_{DREN}}{2}} > Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}+L_{DREN}}{2}} &\rightarrow \text{corte} \\ \text{Se } T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}+L_{DREN}}{2}} < Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}+L_{DREN}}{2}} &\rightarrow \text{aterro.} \end{aligned} \quad (33)$$

Para a finalização do projeto geométrico, em cada estaca e cada lateral, o talude específico tem uma largura específica para conformação com o terreno essa largura pode ser escrita da forma:

$$\begin{aligned} L_{ESTACA}^+, & \text{ para a lateral direita} \\ L_{ESTACA}^-, & \text{ para a lateral esquerda.} \end{aligned} \quad (34)$$

Para cada distância acima, há uma cota de ponto definida associada que em termos matemáticos pode ser descrita como:

$$\begin{aligned}
 Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}+L_{ESTACA}^+} &= T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}+L_{ESTACA}^+} \\
 Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}} * T_{ESTACA}^{20+\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}} * \left[ Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}} - i3 * (20 - L_{DREN}) \right] & \\
 = \frac{}{T_{ESTACA}^{20+\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}} + i3 * (20 - L_{DREN})} & \quad (35)
 \end{aligned}$$

De modo análogo para o outro bordo:

$$\begin{aligned}
 Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}-L_{ESTACA}^-} &= T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}-L_{ESTACA}^-} \\
 Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}} * T_{ESTACA}^{-20-\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}} * \left[ Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}} - i3 * (20 - L_{DREN}) \right] & \\
 = \frac{}{T_{ESTACA}^{-20-\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}} + i3 * (20 - L_{DREN})} & \quad (36)
 \end{aligned}$$

Determinando desta forma:

$$\begin{aligned}
 L_{ESTACA}^+ &= \frac{(20 - L_{DREN}) * \left( Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}+L_{ESTACA}^+} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}} \right)}{T_{ESTACA}^{20+\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}+L_{DREN}}} \\
 L_{ESTACA}^- &= \frac{(20 - L_{DREN}) * \left( Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}-L_{ESTACA}^-} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}} \right)}{T_{ESTACA}^{-20-\frac{L_{FP}}{2}} - T_{ESTACA}^{\frac{L_{FP}}{2}-L_{DREN}}}.
 \end{aligned} \quad (37)$$

O problema que não tinha linearidade garantida torna-se não linear com a presença da variável de decisão  $i3$  no denominador das equações de definição das cotas de conformação das laterais. Todos os pontos do projeto geométrico podem agora ser definidos e esta fase de projeto contribui com três variáveis de decisão ( $i1$ ,  $i2$  e  $i3$  totalizando sete) e três condições de contorno ( $i1,2,3min \leq i1,2,3 \leq i1,2,3max$ ).

#### 4.4. Mudança de nomenclatura

Com o conhecimento de todos os pontos de projeto, ou seja, o posicionamento geográfico destes no plano cartesiano, a partir desse momento pode-se estabelecer uma nomenclatura mais elegante para os pontos de modo a facilitar a formulação matemática da função objetivo, ou seja, os cálculos dos volumes de corte e aterro de projeto.

Partindo para uma mudança da nomenclatura das estacas, pode-se definir:

$$\begin{aligned} Z_i^{offset\ horizontal} &= Z_{ESTACA}^{offset\ horizontal} \\ T_i^{offset\ horizontal} &= T_{ESTACA}^{offset\ horizontal} \end{aligned} \quad (38)$$

$$x_i = x_{ESTACA}$$

onde  $i$  é o próprio valor da estaca na notação convencional para todos os pontos de estaca cheia do eixo, excetuando o ponto da cabeceira de maior número que obedece essa regra em caso de estaca cheia e, em caso de estaca quebrada, recebe um adicional do valor.

Exemplo: Imagine que o valor da estaca da cabeceira de maior número é 91+10,00, a nomenclatura relativa estabeleceria a cota de projeto desse ponto como  $Z_{92}^0$ .

Para aprimorar a nomeclatura pode-se estabelecer:

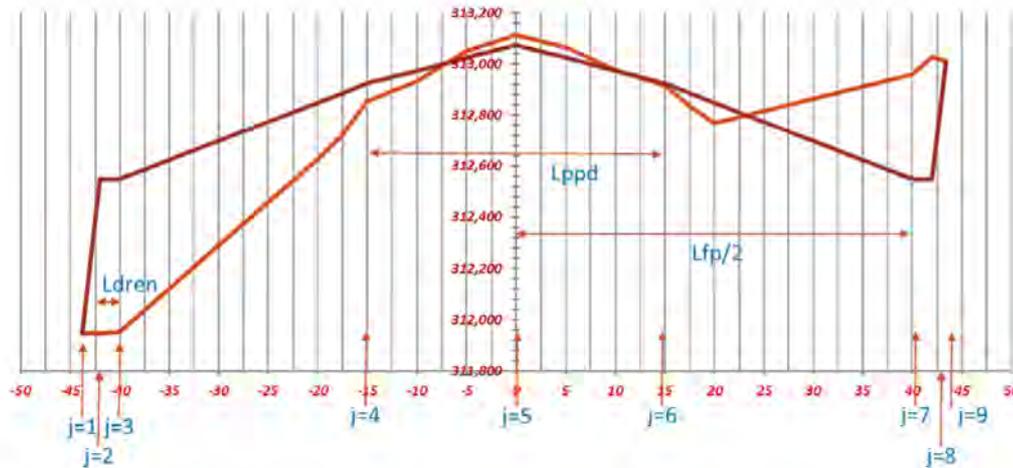
$$\begin{aligned} Z_{i,j} &= Z_i^{offset\ horizontal} \\ T_{i,j} &= T_i^{offset\ horizontal} \end{aligned} \quad (39)$$

