



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES -
PETTRAN

ROBERTO XAVIER DE LIMA

OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO:
UMA NOVA ABORDAGEM COM A CONSIDERAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS

FORTALEZA

2021

ROBERTO XAVIER DE LIMA

OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO: UMA
NOVA ABORDAGEM COM A CONSIDERAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador (a): Prof. D.Sc. Ernesto Ferreira Nobre Júnior

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L71o Lima, Roberto Xavier de.
Otimização das operações de terraplenagem e pavimentação: uma nova abordagem com a consideração de interferências / Roberto Xavier de Lima. – 2021.
135 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior.
1. Engenharia rodoviária. 2. Terraplenagem. 3. Pavimentação. 4. Otimização. 5. Programação matemática.
I. Título.

CDD 388

ROBERTO XAVIER DE LIMA

OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO: UMA
NOVA ABORDAGEM COM A CONSIDERAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mário Angelo Nunes de Azevedo Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Viviane Adriano Falcão
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. PhD. José Weissmann
University of Texas at Santo Antonio (UTSA)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ernesto Ferreira Nobre Júnior, meus agradecimentos pelo apoio e incentivo na elaboração desse trabalho.

Ao Engenheiro Pedro Guilherme Fernandes, pelas contribuições dadas aos modelos desenvolvidos nessa tese.

À Prof^a Viviane Falcão e ao Prof. Mário Azevedo pelas sugestões dadas no período de qualificação que contribuíram para o aprimoramento desse trabalho.

À minha mulher Sandra e meus filhos, Catarina, Renata, Daniel e Mariana pelo incentivo.

À minha irmã, Rejane, e meus pais, Hermes e Floripes (in memoriam), a quem dedico este trabalho.

Aos colegas, docentes e funcionários do DET – Departamento de Engenharia de Transportes, pelo apoio dado a esse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um modelo de otimização para o planejamento da distribuição de materiais nas operações de terraplenagem e pavimentação, onde foram consideradas as possíveis interferências com as seções de corte, aterro e as camadas do pavimento, tais como cursos d'água, vegetação, instalações diversas de concessionárias de serviços públicos ou desapropriações. O problema da alocação de terras incorporando-se interferências foi modelado como um problema de programação linear objetivando-se minimizar o custo total da movimentação dos materiais e considerou-se como restrições o prazo de execução dos serviços, o tempo de liberação dos bloqueios para permitir a livre circulação dos equipamentos, a geometria do projeto e o equilíbrio entre o material das ocorrências e os aterros ou camadas de pavimentação. O modelo proposto em programação linear usa o Excel para pré-processamento dos dados e o IBM CPLEX como otimizador. O modelo matemático foi validado por um exemplo real de uma via de manutenção de uma barragem no município de Maranguape no Estado do Ceará. Os custos unitários e as taxas de produção dos equipamentos usadas nos exemplos fictícios e no caso real foram obtidos da tabela de custos da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará. O modelo de otimização proposto atingiu tempos de processamento aceitáveis para todas as aplicações executadas, sendo uma opção viável e eficiente para aplicação no planejamento das operações de terraplenagem. A abordagem em programação linear apresentou uma redução nos custos da obra equivalente a 2,12% para o exemplo real comparada com o orçamento original do projeto. Esse estudo explorou o problema da alocação de terras com interferências usando uma modelagem na qual se evita algoritmos complexos encontrados na literatura recente. Dessa forma, o trabalho propõe um sistema de otimização amigável de forma a ser implementado por empresas e organismos públicos.

Palavras-chave: engenharia rodoviária; terraplenagem; pavimentação; otimização; programação matemática; programação linear.

ABSTRACT

An optimization model for planning the distribution of materials in earthmoving operations is presented in this thesis, considering possible interferences between cut sections, fill sections and paving strata such as rivers, vegetation, drainage works or expropriations. The earth allocation problem incorporating blocks was modeled as a linear programming problem, aiming to minimize the total earthmoving cost while considering the constraints related to volume balance, construction completion time and time for release equipment traffic. The proposed model was run by an integrated system using Excel for data entering and IBM CPLEX as the optimizer. The mathematical model was validated by one numerical example and a real-world project of a dam maintenance road in the city of Maranguape, State of Ceará, Brazil. The unit costs and productivity rates used in the fictional examples and real-world application followed the referential cost system created by Ceará's Secretariat of Infrastructure. The proposed optimization model achieved reasonable processing times for all tested applications, presenting itself as a viable and efficient option for planning earthmoving operations. The linear programming approach provided a 2.12% cost reduction for the real-world case study, when comparing the optimized solution and original budget. The study explored the problem of earth allocation with interferences avoiding complex algorithms found in recent literature. As a result it was proposed a user-friendly optimization system that can be easily utilized by construction companies and public agencies.

Keywords: road engineering; earthwork; optimization; mathematical programming; linear programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos segmentos e indicação dos bloqueios de uma construção rodoviária típica.....	29
Figura 2 – Fluxograma para resolução do modelo.....	36
Figura 3 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, aterros, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1.....	58
Figura 4 – Cronograma do Exemplo 1 – Cenário 1.....	67
Figura 5 – Cronograma do Exemplo 1 – Cenário 2.....	70
Figura 6 – Cronograma do Exemplo 1 - Cenário 3.....	74
Figura 7 – Curva Custo(C) x Duração(D) do Exemplo 1.....	76
Figura 8 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, aterros, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 1.....	77
Figura 9 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, aterros, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 2.....	80
Figura 10 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 3.....	82
Figura 11 – Trecho de rodovia para o Exemplo 2.....	85
Figura 12 – Variação do custo do projeto com o prazo de execução – Exemplo 2.....	86
Figura 13 – Custo total x número de bloqueios.....	87
Figura 14 – Esquema de movimentação dos cenários com três e quatro bloqueios – Exemplo 2.....	88
Figura 15 – Planta esquemática da Estrada de Contorno da Barragem do Rio Maranguapinho.....	89
Figura 16 – Cronograma para o Exemplo 3.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Interferências mais comuns nas obras rodoviárias.....	16
Tabela 2 –	Exemplo de composição de custos.....	37
Tabela 3 –	Finalidade e tipos de equipamentos de terraplenagem e pavimentação.....	40
Tabela 4 –	Estimativa de consumo de combustível de equipamentos a Diesel.....	44
Tabela 5 –	Estimativa de consumo de combustível de caminhões a Diesel.....	45
Tabela 6 –	Coeficientes de consumo de combustíveis, lubrificantes, filtros e graxas..	46
Tabela 7 –	Coeficiente de manutenção de equipamentos.....	47
Tabela 8 –	Valores para cálculo da depreciação de equipamentos.....	48
Tabela 9 –	Coeficientes em h/m ³ dos equipamentos referentes ao serviço “ESCAVAÇÃO CARGA E TRANSPORTE DE MATERIAL DE 1 ^a CATEGORIA DE 801 A 1000 m”.....	59
Tabela 10 –	Coeficientes em h/m ³ dos equipamentos referentes ao serviço “COMPACTAÇÃO DE ATERROS 100% P.N.”.....	60
Tabela 11 –	Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 1.....	62
Tabela 12 –	Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 1.....	63
Tabela 13 –	Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 1.....	64
Tabela 14 –	Resumo das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 1.....	66
Tabela 15 –	Resumo das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 1.....	66
Tabela 16 –	Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2.....	68
Tabela 17 –	Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2.....	69
Tabela 18 –	Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 2.....	69
Tabela 19 –	Resumo das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2.....	70
Tabela 20 –	Resumo das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2.....	70
Tabela 21 –	Resumo das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 2.....	70
Tabela 22 –	Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3.....	71
Tabela 23 –	Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3.....	72
Tabela 24 –	Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 3.....	73
Tabela 25 –	Resumo das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 - Cenário 3.....	73
Tabela 26 –	Resumo das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3.....	73
Tabela 27 –	Resumo das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 3.....	73

Tabela 28 –	Resumo da movimentação de material do Exemplo 1 – Cenário 1 – Volumes em 1000 m ³ - D=100 dias.....	74
Tabela 29 –	Resumo da movimentação de material do Exemplo 1 – Cenário 2 – Volumes em 1000 m ³ - D=80 dias.....	74
Tabela 30 –	Resumo da movimentação de material do Exemplo 1 – Cenário 3 – Volumes em 1000 m ³ - D=70 dias.....	74
Tabela 31 –	Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 1 – Cenário 4.....	78
Tabela 32 –	Resultados das variáveis XS (s, ca) do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 1.....	79
Tabela 33 –	Resultados das variáveis XB (i, ca) do Exemplo 1 - Cenário 4 – Segmento 1.....	79
Tabela 34 –	Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 2.....	81
Tabela 35 –	Resultados das variáveis XS (s, ca) do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 2.....	81
Tabela 36 –	Resultados das variáveis XB (i, ca) do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 2.....	82
Tabela 37 –	Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 3.....	83
Tabela 38 –	Resultados das variáveis XD (k, s) do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 3.....	83
Tabela 39 –	Resumo do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmentos 1, 2 e 3.....	84
Tabela 40 –	Reflexo nos custos da redução do prazo de execução - Exemplo 1.....	84
Tabela 41 –	Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 3.....	90
Tabela 42 –	Custos unitários do projeto para o Exemplo 3.....	91
Tabela 43 –	Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 3.....	92
Tabela 44 –	Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 3.....	92
Tabela 45 –	Resumo das variáveis XS (s, ca, t) e XB (i,ca,t) do Exemplo 3.....	94
Tabela 46 –	Orçamento de projeto para o Exemplo 3.....	95
Tabela 47 –	Orçamento otimizado do projeto para o Exemplo 3.....	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Considerações gerais.....	11
1.2	Problema de pesquisa.....	12
1.3	Questões de pesquisa.....	13
1.4	Justificativa.....	14
1.4.1	<i>Pesquisa Operacional.....</i>	<i>14</i>
1.4.2	<i>A questão das interferências nas obras rodoviárias.....</i>	<i>15</i>
1.4.3	<i>A influência das interferências no andamento das obras.....</i>	<i>18</i>
1.5	Objetivos.....	19
1.6	Estrutura da tese.....	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Abordagem proposta.....	26
3.1.1	<i>Programação Linear.....</i>	<i>26</i>
3.1.2	<i>Escopo.....</i>	<i>27</i>
3.1.3	<i>Modelagem.....</i>	<i>28</i>
3.1.4	<i>Interdependência.....</i>	<i>33</i>
3.1.5	<i>Metodologia de otimização.....</i>	<i>34</i>
3.1.6	<i>Estimativa de custos das obras e produção das equipes.....</i>	<i>34</i>
3.1.7	<i>Programação computacional.....</i>	<i>34</i>
4	ESTIMATIVA DE CUSTO DAS OBRAS.....	37
4.1	Generalidades.....	37
4.2	Estimativa dos custos unitários dos serviços.....	39
4.2.1	<i>Produção das equipes mecânicas.....</i>	<i>39</i>
4.2.2	<i>Produção horária dos equipamentos.....</i>	<i>41</i>
4.2.2.1	<i>Tempo de Ciclo.....</i>	<i>41</i>
4.2.2.2	<i>Fatores de correção.....</i>	<i>42</i>
4.2.3	<i>Custo horário dos equipamentos.....</i>	<i>44</i>
4.2.3.1	<i>Custo de Operação.....</i>	<i>44</i>
4.2.3.2	<i>Custo de Manutenção.....</i>	<i>46</i>
4.2.3.3	<i>Custo de Propriedade.....</i>	<i>48</i>

4.2.3.4	<i>Custo Horário Produtivo e Improdutivo.....</i>	50
4.2.4	<i>Composições de custos.....</i>	51
4.3	Custos da movimentação de terra.....	51
5	PROGRAMAÇÃO.....	53
5.1	Linguagens de modelagem.....	53
5.2	Programação linear.....	54
5.3	Dados externos.....	54
5.4	Pré-processamento e pós-processamento.....	55
6	RESULTADOS.....	57
6.1	Exemplo 1.....	57
6.1.1	<i>Exemplo 1 – Cenário 1.....</i>	62
6.1.2	<i>Exemplo 1 – Cenário 2.....</i>	67
6.1.3	<i>Exemplo 1 – Cenário 3.....</i>	70
6.1.4	<i>Exemplo 1 – Cenário 4.....</i>	76
6.1.4.1	<i>Segmento 1.....</i>	77
6.1.4.2	<i>Segmento 2.....</i>	80
6.1.4.3	<i>Segmento 3.....</i>	82
6.2	Exemplo 2.....	85
6.3	Exemplo 3.....	88
6.4	Performance do modelo.....	97
7	CONCLUSÃO.....	98
	REFERÊNCIAS.....	102
	APÊNDICE A - DADOS E RESULTADOS DOS EXEMPLOS 1 E 2.....	105
	APÊNDICE B - DADOS DO EXEMPLO 3.....	122
	ANEXO A - COMPOSIÇÕES DE CUSTOS – COEFICIENTES - SEINFRA-CE.....	124

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Os serviços de terraplenagem e pavimentação são os itens de maior valor na composição do custo total das obras rodoviárias e por essa razão torna-se cada vez mais importante a racionalização das suas operações no equilíbrio orçamentário (MOSELHI; HASSANEIN, 2003).

Os métodos de execução dos serviços de terraplenagem e pavimentação têm evoluído de forma acentuada. De um volume de obras onde se contava com poucas dezenas de quilômetros anuais de pavimentação passou-se a um volume de centenas de quilômetros por ano de pavimentos rodoviários executados. Deveras, é o que se pode constatar na Pesquisa CNT de rodovias – relatório gerencial (PESQUISA..., 2018), onde mostra que o crescimento da malha brasileira pavimentada de rodovias federais entre 2008 e 2018 foi de 5.100 km, o que equivale a uma média anual de 510 km.

Ao passo que o desenvolvimento científico-tecnológico tem experimentado todo esse progresso ao longo dos anos, outras questões de importância crucial têm surgido, em decorrência da própria exploração dos recursos naturais do planeta pelo ser humano. Uma delas é a questão ambiental, que faz com que as obras rodoviárias sejam submetidas a uma série de restrições relativas à exploração e manuseio de materiais com a finalidade de preservar o meio ambiente.

De fato, as obras rodoviárias, pela sua natureza e pelo seu vulto, são ávidas consumidoras de materiais pétreos, solos, asfaltos e água, interferindo no meio ambiente através de modificações no seu condicionamento ou funcionamento. Usinas de processamento de solos e asfalto precisam ter sua localização estudada com antecedência visando atender a todas as exigências ambientais.

A procura de materiais, a serem usados em camadas de base e sub-base que se adequem às especificações das normas rodoviárias vigentes no Brasil representam um grande problema para os órgãos rodoviários. Muitas vezes a falta de materiais granulares ou a sua grande distância do local de construção das vias acabam tornando inviável o seu uso (SILVEIRA; BORGES, 2016). Além disso, uma legislação ambiental mais austera quanto à concessão de licenças para a exploração de jazidas naturais são fatores motivadores para a busca e utilização de soluções alternativas (BATALIONE, 2007). Outra dificuldade é a acentuada expansão dos centros urbanos, provocando a valorização dos imóveis e inviabilizando a

extração dos materiais desses terrenos, o que obriga à pesquisa por materiais alternativos para suprir essa deficiência como também exige uma utilização criteriosa dos materiais disponíveis.

A carência de recursos do poder público, seja na esfera municipal, federal ou estadual é outra questão a ponderar. Com demandas cada vez maiores por parte da população em outras áreas, como saúde e educação, por exemplo, os recursos destinados às obras de infraestrutura nem sempre são os necessários, fazendo com que sua utilização deva ser cada vez mais racional. Daí a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão de gestores e projetistas com a finalidade de otimizar a alocação dos materiais que têm como fonte de suprimento os cortes e as jazidas e como destino os aterros e as áreas designadas para expurgos.

A redução dos custos das obras tem sido perseguida, dessa forma, pela modelagem matemática das operações, empregando-se técnicas de otimização nas obras de terraplenagem adotando-se como função objetivo as distâncias de transporte ou o custo total das obras. Os recursos da Pesquisa Operacional com os modelos em Programação Linear, Programação inteira mista ou, em alguns casos, em Programação Quadrática têm sido desenvolvidos por autores como Easa (1988b), Jayawardane e Harris (1990) e Hare, Koch e Lucet (2011).

Na fase de planejamento das obras, a movimentação dos materiais ao longo do trecho pressupõe o percurso livre de obstáculos, de forma que as alocações obtidas com os modelos existentes nem sempre são exequíveis em campo, o que torna necessária a incorporação da presença das interferências nos modelos. Além das desapropriações, cujas orientações para serem efetivadas são encontradas em Diretrizes Básicas para Desapropriações (BRASIL, 2011), as interferências mais comuns que deverão ser objeto de cadastro na fase de projeto, segundo a publicação Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários (BRASIL, 2005) são: redes elétricas, telefonia, redes de distribuição de água, redes de esgoto e de drenagem, bueiros e obstáculos similares. A remoção ou o desvio de tais obstáculos implica em considerável parcela de custos que são bastante variáveis de uma obra para outra e demanda um determinado tempo que deve ser considerado no prazo total de conclusão da obra. O autor identificou para a obra de duplicação do Anel Viário de Fortaleza, com 32 km de extensão, um valor orçado de 5,95% do total da obra para as desapropriações.