Onde os valores de  $j$  apresentam-se como:

$$\begin{aligned} offset\ horizontal &= -\frac{L_{FP}}{2} - L_{DREN} - L_{ESTACA}^- \rightarrow j = 1 \\ offset\ horizontal &= -\frac{L_{FP}}{2} - L_{DREN} \rightarrow j = 2 \\ offset\ horizontal &= -\frac{L_{FP}}{2} \rightarrow j = 3 \\ offset\ horizontal &= -\frac{L_{PPD}}{2} \rightarrow j = 4 \\ offset\ horizontal &= 0 \rightarrow j = 5 \\ offset\ horizontal &= \frac{L_{PPD}}{2} \rightarrow j = 6 \\ offset\ horizontal &= \frac{L_{FP}}{2} \rightarrow j = 7 \\ offset\ horizontal &= \frac{L_{FP}}{2} + L_{DREN} \rightarrow j = 8 \\ offset\ horizontal &= \frac{L_{FP}}{2} + L_{DREN} + L_{ESTACA}^+ \rightarrow j = 9. \end{aligned} \quad (40)$$

Os valores de  $j$  crescem da lateral esquerda até o eixo e do eixo até a lateral direita conforme os pontos estabelecidos são contemplados nessa sequência imaginária. Desta forma  $j$  sempre tem os valores que vão de 1 a 9, como  $L_{ESTACA}^+$  e  $L_{ESTACA}^-$  são os únicos valores retroalimentados de importância para os cálculos e boa apresentação do modelo

será um complicador para a resolução do método. A Figura 18 apresenta um exemplo de seção transversal com os respectivos valores de  $j$  para cada offset.



**Figura 18: Exemplo de seção transversal com os respectivos valores de  $j$  para cada offset.**

Para a boa apresentação define-se a distância entre os pontos adjacentes de uma seção transversal ( $d_{ij}$ ) relativos aos pontos  $Z_{i,j}$  e  $Z_{i,j+1}$ , definidas por:

$$\begin{aligned}
 d_{i1} &= L_{ESTACA}^- \\
 d_{i2} &= d_{i7} = L_{DREN}, \quad \text{para todo } i \\
 d_{i3} &= d_{i6} = \frac{L_{FP}}{2} - \frac{L_{PPD}}{2}, \quad \text{para todo } i \\
 d_{i4} &= d_{i5} = \frac{L_{PPD}}{2}, \quad \text{para todo } i \\
 d_{i8} &= L_{ESTACA}^+
 \end{aligned} \tag{41}$$

#### 4.5. Cálculo de Volumes

Este tópico tem como objetivo realizar o cálculo de volumes de corte e aterro matematizados, em acordo com a nova nomenclatura discutida no item anterior. Deve-se recordar do tópico anterior a nomenclatura das cotas altimétricas pontos de topografia coletados  $T_{i,j}$ , o valor coletado pela topografia, no entanto, pode ou não considerar a camada vegetal, em acordo com a superfície gerada se esta for de terreno natural ou já em terreno expurgado, deste modo o valor de topografia necessário para a elaboração do modelo ( $T_{i,j}$ ) deve ser implementado considerando a espessura da camada vegetal ( $e_{cv}$ ), em termos interativos:

$$T_{i,j} = T_{i,j} - e_{cv}. \tag{42}$$

Segundo apresentado no item 3.4 a área de uma seção de determinada estaca relativa ao corte é apresentada por:

$$A_i^{corte}, \quad (43)$$

enquanto que quando relativizada à aterro é apresentada por:

$$A_i^{aterro}. \quad (44)$$

Para definir determinada área total de corte numa seção, haverá um somatório de composição de áreas entre os pontos definidos pelo projeto apresentado por:

$$A_i^{corte} = \sum_{j=1}^8 A_{i,j}^{corte} \quad (45)$$

$$A_i^{aterro} = \sum_{j=1}^8 A_{i,j}^{aterro},$$

onde  $A_{i,j}^{corte/aterro}$  é uma função condicional em torno das cotas altimétricas dos pontos de projeto  $Z_{i,j}$  e  $Z_{i,j+1}$  e dos pontos de topografia corrigidos pela espessura da camada vegetal  $T_{i,j}$  e  $T_{i,j+1}$ , tal que:

$$Se Z_{i,j} \geq T_{i,j} e Z_{i,j+1} \geq T_{i,j+1} \rightarrow A_{i,j}^{corte} = 0 e$$

$$A_{i,j}^{aterro} = \frac{[(Z_{i,j+1} - T_{i,j+1}) + (Z_{i,j} - T_{i,j})] * d_{ij}}{2}, \quad (46)$$

ou seja, como todo o projeto está acima da superfície todo esse segmento é aterrado.

$$Se Z_{i,j} \leq T_{i,j} e Z_{i,j+1} \leq T_{i,j+1} \rightarrow A_{i,j}^{aterro} = 0 e$$

$$A_{i,j}^{corte} = \frac{[(T_{i,j+1} - Z_{i,j+1}) + (T_{i,j} - Z_{i,j})] * d_{ij}}{2}, \quad (47)$$

ou seja, como todo o projeto está acima da superfície todo esse segmento é cortado.

$$Se Z_{i,j} \geq T_{i,j} e Z_{i,j+1} \leq T_{i,j+1} \rightarrow$$

$$A_{i,j}^{corte} = \frac{(T_{i,j+1} - Z_{i,j+1})^2 * d_{ij}}{2 * [(T_{i,j+1} - Z_{i,j+1}) + (Z_{i,j} - T_{i,j})]} e \quad (48)$$

$$A_{i,j}^{aterro} = \frac{(Z_{i,j} - T_{i,j})^2 * d_{ij}}{2 * [(T_{i,j+1} - Z_{i,j+1}) + (Z_{i,j} - T_{i,j})]},$$

ou seja, como parte do projeto está acima do terreno, pela proporcionalidade dos termos positivos, parte da área é destinada à corte e parte é destinada a aterro. Por fim:

$$Se Z_{i,j} \leq T_{i,j} e Z_{i,j+1} \geq T_{i,j+1} \rightarrow \quad (49)$$

$$A_{i,j}^{corte} = \frac{(T_{i,j} - Z_{i,j})^2 * d_{ij}}{2 * [(Z_{i,j+1} - T_{i,j+1}) + (T_{i,j} - Z_{i,j})]} e$$

$$A_{i,j}^{aterro} = \frac{(Z_{i,j+1} - T_{i,j+1})^2 * d_{ij}}{2 * [(Z_{i,j+1} - T_{i,j+1}) + (T_{i,j} - Z_{i,j})]} .$$

Deste modo pode-se escrever na forma final que

$$V_0^{corte} = 0$$

$$V_i^{corte} = V_{(i-1)i}^{corte} = \frac{(x_i - x_{i-1})}{2} * (A_{(i-1)}^{corte} + A_i^{corte}) \quad (50)$$

$$V_{acumulado}^{corte} = \sum V_i^{corte},$$

e para as áreas de aterro como:

$$V_0^{aterro} = 0$$

$$V_i^{aterro} = V_{(i-1)i}^{aterro} = \frac{(x_i - x_{i-1})}{2} * (A_{(i-1)}^{aterro} + A_i^{aterro}) \quad (51)$$

$$V_{acumulado}^{aterro} = \sum V_i^{aterro}.$$

No entanto, as seguintes as considerações apresentadas nos itens 3.6 e 3.7 de espessura do pavimento e fator de homogeneização devem corrigir os volumes encontrados.