1.2 Problema de pesquisa

A prática corrente na construção rodoviária tem sugerido que o planejamento das obras e a programação das atividades são ineficientes, fato comprovado pelos atrasos dos

projetos e consequente aumento de custos em relação às estimativas orçamentárias, já que é comum os planejadores e projetistas usarem apenas a experiência e a intuição para conduzir o processo (DAEWOOD; CASTRO, 2009). Há, inclusive, uma dificuldade enfrentada por parte dos pesquisadores no desenvolvimento de modelos na área da construção rodoviária, provavelmente devido à existência de uma cultura particular em relação ao planejamento e gerenciamento nessa área. Isso é influenciado por vários fatores de risco, como por exemplo: extensão geográfica das obras, sensibilidade dos serviços de construção às condições locais (restrições à exploração dos materiais a serem movimentados, presença de água e dificuldades de acessos), condições climáticas, impactos ambientais e conflitos potenciais com outras atividades econômicas e sociais (DAEWOOD; CASTRO, 2009).

O diagrama das massas, ferramenta gráfica que representa o volume acumulado de material ao longo do traçado, apesar de suas limitações, ainda é usado com frequência na alocação dos materiais de terraplenagem. No entanto essa técnica tem limitações quando: os volumes de corte e aterro são desequilibrados havendo diversas alternativas de empréstimos e áreas para bota-foras; há a ocorrência de diversos tipos de solos nas seções de corte e aterro; a obra é feita por etapas ou então há interferências impedindo o livre transporte dos materiais (JAYAWARDANE; HARRIS, 1990).

Verifica-se, assim, a necessidade de ferramentas de apoio aos gestores permitindo o estudo e a comparação das possíveis estratégias e metodologias para a execução dos serviços, pois sem essa comparação não há evidências de que a escolha por parte dos planejadores ou projetistas corresponde à alternativa mais vantajosa.

1.3 Questões de pesquisa

A construção da plataforma de uma rodovia envolve sempre dois serviços básicos: terraplenagem e pavimentação. Enquanto o pavimento é construído com materiais oriundos de ocorrências estudadas especificamente para este fim, a terraplenagem é executada em grande parte com os materiais (solos) existentes no leito natural, através de uma compensação de cortes e aterros, além dos materiais provenientes dos empréstimos ou jazidas. Ambos os serviços compreendem escavação, carga e transporte dos materiais e a compactação dos aterros ou das camadas do pavimento. É natural que em obras desse tipo, onde estão envolvidas grandes distâncias de transporte e grande peso de material transportado, haja uma forma mais econômica de executá-las, especialmente no tocante à distribuição de materiais ao longo da rodovia.

Diante do exposto surgem as seguintes questões de pesquisa:

- 1) Qual a forma mais econômica de distribuir os materiais ao longo da obra conhecendo-se suas características geométricas, as características geotécnicas dos materiais e as soluções de projeto para o pavimento?
- 2) Qual a forma mais econômica de realizar a movimentação dos materiais ao longo da obra levando-se em conta o tipo, o posicionamento dos obstáculos e a produção das equipes mecânicas e a duração do projeto?
- 3) Como analisar o reflexo nos custos da variação dos prazos em obras de terraplenagem com interferências?

1.4 Justificativa

1.4.1 Pesquisa Operacional

A necessidade de racionalização das obras de terraplenagem e pavimentação é uma imposição para viabilizar os empreendimentos num ambiente de recursos cada vez mais escassos e esse objetivo pode ser conseguido lançando-se mão da alocação racional dos recursos existentes.

Muitos autores defendem que para se conseguir uma redução nos custos das obras, deve-se adotar estratégias de otimização. É o caso de Burdett, Kozan e Kenley (2014), Li, Liu e Lu (2015) e Yi e Lu (2016). Nas obras de terraplenagem, isso pode ser conseguido através de técnicas de Pesquisa Operacional, onde pode-se minimizar as distâncias de transporte, o tempo de execução ou o custo total da obra ao passo que os recursos da Programação Matemática são utilizados para tornar possível o desenvolvimento das ferramentas necessárias de otimização (FALCÃO; PRATA; NOBRE JÚNIOR, 2016).

A Programação Linear pode ser usada na modelagem da terraplenagem e da pavimentação. Algumas vezes o problema de terraplenagem é transformado no problema de transporte, onde as distâncias entre a origem (cortes) e o destino (aterros) são conhecidas e as variáveis de decisão são os volumes transportados. Nesse caso a função objetivo a ser minimizada é a distância total de transporte. Mas é possível também que a função objetivo seja construída para minimizar o custo total dos diversos serviços envolvidos nas operações, o que exige o conhecimento dos custos unitários de cada um deles.

Com o avanço das pesquisas foi possível incorporar cada vez mais recursos aos modelos. Um deles são os serviços de pavimentação, o que incluem a execução de reforços do subleito, sub-bases e bases, executados com os mais diversos materiais. Sendo assim torna-se possível também a escolha dos locais mais convenientes para instalar as usinas de solos, uma

vez que é comum utilizar-se a mistura de materiais para se atingir as propriedades exigidas pelas especificações (LIMA; NOBRE JÚNIOR; WEISSMANN, 2013).

Ressalte-se que os serviços de pavimentação podem atingir valores significativos em termos relativos, especialmente em obras de restauração, onde os serviços de terraplenagem são mais reduzidos. Embora sendo serviços distintos, a análise da terraplenagem e da pavimentação deve ser feita de forma conjunta, já que é possível que haja jazidas comuns aos dois serviços.

Um modelo onde são incorporadas as diversas alternativas de equipamentos é descrito em Jayawardane e Price (1994). Trata-se de um modelo em Programação Linear combinado com técnicas de simulação onde procura-se minimizar o custo total dos serviços de terraplenagem e a duração do projeto.

Os modelos existentes procuram minimizar as distâncias de transporte ou o custo total dos serviços de terraplenagem, como foi dito. A movimentação de materiais ao longo da obra com a finalidade de se atingir o greide projetado é o principal componente da matriz de custos do projeto. Mas a alocação dos materiais designados pelos diversos modelos supõe o livre movimento dos equipamentos ao longo do trecho, o que nem sempre é possível. Dessa forma a disposição de um determinado volume de material proveniente de um corte ou mesmo de uma jazida, designado pelo modelo numa certa seção em aterro, por exemplo, pode não ser possível se houver obstáculos entre as seções de corte e aterro ou mesmo se não houver acesso das jazidas a determinadas partes da obra. Daí a necessidade de se investigar a questão das interferências, conforme tratado a seguir.

1.4.2 A questão das interferências nas obras rodoviárias

Com a expansão dos centros urbanos e a crescente necessidade de ampliação das obras de infraestrutura, a execução das obras rodoviárias tem se deparado cada vez mais com interferências dos mais diversos tipos, sejam posteamentos com redes elétricas e telefonia, como instalações subterrâneas de água, esgoto, gás, drenagem ou cabeamento lógico. Apesar da importância e vulto de tais instalações, nem sempre há disponível um cadastro confiável de tais estruturas com o objetivo de guiar a elaboração dos projetos viários de forma mais consistente. Mesmo assim, não pode o projeto prescindir de tais informações sob pena de, durante a execução, o construtor se deparar com obstáculos muitas vezes de difícil remoção. Mas é o que muitas vezes acontece, não constando nos projetos as informações necessárias sobre as interferências ou constando apenas de forma superficial.

As obras rodoviárias costumam ser divididas em obras de implantação, ampliação ou restauração. Seria natural que as obras de implantação, pelo fato de estarem localizadas em regiões ainda pouco urbanizadas, estivessem menos sujeitas aos tipos de interferências citados. Mas isso nem sempre ocorre, já que há a implantação de trechos rodoviários nas proximidades das regiões metropolitanas, onde, além da presença das interferências das concessionárias de serviços públicos, há também as desapropriações. No caso das obras de ampliação (duplicações, por exemplo) ou restauração, a via já implantada se encontra urbanizada e a presença dos serviços públicos é uma constante. Há também a hipótese de, em se tratando de implantação, o projetista conseguir uma alternativa de traçado da via que evite as interferências, o que nem sempre ocorre, pois não é simples compatibilizar o traçado horizontal, o perfil longitudinal e os pontos de passagem obrigatória livrando os obstáculos.

Diante do exposto, é possível fazer uma classificação dos tipos de interferências presentes nos projetos rodoviários. A relação indicada na Tabela 1 é bastante frequente.

A coluna *discriminação* contém a relação de interferências, a coluna *tipo* diz respeito à posição da interferência em relação ao terreno, se superficial ou subterrânea, o que indicará que tipo de obra deverá ser executada para sua remoção ou desvio. A terceira coluna mostra o proprietário ou administrador, que deverá, a princípio ser envolvido no processo de negociação para se definir os custos das obras.