Como todo o caixão do pavimento, incluindo as áreas de acostamento, são regiões que não recebem terras, tem-se de modo iterativo que:

$$V_{acumulado}^{aterro} = V_{acumulado}^{aterro} - L_{PPD} * e_{pav} * x_{ECM} - L_{acos} * e_{acos} * x_{ECM}, \quad (52)$$

onde  $L_{PPD}$  é a largura da pista de pouso,  $L_{acos}$  é a largura do acostamento (se houver),  $e_{pav}$  é a espessura do pavimento,  $e_{acos}$  é a espessura do acostamento (se houver) e  $x_{ECM}$  é a estaca da cabeceira de maior número em notação quilométrica. Note que todos os dados apresentados são dados de entrada.

A consideração do fator de homogeneização ( $F_h$ ), dado de entrada do modelo, pode ser inserida direto na função objetivo tal que:

$$F.O.: Min Z = |V_{acumulado}^{corte} - F_h * V_{acumulado}^{aterro}|. \quad (53)$$

Deste modo, todas as condições de contorno, variáveis de decisão, considerações de projeto e função objetivo estão estabelecidos, de modo que o método está completo necessitando de estudo de caso para a sua validação.

## 5. ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso e apresentação do software desenvolvido, o sítio aeroportuário escolhido foi o Aeroporto de Crateús – CE. O Aeroporto Doutor Lúcio Lima, em Crateús – CE, SNWS (ICAO), com altitude de 1034 pés, latitude de 5°12'39 s e longitude de 40°42'13 w, tem uma pista de pouso funcional com dimensões aproximadas de 1480 m x 30 m. A Figura 19 apresenta a vista área do aeroporto através da utilização do serviço gratuito do Google Maps.



**Figura 19: Aeroporto de Crateús – CE.**

A escolha do sítio aeroportuário se dá pelo fato de haver dados de topografia do local disponíveis e apesar da topografia não apresentar um terreno natural em que não houver movimentações de terra prévio, por ser um trabalho acadêmico e hipotético, o modelo não se anula.

### 5.1. Inserção dos dados de entrada

Para elaboração do software capaz de resolver o modelo, utilizou-se a planilha eletrônica Excel. Na aba da planilha FM\_TG, os dados de entrada funcionais podem ser inseridos, todas as células tem aviso de erros quando valores fora do esperado são inseridos e setas com listas suspensas, onde necessário, para facilitar a boa utilização e evitar mal preenchimento. Além disso, uma sinalização em verde claro representa que todos os dados de entrada de determinada célula estarão aptos para o modelo. A Tabela 1 apresenta os dados de entrada utilizados para o estudo de caso do referido aeroporto.

**Tabela 1: Inserção de dados de entrada na planilha eletrônica.**

Dados de entrada		
Número da estaca de maior número	74	+ 0,00
Código de pista	2 C	
Com precisão?	NÃO	
Espessura do pavimento	15 cm	
Espessura da camada vegetal	10 cm	
Fator de empolamento	1,40	
Largura da drenagem	2 m	
Espessura do acostamento	0 cm	
Largura do acostamento	0 m	

O primeiro dado de entrada, número da estaca de maior número, representa a amplitude do projeto. Como convencionado no item 4.1, a cabeceira de menor número representa a origem do sistema de eixos, excetuando-se a sua cota. Deste modo, o tamanho da pista 1480 implica que a estaca da cabeceira de maior número é a estaca 74 + 0,00, sendo este o dado de entrada do programa.

Notoriamente muitos projetos de aeródromos tem um escopo de projeto superior em termos longitudinais do que a área pavimentada em si. No entanto, o estudo dessas áreas de faixa preparada deve ser feito isoladamente acompanhando a declividade do terreno, pois a inserção dessas áreas não requerem as condições de contorno preconizadas por norma e a sua concordância com o perfil da área pavimentada geraria uma limitação a mais para o modelo ou uma ampliação do número de variáveis de decisão.

Outro ponto a se destacar é o código de referência do aeródromo, designado como 2C, inserido através de listas suspensas. O comprimento da pista de pouso é de 1480 m o que posicionaria o aeroporto no código de número 3. No entanto, os dados topográficos disponíveis apresentavam o limite da faixa preparada a 40 m do eixo da pista. Deste modo, além do comprimento em si, sem os dados de altitude e temperatura, não ser garantia do número do código de referência, a suposição de que o aeroporto é código de número 2 será adotada neste estudo de caso.

A espessura do pavimento adotada será de 15 cm, a espessura da camada vegetal em 10 cm, fator de empolamento de 1,40 e a pista não dispõe de acostamento. Todos os dados inseridos fazem sentido a título de suposição de projeto e ausência de acostamentos é justificada pela largura da faixa pavimentada em acordo com o código de referência. A largura da drenagem adotada é de 2,00 m. Para uma melhor compreensão desses temas pode-se consultar os itens: 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

## 5.2. Inserção dos dados de topografia

Para inserção dos dados de topografia deve-se clicar na aba da planilha Topografia-Input e seguir as indicações do índice e das laterais para cada estaca, um passo de auxílio está na aba da planilha TG\_FM com as larguras auxiliares para o referido código de referência. A Tabela 2 apresenta uma tabela com as larguras auxiliares necessárias para a aquisição das cotas topográficas dos alinhamentos necessários para a execução do modelo.

**Tabela 2: Larguras auxiliares para aquisição de dados topográficos.**

Larguras auxiliares	
Largura da pista de pouso - $L_{FPD}$	30 m
Largura da faixa preparada $L_{FP}/2$	40 m
Largura final - $20 \times L_{FP}/2$	60 m

A inserção dos alinhamentos é de fundamental importância para o modelo, ou seja, sem um bom projeto topográfico o modelo é prejudicado, a Tabela 3 e Tabela 4 apresentam todos os dados de topografia utilizados nesse estudo de caso.

**Tabela 3: Tabela de inserção de dados de topografia 01/02.**

ESTACA (valor de $i$ )	$T_{ESTACA}^{-20 \times \frac{L_{FP}}{2}}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{-L_{FP}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{-L_{FPD}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^0$ (em m)	$T_{ESTACA}^{L_{FPD}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{L_{FP}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{20 \times L_{FP}/2}$ (em m)
0	312,926	313,221	313,711	313,865	313,721	312,901	312,183
1	313,272	313,162	313,715	313,868	313,675	312,832	312,444
2	313,456	313,176	313,655	313,857	313,693	312,978	312,602
3	313,469	313,151	313,642	313,817	313,644	312,983	312,533
4	313,640	313,367	313,627	313,792	313,627	312,532	312,255
5	313,498	313,284	313,582	313,759	313,547	312,462	311,914
6	313,691	313,290	313,545	313,727	313,512	312,482	311,692
7	313,635	313,226	313,509	313,677	313,505	312,030	311,671
8	313,571	313,252	313,452	313,607	313,462	311,667	311,604
9	313,606	313,251	313,360	313,578	313,479	311,582	311,520
10	313,369	313,340	313,335	313,555	313,416	311,586	311,429
11	313,181	313,238	313,367	313,535	313,368	311,677	311,530
12	313,415	313,226	313,306	313,477	313,342	311,857	311,934
13	313,427	313,209	313,253	313,446	313,277	312,346	311,872
14	313,170	313,281	313,206	313,396	313,235	312,925	312,055
15	313,754	313,754	313,170	313,370	313,161	313,129	313,103
16	314,071	314,317	313,162	313,347	313,098	313,423	313,694
17	313,990	313,861	313,101	313,274	313,087	313,668	314,067
18	313,685	313,494	313,054	313,242	313,052	314,002	314,160
19	312,962	312,968	312,987	313,192	312,977	313,625	314,252
20	312,207	312,532	312,957	313,160	312,958	313,338	313,974
21	311,899	311,954	312,853	313,112	312,917	312,960	313,621
22	311,348	311,466	312,826	313,067	312,863	312,673	313,268
23	311,026	311,259	312,804	312,994	312,817	312,705	313,124
24	311,105	311,142	312,732	312,937	312,825	312,827	313,137
25	311,163	311,161	312,737	312,892	312,774	312,855	313,159
26	311,159	311,269	312,664	312,852	312,683	312,973	313,189
27	311,232	311,676	312,612	312,812	312,617	312,763	313,142
28	311,515	312,172	312,572	312,782	312,642	312,642	313,055
29	311,790	312,298	312,520	312,737	312,594	312,728	313,032
30	311,851	312,513	312,493	312,694	312,524	312,904	313,014

Tabela 4: Tabela de inserção de dados de topografia 02/02.

ESTACA (valor de i)	$T_{ESTACA}^{-20 \frac{\Delta EF}{2}}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{-L_{FP}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{-L_{PPD}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^0$ (em m)	$T_{ESTACA}^{L_{PPD}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{L_{FP}/2}$ (em m)	$T_{ESTACA}^{20+L_{FP}/2}$ (em m)
31	311,896	312,105	312,447	312,657	312,467	312,684	312,919
32	311,969	311,787	312,437	312,602	312,382	312,711	312,957
33	312,114	311,772	312,427	312,637	312,395	312,620	312,938
34	311,926	311,847	312,347	312,589	312,427	312,586	312,911
35	311,823	311,875	312,397	312,595	312,407	312,557	312,847
36	311,846	311,992	312,347	312,577	312,419	313,114	313,514
37	311,868	311,810	312,272	312,527	312,327	311,973	313,338
38	311,744	311,717	312,257	312,479	312,302	312,471	312,959
39	311,628	312,165	312,197	312,432	312,252	312,372	313,295
40	311,746	312,702	312,172	312,402	312,192	312,362	313,559
41	311,787	312,788	312,162	312,373	312,177	312,140	313,428
42	311,659	312,965	311,990	312,327	312,087	312,007	313,133
43	311,724	312,996	312,008	312,307	312,052	312,307	312,855
44	311,790	313,117	312,027	312,255	312,067	312,697	313,258
45	312,507	312,797	311,972	312,206	312,020	312,147	312,761
46	311,979	312,567	311,967	312,135	311,953	311,688	311,837
47	311,577	311,845	311,905	312,061	311,891	311,508	311,600
48	311,367	311,212	311,827	312,017	311,828	311,418	311,251
49	311,096	310,653	311,783	311,943	311,785	311,325	311,158
50	310,726	310,183	311,711	311,886	311,721	311,321	311,038
51	310,485	310,442	311,633	311,831	311,694	311,163	310,978
52	310,309	310,790	311,593	311,764	311,591	311,094	310,848
53	310,356	310,901	311,604	311,755	311,633	310,884	310,459
54	310,623	311,101	311,597	311,743	311,533	310,763	310,038
55	310,789	311,004	311,566	311,720	311,560	310,601	309,830
56	310,909	310,996	311,516	311,686	311,543	310,528	309,725
57	310,930	310,922	311,534	311,693	311,510	310,383	309,622
58	310,802	310,938	311,518	311,685	311,507	310,327	309,665
59	310,763	310,909	311,477	311,653	311,502	310,430	309,767
60	310,762	310,970	311,458	311,630	311,436	310,624	309,868
61	310,690	311,019	311,400	311,590	311,420	310,597	309,904
62	310,709	311,159	311,368	311,560	311,380	310,660	309,858
63	310,728	310,942	311,358	311,520	311,382	310,565	309,922
64	310,762	310,815	311,310	311,488	311,275	310,560	309,925
65	310,679	310,812	311,268	311,416	311,229	310,375	309,837
66	310,590	310,899	311,209	311,369	311,180	310,280	309,806
67	310,489	310,612	311,141	311,318	311,148	310,101	309,544
68	310,369	310,414	311,124	311,265	311,037	310,012	309,283
69	310,250	310,413	311,038	311,220	310,981	309,930	309,113
70	310,149	310,501	311,010	311,160	310,961	309,938	308,943
71	310,110	310,393	310,960	311,111	310,950	310,118	308,755
72	310,119	310,374	310,895	311,050	310,900	310,387	308,662
73	309,847	310,068	310,846	311,020	310,822	310,404	308,609
74	309,475	309,852	310,790	310,960	310,820	310,510	308,343

A aba da planilha Topografia-Input permite a inserção de até 200 pontos do alinhamento, ou seja, uma pista de pouso de até 4000 m. As linhas posteriores ao número de pontos precisos para o aeroporto ficam não preenchidas e a célula de estaca automaticamente assume o valor “-“ ou “#VALUE!”.