Tabela 1 – Interferências mais comuns nas obras rodoviárias

Discriminação	Tipo	Responsável
Redes de energia de baixa, média e alta tensão	Superficial/Subterrânea	Concessionária
Redes de Telefonia	Superficial/Subterrânea	Concessionária
Redes de dados	Superficial/Subterrânea	Concessionária
Aduadoras	Superficial/Subterrânea	Concessionária
Redes de distribuição de água	Subterrânea	Concessionária/Empresa pública
Redes de esgoto	Subterrânea	Concessionária/Empresa pública
Redes de drenagem/obras de arte corrente	Subterrânea	Prefeituras/Estados/União
Redes de abastecimento de gás natural	Subterrânea	Estados
Desapropriações	Superficial	Prefeituras/Estados/União
Cursos d'água	-	-
Camadas de materiais inservíveis	-	-

Fonte: elaborada pelo autor.

Deve então o projetista obter as informações disponíveis sobre as interferências existentes na região. Para tanto, deve-se recorrer aos órgãos e concessionárias responsáveis pelas informações, tais como companhias de saneamento e abastecimento, empresas privadas ou mesmo prefeituras locais, que mantêm cadastros. Com base em tais documentos deve-se elaborar o cadastro unificado de interferências. As informações obtidas pela consulta aos dados e plantas de cadastros prévios devem ser averiguadas em campo e atualizadas por correções e modificações. Informações não abordadas em quaisquer das fontes disponíveis devem ser obtidas em campo.

Outro caso de interferência que deve ser considerado são as desapropriações. Às vezes as faixas de domínio das rodovias existentes não são suficientes para implantar uma nova pista, no caso das duplicações ou alargamentos, por exemplo. Nesses casos faz-se necessário desapropriar parte dos imóveis de um lado ou de outro ao longo do traçado. Quando o traçado antigo é alterado, o eixo projetado em alguns pontos corta as propriedades transversalmente e muitas vezes o movimento de materiais e equipamentos é impedido através desses locais até que a desapropriação seja realmente efetivada.

Nem sempre as obras iniciam com os imóveis já desapropriados e o trecho completamente livre. O mais comum é que o andamento das obras ocorra paralelamente às desapropriações. Isso por questões de segurança, já que os imóveis desapropriados ficariam desocupados até o início das obras ou mesmo por questões operacionais, pois com as equipes em campo, as demolições dos imóveis já podem ser executadas, abrindo-se frentes de serviço e ganhando-se tempo.

Diretrizes para a elaboração dos projetos de desapropriação podem ser encontradas na publicação Diretrizes Básicas para Desapropriação (BRASIL, 2011), onde consta que o projeto de desapropriação deve conter a avaliação das propriedades atingidas pela obra objetivando uma estimativa das indenizações com a finalidade de declarar os imóveis de utilidade pública. Quando for o caso de desapropriações constituírem obstáculos na execução dos serviços, o tempo necessário para conclusão do processo administrativo deverá ser conhecido.

Os modelos desenvolvidos até aqui têm abordado essa a questão de alocação dos materiais do ponto de vista geométrico/estático, como em Mayer e Stark (1981), Easa (1988a) ou Jayawardane e Harris (1990), significando que as variáveis de decisão são volumes a serem alocados nos aterros provenientes dos cortes ou das jazidas, no caso da terraplenagem, ou então a designação de volumes de materiais provenientes das jazidas ou das usinas, no caso da pavimentação, com o auxílio de variáveis binárias, como em Lima, Nobre Júnior e Weissmann

(2013). A otimização do modelo é então conseguida através da minimização de uma função objetivo que pode ser a distância total percorrida ou o custo total dos serviços. As restrições do modelo referem-se às compensações entre cortes e aterros para se atingir o greide de projeto e às quantidades supridas pelas jazidas, tanto para terraplenagem como para pavimentação. Naturalmente esses volumes disponíveis deverão ser maiores que os necessários, sob pena de tornar o modelo matematicamente inviável (*infeasible*).

Os modelos existentes podem não traduzir a verdadeira situação em campo no caso de existência de obstáculos, já que os resultados encontrados para as variáveis de decisão podem ser inexequíveis, devido a situações não previstas nos modelos (HARE; KOCH; LUCET, 2011). Há também a possibilidade de, a partir do conhecimento dos obstáculos, subdividir-se os trechos em segmentos menores, sem obstáculos. No entanto, isso leva a uma imprecisão, pois impede a movimentação entre as seções bloqueadas, o que na prática não é verdadeiro, já que no decorrer da obra o obstáculo pode ser removido e a movimentação entre as referidas seções se torna viável, o que pode levar a uma solução de menor custo, tornando necessária a incorporação aos modelos das interferências existentes nas obras.

Não há, assim, na maioria das abordagens, nenhuma referência à dinâmica da execução dos serviços ou mesmo à sequência em que estes são executados. Dada a complexidade dos serviços no campo não é difícil ver que os resultados de grande parte dos modelos podem não ser efetivamente implantados em decorrência da presença dos obstáculos.

1.4.3 A influência das interferências no andamento das obras

Como obstáculos mais comuns que podem interferir nas operações de terraplenagem e pavimentação estão os cursos d'água, grupos de árvores, camadas de materiais inservíveis que precisam ser removidas, extensos cortes em rocha, desapropriações, redes de energia, telefonia ou similares, redes de abastecimento d'água, esgoto ou drenagem, grandes depressões e cortes muito acidentados. Alguns desses obstáculos podem ser removidos à proporção que os serviços são executados, como grandes depressões ou cortes acidentados, já que fazem parte da movimentação de terra até ser atingido o greide. Já os outros obstáculos citados independem da movimentação de terra e sua remoção depende de fatores externos à obra.

Cabe esclarecer que os obstáculos, para assim serem considerados, precisam impedir a livre movimentação dos equipamentos, de forma a não permitir o transporte de material entre eles ao longo da via. Os obstáculos são geralmente peculiares a cada obra como

as interferências do tráfego, por exemplo. Há também os casos em que a operação dos equipamentos é limitada em razão da topografia da obra. É o caso dos trechos em serra, em que geralmente há falta de espaço para a movimentação das máquinas e dificuldades de acesso às jazidas. Isso sem se falar nas peculiaridades construtivas desse tipo de obra, onde muitas vezes há a necessidade de custosos serviços de contenção de aterros, cortes em rocha e a movimentação dos equipamentos em terrenos íngremes e acidentados.

Outra situação possível é a obstrução dos serviços de terraplenagem ou pavimentação em decorrência dos demais serviços da própria obra, como os serviços de drenagem, por exemplo. Em obras de drenagem urbana é comum a execução de grandes redes coletoras de águas pluviais localizadas no eixo das rodovias interligadas por tubulações transversais oriundas dos dispositivos de captação. Tais interferências podem impedir a movimentação de materiais por longos segmentos, devendo-se considerar esse aspecto nas restrições dos modelos implementados.

Em determinadas situações há também os obstáculos inerentes ao próprio serviço de terraplenagem, que são os solos brejosos ou turfosos. Esse material é encontrado principalmente nos fundos de vale, transportados pelos agentes atmosféricos, em especial as águas pluviais e os cursos d'água. São constituídos por solos finos (argila e silte), com elevada percentagem de matéria orgânica e altos teores de umidade, pois em geral se situam abaixo do nível do lençol freático. Trata-se de material de baixa capacidade de suporte e de alta compressibilidade, totalmente impróprio para utilização em aterros ou fundações de obras de terra. Assim, quando encontrados, esses solos precisam ser removidos, numa operação em geral lenta, dificultando a circulação dos equipamentos, mesmo em esteiras.

A presença de solos moles deve ser indicada e quantificada em projeto, permitindo a sua inclusão nos modelos de otimização. Devido à complexidade dos serviços, esses segmentos impedem a livre movimentação dos equipamentos e são mais um tipo de obstáculo a ser considerado.

1.5 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar como as interferências externas ou inerentes às obras rodoviárias afetam a execução dos serviços e o seu prazo de execução e se as operações de terraplenagem e pavimentação podem ser abordadas de forma racional, lançando-se mão dos recursos da Programação Matemática.

São objetivos específicos deste trabalho:

- a) desenvolver um modelo matemático que relacione os dados geométricos e geotécnicos de uma obra de terraplenagem e pavimentação com a forma de distribuição dos materiais levando-se em conta as interferências existentes na obra e encontrar a solução ótima, visando um custo mínimo de execução;
- b) mostrar a aplicação dos recursos do modelo através de exemplos hipotéticos e de estudos de casos da prática, determinando-se o custo mínimo total dos serviços;
- c) Realizar a análise de sensibilidade dos diversos cenários dos exemplos mostrando o inter-relacionamento entre as diversas variáveis do modelo, como volumes movimentados, duração da obra, produtividade e custos;
- d) Comparar os resultados do modelo com os de um projeto real.