### 5.3. Variáveis de decisão e condições de contorno – Comparação de volumes

O próximo passo se dá na inserção de um “chute inicial” para as variáveis de decisão. O método empregado para a resolução é o método GRG Nonlinear do solver do Excel, sendo este um algoritmo ideal para o caso, pois, ele tem a sua aplicabilidade em problemas não lineares mas que não tem uma não linearidade tão alta. O algoritmo de busca baseia-se

no método do Gradiente Reduzido Generalizado e, este, não garante uma solução de mínimo global, no entanto, garante que não recaímos em mínimos locais gerando uma solução adequada para o problema satisfazendo todas as condições de contorno.

Como valores iniciais pode-se escolher qualquer que seja o valor, a solução gerada nem sempre recai no mesmo mínimo, pela infinidade de soluções. Deste modo deve-se inserir no solver todas as condições de contorno explicadas nos itens 4.2 e 4.3. O chute inicial adotado pode ser observado na Tabela 5, o importante é que todas as variáveis de decisão já encontrem-se dentro das normas preconizadas, ou seja, que atendam as condições de contorno, pode-se encontrar esta tabela na aba FM\_TG da planilha de Excel.

**Tabela 5: Chute inicial das variáveis de decisão.**

Variáveis de decisão			
a1	0,30%	item 4.2	reta 1
b1	314,000	item 4.2	
a2	1,00%	item 4.2	reta 2
b2	230,000	item 4.2	
i1	1,25%	item 4.3	
i2	2,00%	item 4.3	
i3	25,00%	item 4.3	

Para facilitar a programação do método uma tabela de pontos geométricos auxiliares também foi inserida, esta tabela não deve ser violada, pois os dados são gerados automaticamente por formulação e método. A Tabela 6 apresenta a tabela de pontos geométricos auxiliares do alinhamento vertical do projeto, através da inserção dos dados de entrada, esta tabela também está na aba FM\_TG.

**Tabela 6: Pontos geométricos auxiliares.**

Pontos geométricos auxiliares – eixo		
a1'	-0,30%	
a2'	1,00%	
a3	0,634	parábola de transição
b3	-8128,212	
c3	26062557,646	
Xpcv	6412,788	
Zpcv	294,762	
Xpiv	6461,538	
Zpiv	294,615	
Xptv	6510,288	
Zptv	295,103	
Rv	7500,000	
L	97,500	

Para facilitar a programação do método uma tabela de condições de contorno também foi inserida, esta tabela não deve ser violada, pois os dados são gerados automaticamente por formulação e método. Além disso a tabela torna-se útil para que se confira quais são as condições de contorno do método para cada código de referência adotado, servindo de apoio para projetos que não tem por intuito utilizar o método para otimização. A Tabela 7 apresenta, de forma simplificada, as condições de contorno do projeto, através da inserção dos dados de entrada, esta tabela também está na aba FM\_TG. O valor posicionado ao lado da terceira condição serve de apoio à programação.

**Tabela 7: Tabela auxiliar de condições de contorno.**

Condições de contorno		
amax	2,00%	
a1,a2 <=	2,00%	
a1-a2  <=	2,00%	0,70%
i1,i2, i3>=	1,00%	
i1<=	1,50%	
i2<=	3,00%	
i3<=	33,33%	

Por fim, pode-se encontrar os volumes gerados pelo valor inicial previamente ao método, uma nova tabela de volumes, também presente na aba FM\_TG, é capaz de dizer de forma rápida qual a movimentação de terra e compensação de qualquer projeto geométrico adotado, mesmo que não utilizado pelo método. A Tabela 8 apresenta a tabela de volumes gerada pelo chute inicial.

**Tabela 8: Volumes gerado pelo chute inicial.**

Volumes (m <sup>3</sup> )	
Corte (Aij)	90037,650
Aterro (Aij)	4205,569
Pavimento	6660,000
Acostamento	0,000
Aterro Final	-3436,204
Compensação	93473,854

Os valores de Corte (Aij) e Aterro (Aij) são provenientes da formulação exposta no item 4.5, os volumes de pavimento e acostamento são provenientes do volume do caixão do pavimento dispostos nessas regiões que descontados de Aterro (Aij) e deste valor multiplicado pelo fator de empolamento, tem-se o valor de Aterro Final. A compensação é a diferença, em módulo, entre Aterro Final e Corte (Aij) sendo essa célula a função objetivo, em caso de dúvida pode-se consultar as equações ( 52 ) e ( 53 ).

Dispõe-se que o solver resolva o problema a partir daí. Após interações, a resposta gerada de variáveis de decisão, dispõe a solução final, após a pesquisa operacional ser realizada pelo modelo. Os valores pós pesquisa operacional de variáveis de decisão e volumes de movimentação de terras estão dispostos na Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente.

**Tabela 9: Variáveis de decisão após pesquisa operacional.**

Variáveis de decisão			
a1	0,29%	item 4.2	reta 1
b1	314,514	item 4.2	
a2	1,00%	item 4.2	reta 2
b2	230,000	item 4.2	
i1	1,25%	item 4.3	
i2	1,99%	item 4.3	
i3	25,23%	item 4.3	

**Tabela 10: Volumes finais após o modelamento da pesquisa operacional.**

Volumes (m <sup>3</sup> )	
Corte (Aij)	24661,168
Aterro (Aij)	24212,637
Pavimento	6660,000
Acostamento	0,000
Aterro Final	24573,691
Compensação	87,477

Pode-se perceber que a compensação é de menos de 100 m<sup>3</sup> de terra atingindo o objetivo de minimizar ao máximo a função objetivo, ou seja, quase não será preciso movimentos de terras e aquisição/bota-fora de terras em regiões fora do sítio aeroportuário, reduzindo logística e custos de obra. Em termos dos movimentos de terra dentro do aeródromo o volume é excelente, totalizando pouco mais de 25000 m<sup>3</sup>, o projeto é, portanto, balanceado ao extremo e com elevada otimização no movimento de terra no próprio sítio.