1.6 Estrutura da tese

Esta tese é formada por sete capítulos estruturados com as denominações a seguir:

- a) CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO
- b) CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA
- c) CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA
- d) CAPÍTULO 4 – ESTIMATIVA DE CUSTO DAS OBRAS
- e) CAPÍTULO 5 – PROGRAMAÇÃO
- f) CAPÍTULO 6 – RESULTADOS
- g) CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

No Capítulo 1 são feitas as considerações gerais a respeito do tema do trabalho destacando a importância dos serviços de terraplenagem e pavimentação nas obras rodoviárias e ressaltada a necessidade da racionalização desses serviços a partir de técnicas de otimização com a finalidade de redução dos custos das obras. Além disso são apresentados o problema e as questões de pesquisa, a justificativa do trabalho e os objetivos.

São apresentados no Capítulo 2 os trabalhos mais relevantes acerca do tema, como a Pesquisa Operacional aplicada à Engenharia Rodoviária e os diversos tipos de abordagens com a finalidade de otimizar a movimentação de terras. Ao final é apresentado o estado da arte, bem como um resumo dos trabalhos com a evolução das diversas técnicas de otimização destacando-se os tipos de algoritmos e o objetivo dos modelos.

No Capítulo 3 é desenvolvido o modelo matemático de otimização das operações de terraplenagem com interferências, onde consta o escopo do modelo, o uso da programação linear como técnica de otimização, um protocolo para se obter os dados necessários para a resolução dos modelos e o desenvolvimento dos códigos de programação.

A formação da composição de custos dos diversos serviços envolvidos nas operações de terraplenagem e pavimentação é abordada no Capítulo 4. São tratadas aqui a produção horária das equipes mecânicas e a formação dos custos unitários dos serviços que vão compor a função objetivo do modelo em Programação Linear.

O Capítulo 5 apresenta as características do software utilizado para a resolução dos modelos e a técnica de programação adotada. São tratadas as linguagens de modelagem e os recursos de pré-processamento e pós processamento dos dados.

São analisados no Capítulo 6 os resultados obtidos através de exemplos hipotéticos, onde são feitas análises de sensibilidade do comportamento dos custos em relação aos prazos das obras e da quantidade de interferências. Ao final é realizada uma aplicação prática relativa a um caso real.

No Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões da pesquisa e as sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O modelo de Programação Linear, que foi primeiramente sugerido por Stark e Nicholls (1972), e depois desenvolvido por Mayer e Stark (1981), Nandgaonkar (1981), Easa (1987, 1988b), Jayawardane e Price (1994) e Lima e Nobre Júnior (2000) pode ser aplicado para superar algumas limitações do diagrama de massas. Esses modelos deram início à aplicação da Pesquisa Operacional à Engenharia Rodoviária, surgindo assim como uma alternativa para otimizar soluções e reduzindo custos. O modelo desenvolvido por Mayer e Stark (1981) incorpora detalhes como fatores de aterro, alocação de materiais de jazidas, materiais com diferentes graus de compactação e em diferentes camadas. Posteriormente, Easa (1987) incluiu no modelo custos unitários variáveis e Lima (2003) apresentou um modelo incorporando a mistura de materiais.

Conforme exposto anteriormente, vários autores têm abordado a questão de alocação de materiais sob o aspecto logístico. A logística da movimentação de terras ou *Earthmoving Logistics*, termo usado pela primeira vez por Mayer e Stark (1981) é uma aplicação dos princípios gerais da Logística ao caso particular dos serviços de terraplenagem e pavimentação rodoviária.

O modelo de Mayer e Stark (1981) otimiza os custos de terraplenagem através do modelo de Programação Linear com o uso de variáveis contínuas. Os autores não fazem distinção entre pavimentação e terraplenagem, havendo sempre a necessidade, em cada problema, da introdução de várias restrições adicionais.

O modelo de Easa (1987) incorporou ao de Mayer e Stark (1981) custos unitários variáveis com o volume de movimentação de terra, enquanto a possibilidade de levar em conta no modelo as operações dos equipamentos e a duração da obra foi introduzida por Jayawardane e Price (1994), num modelo bastante extenso.

A utilização de misturas de materiais usinados tem sido uma solução utilizada com frequência em obras de pavimentação rodoviária, seja devido à escassez cada vez maior de materiais que se enquadrem nas especificações, ou então pelo fato de ser uma alternativa economicamente mais vantajosa. O modelo desenvolvido por Lima e Nobre Júnior (2000) admite o uso de misturas de materiais na hipótese de que as jazidas que as compõem são previamente conhecidas assim como as proporções entre elas.

Conforme Lima (2003), a alocação racional dos recursos necessários à execução desses serviços pode reduzir significativamente os custos das obras. É necessário que se saiba a quantidade e o destino dos materiais provenientes das diversas seções em corte como também

a correta disposição dos materiais originários dos empréstimos e das jazidas utilizadas em pavimentação. O objetivo do modelo desenvolvido pelo autor é alocar os materiais de terraplenagem e pavimentação ao longo do trecho de forma a obter o menor custo, respeitando-se, naturalmente, as restrições inerentes a cada problema em particular.

Nos últimos anos as pesquisas na área têm avançado substancialmente, a ponto de surgirem trabalhos baseados não somente na Programação Linear, mas em modelos que exigem outros tipos de algoritmos. Veja-se, por exemplo, o trabalho de Kataria, Samdani e Singh (2005), onde é tratado o problema de lançamento do greide de uma rodovia. Há inúmeros greides viáveis atendendo a certas prescrições das normas e às diretrizes do projeto. Há também uma gama de possibilidades de se efetuar a movimentação de terra de modo a satisfazer essa conformação da superfície da rodovia. Esses dois estágios da obra, em geral, têm sido tratados separadamente na literatura. No citado trabalho é proposto um modelo onde os dois problemas são tratados de forma unificada através de recursos metaheurísticos, como o algoritmo de Otimização da Colônia de Formigas (ACO, de Ant Colony Optimization), que é baseado em probabilidade e que envolve a procura de caminhos em grafos. Esse problema, excepcionalmente, havia sido abordado por Easa (1988a), valendo-se dos recursos da Programação Linear para otimizar a movimentação de terra de uma obra juntamente com o lançamento do greide. Tal problema também foi estudado por Moreb (1996).

Ji *et al.* (2010) analisaram o problema da terraplenagem na situação em que o trecho é subdividido em segmentos que são entregues a diferentes empresas para execução. Trata-se de encontrar a segmentação do trecho com a menor movimentação de terra entre as subdivisões, pois supõe-se que não haja cooperação entre as empresas e dessa forma evitam-se segmentos com excesso de cortes e outros com excessos de aterros, economizando-se nos bota-foras ou importação de material.

Burdett, Kozan e Kenley (2014) desenvolveram um modelo para alocação de materiais de terraplenagem em Programação Linear usando como função objetivo a minimização do consumo de combustível dos equipamentos. Sustenta o autor que a métrica do consumo de combustível traduz melhor o custo de execução dos serviços do que as distâncias de transporte porque absorvem as irregularidades e as rampas dos caminhos de serviço. Além disso o impacto ambiental das atividades de construção tornou-se um importante fator nos últimos anos, havendo, dessa forma, a necessidade de se quantificar a emissão de poluentes, sendo o consumo de combustível a métrica ideal para essa finalidade. Seguindo nessa mesma linha, há o trabalho de Jassim, Krantz, Lu e Olofsson (2019), modelo destinado ao planejamento das operações de terraplenagem levando em conta a redução da emissão de CO₂ com a

finalidade de maximizar a mitigação dos impactos ambientais. De forma semelhante, Parente, Correia e Cortez (2016) desenvolveram um sistema integrado onde a otimização das operações de terraplenagem é realizada minimizando-se as emissões de carbono, os custos de execução e o prazo da obra. Para tanto os autores lançaram mão de algoritmos genéticos, sistemas de informações geográficas, mineração de dados e Programação Linear.

Numa outra abordagem, Yi e Lu (2016) verificaram a importância dos caminhos de serviço (temporary haul roads) na eficiência dos serviços de terraplenagem. De fato, destacam os autores, os caminhos de serviço têm sido executados nas obras de forma improvisada e a cargo dos gerentes ou operadores dos equipamentos. Cabe destacar que, até então, os caminhos de serviço não tinham sido estudados como problema de otimização em engenharia.

Dirigido para o gerenciamento de projetos, o trabalho de Li, D. e Lu, M. (2016) tem como objetivo a geração de um plano de divisão e sequenciamento de tarefas para se obter um custo mínimo das operações de terraplenagem.

A alocação dos materiais, que pode ser programada pelos modelos citados, ou mesmo definida pelo diagrama de massas, pode ter como empecilho as diversas interferências ao longo do trecho. Conforme abordado anteriormente, são os obstáculos de natureza física ou operacional que precisam ser incorporados aos modelos de forma a viabilizar a solução para a movimentação de terra.