A planilha eletrônica é ainda capaz de fornecer todos os valores de cotas altimétricas, topográficas (aba Tij) e de projeto (aba Zij), bem como, os volumes de corte (Aij) e aterro (Aij), seção a seção, segmento a segmento. O resultado final o projeto geométrico, ou seja, os valores de cota de projeto (Zij) estão disposto na Tabela 11 e na Tabela 12.

Tabela 11: Cotas de projeto resultante do modelamento 01/02.

ESTACA (valor de i)	$Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FE}+L_{DREN}-L_{ESTACA}}{2}}$ (j=1, em m)	$Z_{ESTACA}^{\frac{-L_{FE}-L_{DREN}}{2}}$ (j=2, em m)	$Z_{ESTACA}^{-L_{FP}/2}$ (j=3, em m)	$Z_{ESTACA}^{-L_{FPD}/2}$ (j=4, em m)	$Z_{ESTACA}^0$ (j=5, em m)	$Z_{ESTACA}^{L_{FPD}/2}$ (j=6, em m)	$Z_{ESTACA}^{L_{FP}/2}$ (j=7, em m)	$Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FE}+L_{DREN}}{2}}$ (j=8, em m)	$Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FE}+L_{DREN}+L_{ESTACA}}{2}}$ (j=9, em m)
0	313,046	313,829	313,829	314,327	314,514	314,327	313,829	313,829	312,547
1	313,088	313,772	313,772	314,270	314,457	314,270	313,772	313,772	312,603
2	313,136	313,715	313,715	314,212	314,399	314,212	313,715	313,715	312,770
3	313,117	313,658	313,658	314,155	314,342	314,155	313,658	313,658	312,758
4	313,310	313,601	313,601	314,098	314,285	314,098	313,601	313,601	312,335
5	313,219	313,543	313,543	314,041	314,228	314,041	313,543	313,543	312,157
6	313,249	313,486	313,486	313,984	314,171	313,984	313,486	313,486	312,083
7	313,187	313,429	313,429	313,927	314,114	313,927	313,429	313,429	311,776
8	313,195	313,372	313,372	313,870	314,057	313,870	313,372	313,372	311,538
9	313,195	313,315	313,315	313,813	314,000	313,813	313,315	313,315	311,453
10	313,243	313,258	313,258	313,756	313,943	313,756	313,258	313,258	311,413
11	313,132	313,201	313,201	313,699	313,886	313,699	313,201	313,201	311,513
12	313,145	313,144	313,144	313,641	313,828	313,641	313,144	313,144	311,785
13	313,132	313,087	313,087	313,584	313,771	313,584	313,087	313,087	312,106
14	313,167	313,030	313,030	313,527	313,714	313,527	313,030	313,030	312,677
15	313,654	312,973	312,973	313,470	313,657	313,470	312,973	312,973	313,026
16	314,133	312,915	312,915	313,413	313,600	313,413	312,915	312,915	313,375
17	313,798	312,858	312,858	313,356	313,543	313,356	312,858	312,858	313,672
18	313,437	312,801	312,801	313,299	313,486	313,299	312,801	312,801	313,954
19	312,867	312,744	312,744	313,242	313,429	313,242	312,744	312,744	313,707
20	312,380	312,687	312,687	313,185	313,372	313,185	312,687	312,687	313,390
21	311,840	312,630	312,630	313,128	313,315	313,128	312,630	312,630	312,971
22	311,325	312,573	312,573	313,071	313,258	313,071	312,573	312,573	312,640
23	311,069	312,516	312,516	313,013	313,200	313,013	312,516	312,516	312,659
24	311,028	312,459	312,459	312,956	313,143	312,956	312,459	312,459	312,778
25	311,061	312,402	312,402	312,899	313,086	312,899	312,402	312,402	312,810
26	311,132	312,345	312,345	312,842	313,029	312,842	312,345	312,345	312,919
27	311,458	312,287	312,287	312,785	312,972	312,785	312,287	312,287	312,734
28	311,973	312,230	312,230	312,728	312,915	312,728	312,230	312,230	312,615
29	312,144	312,173	312,173	312,671	312,858	312,671	312,173	312,173	312,689
30	312,320	312,116	312,116	312,614	312,801	312,614	312,116	312,116	312,830
31	311,981	312,059	312,059	312,557	312,744	312,557	312,059	312,059	312,634
32	311,716	312,002	312,002	312,500	312,687	312,500	312,002	312,002	312,668
33	311,721	311,945	311,945	312,443	312,630	312,443	311,945	311,945	312,593
34	311,757	311,888	311,888	312,385	312,572	312,385	311,888	311,888	312,562
35	311,769	311,831	311,831	312,328	312,515	312,328	311,831	311,831	312,526
36	311,874	311,774	311,774	312,271	312,458	312,271	311,774	311,774	313,164

Tabela 12: Cotas de projeto resultante do modelamento 02/02.