Para englobar a questão das citadas interferências, Hare, Koch e Lucet (2011) abordaram o problema através de um modelo em Programação Inteira Mista, que procura também minimizar os custos de execução dos serviços de terraplenagem. Assim como a maioria dos modelos, a abordagem de Hare, Koch e Lucet (2011) parte do princípio de que o traçado da rodovia esteja definido, assim como o alinhamento vertical (greide). Expande-se, assim, o modelo tradicional em Programação Linear de forma a incluir um certo número de intervalos de tempo igual ao número de interferências. No início de cada intervalo de tempo pelo menos uma interferência é removida, de modo que no início do último intervalo todas as interferências terão sido removidas e ao final do último intervalo a terraplenagem estará concluída.

Uma abordagem baseada em grafos e redes de fluxo é feita por Li, Liu e Lu (2015) através de uma análise de problemas em duas dimensões. Ali são levados em conta os obstáculos onde é adotada a terminologia de “*Hard Blocks*” para os obstáculos que são conhecidos de antemão e que independem da movimentação de terra e “*Soft Blocks*”, para os obstáculos que dependem da solução de movimentação de terras e que vão sendo alterados no decorrer da obra. No presente trabalho, em comparação a Hare, Koch e Lucet (2011), foram incorporados o prazo para a execução da obra, o tempo necessário para remoção dos bloqueios

e a produtividade dos equipamentos, variáveis que estão intrinsicamente ligadas ao problema das operações de terraplenagem com interferências, procurando-se, assim, preencher a lacuna existente no estado da arte. Assim, com essa nova abordagem, pode-se resolver o problema da otimização das operações de terraplenagem com interferências voltada para o planejamento das obras sem a necessidade do uso de Metaheurísticas, como em outras abordagens, o que se reflete na performance computacional.

Em Falcão, Prata e Nobre Júnior (2016) há um resumo com os trabalhos de otimização da movimentação de terras classificados por técnicas de otimização e objetivos dos modelos. Os trabalhos que apresentam como função objetivo a minimização dos custos utilizando a técnica de Programação Linear ou Programação Inteira Mista segundo o referido trabalho são, em ordem cronológica: Kantorovitch (1958), Mayer e Stark (1981), Nandgaonkar (1981), Easa (1987), Christian e Caldera (1988), Jayawardane e Harris (1990), Reda (1990), Jayawardane e Price (1994), Huang e Halpin (1995), Hare, Koch e Lucet (2011), Lima, Nobre Júnior e Weissmann (2013).

3 METODOLOGIA

3.1 Abordagem proposta

3.1.1 Programação Linear

Conforme foi visto no capítulo 2, a Programação Inteira Mista e a Programação Linear têm sido largamente usadas na modelagem da movimentação dos volumes de terraplenagem como uma extensão do clássico problema do transporte. Em geral, as seções em corte e os empréstimos ou jazidas são considerados como fontes de material, enquanto as seções em aterro e as áreas para bota-foras são considerados o seu destino. O presente modelo também será desenvolvido com essa técnica, tendo como função objetivo o custo total dos serviços de terraplenagem e pavimentação.

A Programação Linear visa encontrar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares (EHLICH, 1991) e consiste na maximização ou minimização de uma função linear denominada *função objetivo*, respeitando-se um conjunto de inequações, também lineares, denominadas *restrições*. As restrições representam limitações de recursos disponíveis ou condições inerentes a cada problema em particular e delimitam uma região denominada *conjunto das soluções viáveis*. A solução viável que maximiza ou minimiza a função objetivo é denominada *solução ótima*, cuja determinação é o objetivo da Programação Linear.

O modelo de Programação Linear na sua forma padrão é:

Minimizar ou maximizar

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \dots\dots\dots(1)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots\dots\dots a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots\dots\dots a_{2n}x_n &= b_2 \end{aligned}$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots\dots\dots a_{mn}x_n = b_m \dots\dots\dots(2)$$

Ou então, utilizando-se a notação matricial:

Minimizar ou maximizar

$$Z = c^T \cdot X \dots\dots\dots(3)$$

Sujeito a

$$A \cdot X = b \dots\dots\dots(4)$$

sendo:

A : matriz $m \times n$, constituída por todos os elementos a_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$ e $j = 1, 2, \dots, n$;

b : vetor $m \times 1$, constituído por todos os elementos b_i , $i = 1, 2, \dots, m$;

c : vetor $n \times 1$, constituído por todos os elementos c_i , $i = 1, 2, \dots, n$;

X : vetor $n \times 1$, constituído por todos os elementos x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, com $X \geq 0$.

No caso do modelo de distribuição de materiais com interferências, o vetor c corresponde aos custos unitários de escavação carga, transporte, homogeneização e compactação dos materiais provenientes dos cortes, empréstimos e jazidas. O vetor X corresponde às variáveis de decisão, que são os volumes a serem alocados nas respectivas posições e num determinado intervalo de tempo a partir do início da obra. A matriz A e o vetor b são constituintes do conjunto de equações/inequações que formam as restrições de limitação da quantidade de material, de obediência ao greide projetado e de limitação das movimentações em razão dos bloqueios. Essa modelagem será detalhada no item 3.1.3.

3.1.2 Escopo

Na abordagem proposta do modelo com interferências, faz-se necessário algumas considerações, listadas a seguir:

- a) o modelo em programação matemática deve minimizar o custo total da movimentação de terras;
- b) supõem-se conhecidos o projeto geométrico da via com a definição do greide e o projeto de pavimentação com as espessuras da base, sub-base, reforço do subleito e as jazidas de materiais apropriados disponíveis;
- c) supõe-se conhecidos os empréstimos disponíveis para terraplenagem;
- d) deve-se conhecer de antemão os custos unitários dos serviços envolvidos e as taxas de produção;
- e) deve-se estabelecer restrições em relação à duração da obra;
- f) algumas movimentações entre cortes e aterros estão bloqueadas e são conhecidos os tempos de liberação dos bloqueios e suas posições ao longo da obra;

- g) o modelo precisa ter um desempenho computacional satisfatório, evitando-se algoritmos complexos que resultem em soluções quase ótimas.

Nessa abordagem as interferências consideradas são cursos d'água, grupos de árvores, camadas de rochas ou outra característica topográfica que necessite ser removida para permitir o livre trânsito dos equipamentos. Imóveis a serem desapropriados, redes de transmissão de energia e obras de drenagem são também obstáculos frequentes em obras rodoviárias. O modelo proposto incorpora ao modelo de alocação de materiais em Programação Linear, as interferências e o tempo que elas levam para serem removidas. Além disso são considerados também as restrições relativas ao prazo para conclusão das obras e ao nível de produção dos equipamentos. Dessa forma é possível construir um cronograma de ataque dos serviços que minimize o custo da obra atendendo-se a um prazo preestabelecido.

3.1.3 Modelagem

Para a construção do modelo supõe-se que S é o conjunto de todas as seções em corte, CA o conjunto de todas as seções em aterro, conforme Figura 1, J o conjunto de todas as jazidas, K o conjunto de todas as áreas para bota-foras e W o conjunto de intervalos de tempo para liberação da movimentação dos equipamentos, considerando-se que os bloqueios são removidos sequencialmente a partir do intervalo 1 (condição inicial). Supõe-se assim que todas as seções em corte $s \in S$ e todas as seções em aterro $ca \in CA$ para cada intervalo t , onde $t \in W$ tem um bloqueio removido para $t > 1$. Dessa forma um novo conjunto C foi criado para representar as movimentações bloqueadas entre cortes e aterros (Equação 5).

$$\text{Seja } C = \{(s, ca) | s \text{ e } ca \text{ estão em lados opostos a } b\} \dots\dots\dots(5)$$

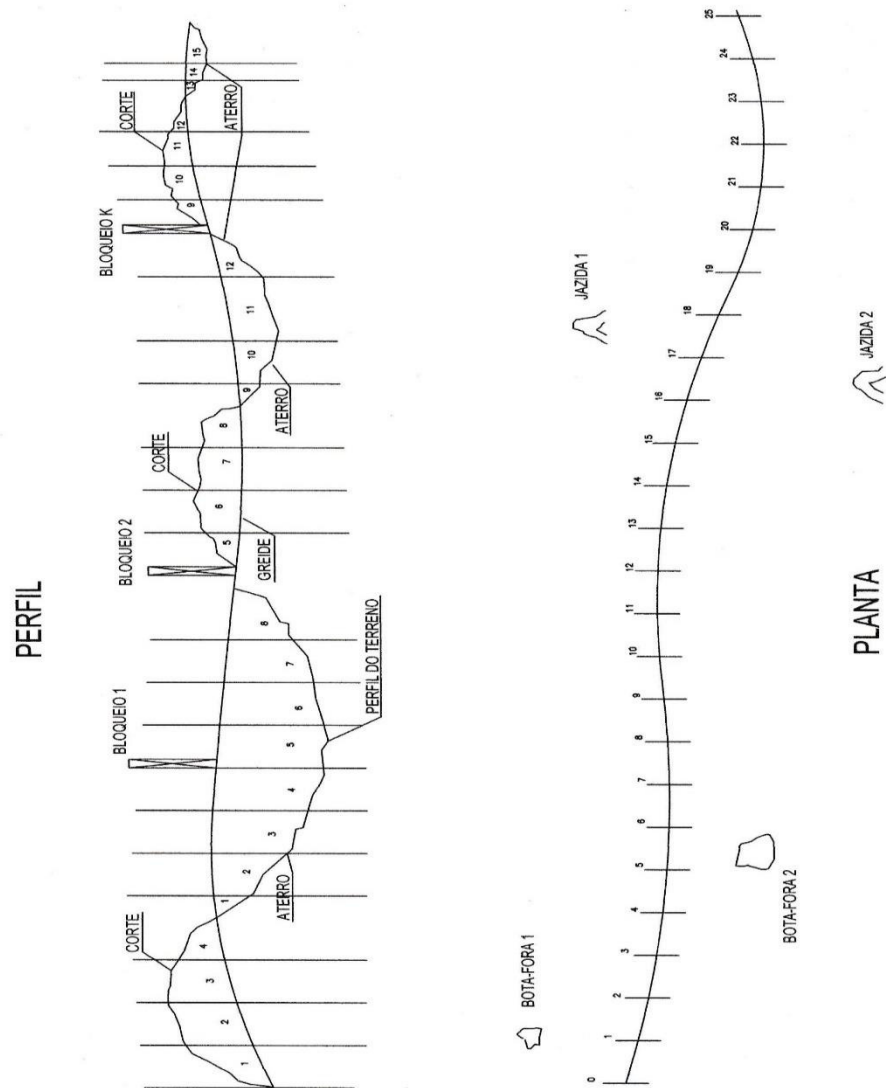
Dois vetores ($T(t)$ e $TK(b)$), foram criados para representar, respectivamente, o tempo corrente da construção e o tempo de liberação do bloqueio b a contar do início da obra. Quando $T(t)=TK(b)$, o bloqueio b é liberado.

$$\text{Sendo assim, para cada bloqueio } b, \text{ para } (s, ca) \in C \text{ e } T(t) < TK(b): XS(s,ca,t)=0 \dots\dots\dots(6)$$

onde XS (volume "in situ" em m^3) é a variável de decisão que corresponde ao volume de material proveniente da seção s e alocado na seção em aterro ca no intervalo de tempo t , sendo igual a zero porque nessa condição o bloqueio ainda não foi liberado.

Da mesma forma, para cada bloqueio b , seja $ca \in CA$ e $i \in J$, onde i é a jazida cujo acesso está em lado oposto a ca .

Figura 1 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos segmentos e indicação dos bloqueios de uma construção rodoviária típica.



Fonte: elaborada pelo autor.

Seja $CJ = \{(i, ca) \mid \text{o acesso da jazida } i \text{ e } ca \text{ estão em lados opostos a } b\}$(7)

Sendo assim, para $(i, ca) \in CJ$ e $T(t) < TK(b)$,

$XB(i, ca, t) = 0$(8)

onde XB (volume “in situ” em m^3) é a variável de decisão que corresponde ao volume de material proveniente da jazida i e alocado na seção em aterro ca no intervalo de tempo t .

Supõe-se, além disso, que o excesso de material oriundo dos cortes, bem como o material de má qualidade, inapropriado para uso nos aterros, seja expurgado em áreas previamente estudadas para esse fim. Assim, o modelo inclui o conjunto de áreas para bota-foras $k \in K$ cujo acesso se encontra em lado oposto à seção em corte s .

Seja $CK = \{(k, s) | \text{o acesso da área de bota – foras } k \text{ e } s \text{ estão em lados opostos ao bloqueio } b\}$(9)

Portanto, para $(k, s) \in CK$ e $T(t) < TK(b)$, $XD(k, s, t) = 0$(10)

onde XD (volume “in situ” em m^3) é a variável de decisão que corresponde ao volume de expurgo proveniente da seção s e alocado na área de bota-foras k no intervalo de tempo t .

Após formular as restrições relativas aos bloqueios, equações 5 a 10, considerou-se um novo conjunto WT que incorporou os intervalos nos quais o tempo de operação ($T(t)$) corresponde ao tempo de remoção do bloqueio ($TK(b)$):

Considerando

$$WT = \{t | T(t) = TK(b)\} \quad (11)$$

Para cada bloqueio b seja $s \in S$ e $ca \in CA$ e $t \in WT$,

$$\sum_{s \in S} \sum_{ca \in CA} \sum_{t \in WT} XS(s, ca, t) \left(\frac{1}{PS} \right) + TK(b) \leq D \quad (12)$$

onde PS é a produção dos equipamentos em m^3 /dia, ao se transportar o material dos cortes para os aterros, D a duração da obra em dias e $TK(b)$ o tempo para liberação dos bloqueios, em dias.

As interferências ou bloqueios são representadas pelo subscrito "b". Elas têm como propriedades a posição dentro do trecho, o que permite formar os conjuntos C , CJ e CK e o tempo de liberação $TK(b)$. As variáveis de decisão são XS , XD e XB , que representam volumes movimentados. O subscrito t indica "quando" determinado volume é movimentado em relação ao início da obra.

Da mesma forma, com $ca \in CA$ e $i \in J$.

$$\sum_{i \in J} \sum_{ca \in CA} \sum_{t \in WT} XB(i, ca, t) \left(\frac{1}{PB} \right) + TK(b) \leq D \quad (13)$$

sendo PB a produção dos equipamentos em m^3/dia , ao se transportar o material das jazidas para os aterros. E, com $s \in S$ e $k \in K$.

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{t \in WT} XD(k, s, t) \left(\frac{1}{PD} \right) + TK(b) \leq D \quad (14)$$

onde PD é a produção dos equipamentos em m^3/dia , ao se transportar o material dos cortes para os bota-foras. Foi considerado também que as operações relativas a PS, PB e PD ocorrem em paralelo. As restrições (12), (13) e (14), asseguram, portanto, que o prazo D , da obra, será cumprido.

A função objetivo Z a ser minimizada, mostrada a seguir, representa o custo total dos serviços de terraplenagem como escavação, carga, transporte, descarga, espalhamento e compactação, levando-se em conta as interferências.

$$\begin{aligned} Z = & \sum_{s \in S} \sum_{ca \in CA} \sum_{t \in WT} CS(s, ca)XS(s, ca, t) + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in WT} CD(k, s)XD(k, s, t) \\ & + \sum_{i \in J} \sum_{ca \in CA} \sum_{t \in WT} CB(i, ca)XB(i, ca, t) \end{aligned} \quad (15)$$

A função Z é sujeita às restrições a seguir. Para cada seção em corte s :

$$\sum_{ca \in CA} \sum_{t \in WT} XS(s, ca, t) + \sum_{k \in K} \sum_{t \in WT} XD(k, s, t) = VC(s) \quad (16)$$

Para cada jazida i :

$$\sum_{ca \in CA} \sum_{t \in WT} XB(i, ca, t) \leq VOL(i) \quad (17)$$

Para cada camada de aterro ca :

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in WT} XS(s, ca, t)FS(s, ca) + \sum_{i \in J} \sum_{t \in WT} XB(i, ca, t)FI(i, ca) = VA(ca) \quad (18)$$

Para cada área reservada para bota-foras k :

$$\sum_{s \in S} \sum_{t \in W} XD(k, s, t)FKC(k, s) \leq VBF(k) \quad (19)$$

As variáveis do modelo em Programação Linear têm assim o seguinte significado:

Z – Função objetivo a ser minimizada e que representa o custo total dos serviços de movimentação de terra.

$XS(s, ca, t)$ - Volume de material a ser removido da seção em corte s e transportado para a seção em aterro ca , no intervalo de tempo t , em m^3 (volume do corte “in situ”).

$XD(k, s, t)$ - Volume de material expurgado da seção em corte s e disposto na área reservada para bota-fora k , no intervalo de tempo t , em m^3 (volume do corte “in situ”).

$XB(i, ca, t)$ - Volume de material a ser removido da jazida i e transportado para a seção em aterro ca , no intervalo de tempo t em m^3 (volume da jazida “in situ”).

$CS(s, ca)$ - Custo unitário total para executar uma seção em aterro ca com material proveniente da seção em corte s , em $R\$/m^3$ (volume do corte “in situ”).