ESTACA (valor de $i$ )	$Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FF}}{2} - L_{LOREN} - L_{ESTACA}}$ (j=1, em m)	$Z_{ESTACA}^{\frac{-L_{FF}}{2} - L_{LOREN}}$ (j=2, em m)	$Z_{ESTACA}^{-L_{FF}/2}$ (j=3, em m)	$Z_{ESTACA}^{-L_{FFD}/2}$ (j=4, em m)	$Z_{ESTACA}^0$ (j=5, em m)	$Z_{ESTACA}^{L_{FFD}/2}$ (j=6, em m)	$Z_{ESTACA}^{L_{FF}/2}$ (j=7, em m)	$Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FF}}{2} + L_{LOREN}}$ (j=8, em m)	$Z_{ESTACA}^{\frac{L_{FF}}{2} + L_{LOREN} + L_{ESTACA}}$ (j=9, em m)
37	311,715	311,717	311,717	312,214	312,401	312,214	311,717	311,717	312,118
38	311,620	311,659	311,659	312,157	312,344	312,157	311,659	311,659	312,501
39	311,972	311,602	311,602	312,100	312,287	312,100	311,602	311,602	312,534
40	312,353	311,545	311,545	312,043	312,230	312,043	311,545	311,545	312,642
41	312,406	311,488	311,488	311,986	312,173	311,986	311,488	311,488	312,402
42	312,466	311,431	311,431	311,929	312,116	311,929	311,431	311,431	312,189
43	312,488	311,374	311,374	311,872	312,059	311,872	311,374	311,374	312,370
44	312,558	311,317	311,317	311,815	312,002	311,815	311,317	311,317	312,820
45	312,591	311,260	311,260	311,757	311,944	311,757	311,260	311,260	312,226
46	312,282	311,203	311,203	311,700	311,887	311,700	311,203	311,203	311,615
47	311,689	311,146	311,146	311,643	311,830	311,643	311,146	311,146	311,422
48	311,129	311,089	311,089	311,586	311,773	311,586	311,089	311,089	311,294
49	310,632	311,031	311,031	311,529	311,716	311,529	311,031	311,031	311,202
50	310,219	310,974	310,974	311,472	311,659	311,472	310,974	310,974	311,181
51	310,351	310,917	310,917	311,415	311,602	311,415	310,917	310,917	311,040
52	310,619	310,860	310,860	311,358	311,545	311,358	310,860	310,860	310,964
53	310,739	310,803	310,803	311,301	311,488	311,301	310,803	310,803	310,735
54	310,935	310,746	310,746	311,244	311,431	311,244	310,746	310,746	310,564
55	310,874	310,689	310,689	311,187	311,374	311,187	310,689	310,689	310,376
56	310,883	310,632	310,632	311,129	311,316	311,129	310,632	310,632	310,294
57	310,823	310,575	310,575	311,072	311,259	311,072	310,575	310,575	310,141
58	310,816	310,518	310,518	311,015	311,202	311,015	310,518	310,518	310,107
59	310,785	310,461	310,461	310,958	311,145	310,958	310,461	310,461	310,234
60	310,831	310,403	310,403	310,901	311,088	310,901	310,403	310,403	310,442
61	310,853	310,346	310,346	310,844	311,031	310,844	310,346	310,346	310,418
62	310,955	310,289	310,289	310,787	310,974	310,787	310,289	310,289	310,454
63	310,797	310,232	310,232	310,730	310,917	310,730	310,232	310,232	310,382
64	310,704	310,175	310,175	310,673	310,860	310,673	310,175	310,175	310,372
65	310,684	310,118	310,118	310,616	310,803	310,616	310,118	310,118	310,211
66	310,727	310,061	310,061	310,559	310,746	310,559	310,061	310,061	310,126
67	310,488	310,004	310,004	310,501	310,688	310,501	310,004	310,004	309,938
68	310,306	309,947	309,947	310,444	310,631	310,444	309,947	309,947	309,821
69	310,284	309,890	309,890	310,387	310,574	310,387	309,890	309,890	309,721
70	310,331	309,833	309,833	310,330	310,517	310,330	309,833	309,833	309,715
71	310,238	309,775	309,775	310,273	310,460	310,273	309,775	309,775	309,859
72	310,223	309,718	309,718	310,216	310,403	310,216	309,718	309,718	310,014
73	309,934	309,661	309,661	310,159	310,346	310,159	309,661	309,661	310,003
74	309,707	309,604	309,604	310,102	310,289	310,102	309,604	309,604	310,016

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho pode apresentar uma otimização viável em torno da compensação entre corte e aterro dentro do sítio aeroportuário, minimizando a movimentação de terras em um projeto de terraplenagem. Como todo modelo, premissas para restringir o número de variáveis de decisão foram tomadas para que o algoritmo realiza-se de modo viável e em tempo rápido.

Premissas em torno das condições de contorno foram minimamente utilizadas para que o programa pudesse fornecer uma solução viável dentro dos limites das normas internacionais. No entanto, conforme citado nos itens 334.2 e 5.1, a questão da restrição da declividade em 0,8% no primeiro e último quarto de pista e dos limites longitudinais da faixa preparada foram desprezadas por motivos de não afetarem em grandes custos o movimento de terra no escopo do projeto e por ser necessário uma maior amplitude de variáveis de decisão dentro do alinhamento vertical.

A composição em apenas três variáveis de decisão no alinhamento vertical torna-se extremamente importante para futuras ampliações do aeródromo, pois mudanças de ascendência e descendência do greide são limitadas por norma. Desta forma como há apenas uma ascendência e uma descendência possível, pelo menos uma futura ampliação da pista está geometricamente livre para ser elaborada.

Os resultados obtidos no estudo de caso são de extrema relevância para a validação do modelo, uma compensação de menos de 100 m<sup>3</sup> é considerada irrelevante, o projeto torna-se 99,64% equilibrado desta forma, não necessitando de movimentos de transporte e logística para extrair ou depositar material de solo para fora da obra. Um total de movimentação de terra em torno de 25000 m<sup>3</sup> é adequado para o porte do projeto, no entanto uma restrição do volume total de corte pode ser inserido nas condições de contorno de modo que se busquem soluções de ainda menor movimentação de terra.

O método não garante um mínimo global, na verdade, em problemas de pesquisa operacional não lineares o mínimo global é dificilmente atingido, portanto, é desejável um número maior de tentativas para o “chute inicial” de modo a encontrar soluções cada vez melhores e mais próximas do mínimo global.

Um outro método possível para a abordagem da solução de pesquisa operacional seria tornar os valores discretos, como por exemplo, variar a inclinação  $a_1$  em 0,01% em 0,01%. O Excel não dispõe dessa abordagem matemática em seu solver, mas o número de soluções reduziria bastante e a implementação da busca, considerada agora como programação inteira, poderia ser realizada em macro.

Outra possibilidade de tornar o programa mais próximo da realidade e de maior agilidade em termos de dados de entrada está na aquisição dos dados de topografia, o software Autocad da AutoDesk por exemplo admite um tipo de programação em *lisp* de forma ser possível extrair os pontos de um determinado estaqueamento de forma automática e conseguir fazer uma ligação direta dos dados do Autocad para o Excel.

Todo aeródromo requer um Plano Básico de Zona de Proteção Aeroportuária (PBZPA) e as cotas de ambas cabeceiras são de extrema relevância e definem duas zonas de segurança: a rampa de aproximação e rampa de decolagem, condições de contorno em torno das cabeceiras podem ser facilmente implementadas de modo a assegurar que o projeto geométrico esteja adequado ao PBZPA.

Da mesma forma, todos os pontos do eixo da pista definem a chamada superfície de transição do PBZPA, condições de contorno adicionais para determinados pontos podem ser inseridas de modo a assegurar a segurança do aeródromo, bem como, o ponto de cota mais elevada do eixo define a superfície horizontal interna e superfície cônica, sujeito também a condições de contorno adicional para assegurar o correto cumprimento do PBZPA.

O modo que essas condições de contorno seriam implementadas é, na verdade, uma operação reversa, diante das cotas dos obstáculos do entorno do aeródromo assegura-se de forma reversa a máxima cota para determinado ponto do eixo da pista ( $Z_{i,0}$ ), desta forma a implementação é simples da forma:

$$Z_{i,0} \leq (Z_{i,0})_{max}. \quad (54)$$

Uma grande limitação do modelo é de sujeitar uma mesma seção tipo transversal para todo o escopo da pista de pouso, no entanto, pistas de pouso tem interconexão com pistas de taxi e o escopo do projeto pode abranger áreas como pátio de aeronaves ou vias de acesso. Desta forma, o projeto geométrico gerado é limitado pelos elementos geométricos do aeródromo existentes ou partes do projeto.

Uma forma de contornar esse problema, em termos de volumes de terra do projeto de terraplenagem, é fazer a própria análise descrita nesse trabalho para a pista de pouso e de

uma forma similar programar um modelo para a pista de táxi e/ou pátio de aeronaves, sujeitar as condições de contorno da pista de táxi, por exemplo, em seguida, limitar as condições de contorno para o pátio de aeronaves e buscar de formas isoladas uma compensação mínima para cada elemento do projeto geométrico. O erro, desta forma, ficaria restrito às zonas de intersecção, em termos gerais, pequenos em relação ao montante de movimentação de terra trabalhado.

Sabe-se também que volume de terra por si só não traduz o custo real do projeto de terraplenagem, o momento de transporte, ou seja, volume de terra x distância transportada é um indicador real em questões de custo. Um próximo passo para o trabalho seria realizar uma minimização de custos em torno do movimento de terra que o projeto geométrico gerado produz.

Mesmo que não haja correlação direta entre custos da obra e a compensação de corte/aterro no interior do sítio aeroportuário a validade e importância do método não é diminuída. O fato da terraplenagem ser, em sua máxima possibilidade, realizada dentro do sítio aeroportuário reduz muito os custos em questão de logística e necessidade de buscar viabilidade para materiais de empréstimo ou locais de bota-fora.

Em termos de custo ambiental, o método é importantíssimo diante do fato de que não é necessário alterar a paisagem de outras áreas e da redução do impacto ambiental fora do sítio aeroportuário. Diante de um contexto em que as obras de engenharia cada vez mais buscam a equidade entre economia, retorno social e sustentabilidade ambiental, a importância do método descrito se insere nas novas formas de abordar obras de infraestrutura.

Não é possível, também, dissociar um engenheiro moderno dos avanços da matemática computacional, tendo planilhas eletrônicas como Excel dispondo de recursos de otimização, a chave parece ser em abordar o problema de uma maneira mais holística. Em vez de adequar o projeto geométrico às normas, dissociando-os, de forma a tornar um projeto enviesado aos limites da norma, o método proposto busca abordar o projeto geométrico (por meio das variáveis de decisão) e normas (por meio das condições de contorno) como partes integrantes de um objetivo comum.

Desta forma, o presente trabalho apresenta uma solução de engenharia que reduz custos de obra, minimiza impactos ambientais e se insere no contexto de ser o caminho para o desenvolvimento dos projetos de terraplenagem tão necessários para as futuras obras de infraestrutura do Brasil.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARVALHO, RONALDO GONÇALVES. Projeto de Terraplenagem. DIRENG, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [2] SBO Szewczyk, PRF Teixeira, MAV Santos, 2005.
- [3] FRANCO, FILIPE AUGUSTO C. DE PROENÇA. Projeto Geométrico de Aeroportos. DIRENG, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [4] FRANCO, FILIPE AUGUSTO C. DE PROENÇA. Planejamento de Aeroportos. DIRENG, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [5] JLN Audy, GK de Andrade, A Cidral, 2007.  
INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). Aerodrome Design Manual – Part 1, 3rd Ed., Montreal, Canada, 2006.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 27 de novembro	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-117/2014	4. N° DE PÁGINAS 59
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Pesquisa operacional aplicada na definição de geometria de pista de pouso e decolagens.			
6. AUTOR(ES): <b>Filipe Simões Melo</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Aeroportos. 2. Projeto Geométrico de Aeroportos. 3. Pesquisa Operacional.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Planejamento de Aeroportos; Pista (de pouso e decolagem); Pesquisa operacional; Aeroportos;			
10. APRESENTAÇÃO: <span style="float: right;"><b>X Nacional</b>      <b>Internacional</b></span> ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia de Computação. Orientador: Prof. M. Sc. Ronaldo Gonçalves de Carvalho. Publicado em 2014.			
11. RESUMO:  Este trabalho dedica-se a elaborar uma metodologia capaz de otimizar os volumes de corte e aterro e a compensação entre ambos em determinado sítio aeroportuário, volumes estes provenientes de um projeto geométrico. A metodologia aplicada é realizada através de uma pesquisa operacional onde a função objetivo é o valor da compensação entre corte e aterro, as variáveis de decisão são componentes geométricas do projeto geométrico e as condições de contorno são aquelas dispostas nas normas internacionais da ICAO.			
12. GRAU DE SIGILO:  <b>(X) OSTENSIVO</b> ( ) <b>RESERVADO</b> ( ) <b>CONFIDENCIAL</b> ( ) <b>SECRETO</b>			