$CD(k, s)$ - Custo unitário total para dispor o material proveniente do corte s na área reservada para bota-fora k , em $R\$/m^3$ (volume do corte “in situ”).

$CB(i, ca)$ - Custo unitário total para executar a seção em aterro ca com material proveniente da jazida i , em $R\$/m^3$ (volume da jazida “in situ”).

Aqui as variáveis de custo CS , CD e CB são consideradas independentes dos intervalos de tempo t e são o resultado da soma das parcelas de escavação, carga, transporte, descarga, espalhamento, umidificação, homogeneização, e compactação de forma a deixar as seções no greide de projeto.

$VC(s)$ - Volume da seção em corte s , em m^3 .

$VOL(i)$ - Volume da jazida i , em m^3 .

$VA(ca)$ - Volume da seção em aterro ca , em m^3 .

$VBF(k)$ - Volume da área reservada para bota-fora k , em m^3 .

$FS(s, ca)$ - Fator de contração do material do corte s em relação à seção em aterro ca .

$FI(i, ca)$ - Fator de contração do material da jazida i em relação à seção em aterro ca .

$FKC(k, s)$ - Fator de expansão do material do corte s em relação ao volume disposto na área de bota-foras k .

O modelo exposto otimiza a movimentação de terras de forma a dar ao terreno a conformação estabelecida em projeto. O modelo considera a existência de k bloqueios, localizados ao longo da obra e de posições conhecidas. Supõem-se conhecidos também o tempo para liberação desses bloqueios, que decorre da natureza da interferência, sendo necessário para

se realizar o planejamento da obra. Dessa forma, para a formulação do modelo foi necessária a subdivisão do trecho em intervalos de tempo t , dependentes dos tempos de liberação de cada bloqueio. Além disso, é necessário que se estabeleça mais algumas restrições ao modelo, que são as que impõem que a plataforma da via coincida com o greide de projeto após a movimentação de terras, que haja suficiente material nas jazidas a fim de suprir o que não foi coberto pela movimentação dos cortes para os aterros e, por fim, deve-se atender às restrições de limitação das áreas para receber os expurgos (bota-foras).

É possível incluir no modelo também as camadas de pavimentação, desde que se conheça o dimensionamento do pavimento (geometria) e a definição das jazidas apropriadas para cada camada do pavimento. Nesse caso algumas restrições adicionais precisam ser acrescentadas ao modelo em cada situação específica. As restrições dizem respeito à necessidade de impedir a alocação de materiais em locais indevidos. Se uma determinada jazida, J_1 , por exemplo, for especificada para sub-base e os segmentos ca , variando de 1 a 10, são camadas de base, deve-se impor $XB(1, ca, t) = 0$, para $ca = 1, 2, \dots, 10$. Então, para cada caso em particular deve-se zerar as variáveis que alocam materiais em posições inapropriadas.

Com a introdução dos bloqueios com seus tempos de liberação, o problema de movimentação de materiais ganha uma conotação dinâmica, pois além de se determinar a quantidade de material da cada corte ou jazida para cada aterro ou área de bota-foras, tem-se a determinação de *quando* fazê-lo, já que a presença das interferências impede a livre movimentação dos materiais e, desse modo, será possível estabelecer um cronograma de execução dos serviços em função dos tempos de liberação dos bloqueios, da velocidade de ataque dos serviços e do prazo de conclusão da obra.

3.1.4 Interdependência

A interdependência entre as atividades necessárias para a execução dos serviços de terraplenagem e pavimentação é um fator que pode levar à inviabilidade de algumas das soluções apresentadas pelos diversos modelos de otimização. As diversas atividades são consideradas independentes umas das outras na modelagem, mas isso nem sempre ocorre. Há casos em que a movimentação de um ponto a outro depende da execução de uma atividade precedente. Como o modelo aqui apresentado não incorpora essa peculiaridade, em alguns casos é necessário a análise dos resultados quando houver essa possibilidade. Mas é possível contornar essa dificuldade pela introdução de restrições adicionais, impedindo a alocação dos

materiais em determinadas posições. Dessa forma faz-se necessário verificar a viabilidade operacional da solução.

3.1.5 Metodologia de otimização

Antes de utilizar o modelo proposto (Equações (5) a (19)), um protocolo de cinco itens foi elaborado para se obter os dados necessários para entrada no modelo. Primeiro, os volumes e as características geotécnicas de cada seção são obtidos a partir do projeto geométrico e dos levantamentos de campo. Segundo, o posicionamento das interferências e os respectivos tempos de liberação são determinados a partir de consultas ao proprietário da obra ou ao projeto rodoviário. Os terceiro e quarto passos são relacionados com os custos unitários e com as taxas de produção dos equipamentos, em função das características geotécnicas dos materiais e das distâncias de transporte, determinando-se, assim, seu desempenho quanto às operações de escavação, carga, transporte, descarga e compactação. E, por fim, é estabelecido o prazo da obra, por critérios gerenciais.

3.1.6 Estimativa de custos das obras e produção das equipes

Com relação aos custos unitários, contrariamente às abordagens de Easa (1987, 1988b), e Jayawardane e Price (1994), foram considerados nesse trabalho os custos unitários e as taxas de produtividade baseadas na Tabela de Custos da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE). Esse sistema incorpora as taxas de produtividade e custos baseados em observações de diversas obras rodoviárias, levando-se em conta os tipos de solo, distâncias de transporte, equipamentos, mão de obra e custos produtivos e improdutivos. Essa é uma forma de padronizar as taxas de produtividade para determinada região, evitando-se assim o uso de custosas simulações computacionais, já que esses custos e produtividades são calculados a partir de uma base de dados estatística.

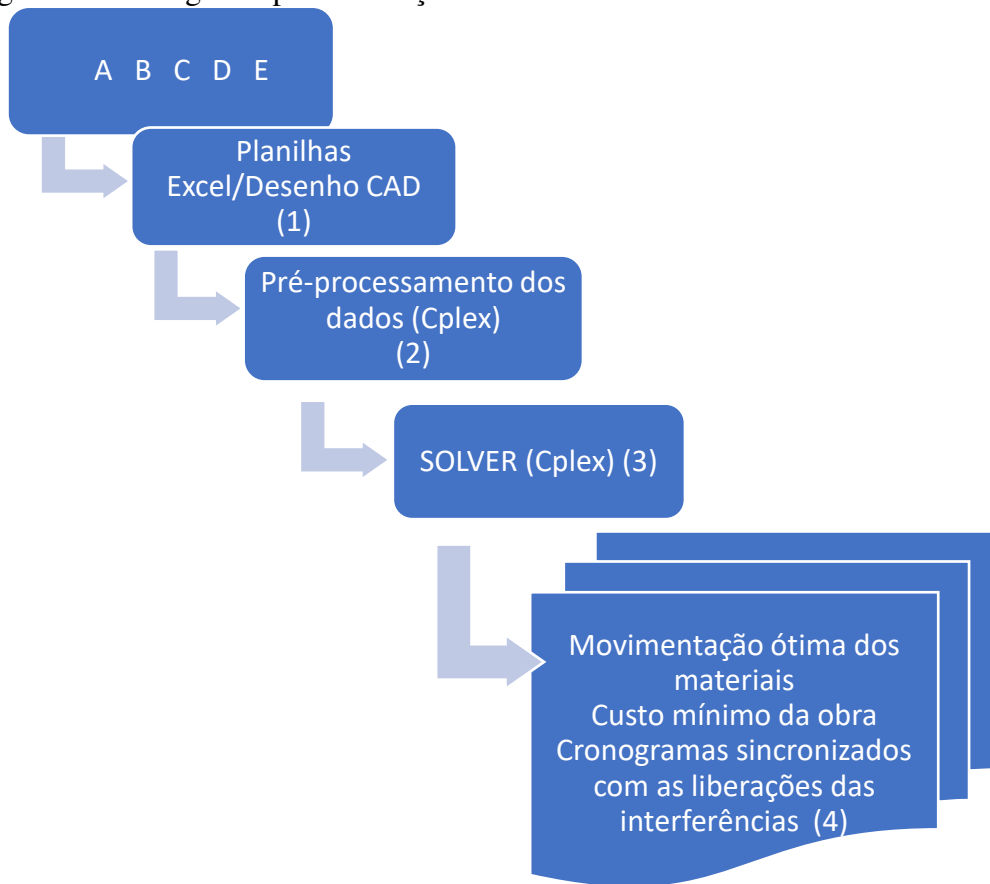
3.1.7 Programação computacional

Nessa etapa foram desenvolvidos os códigos de programação para resolução dos modelos e construção da interface de entrada de dados. O modelo constituído pelas equações de (5) a (19) é um modelo em Programação Linear onde Z é a função objetivo, representando o custo total dos serviços de terraplenagem, XS , XB e XD são as variáveis de decisão e CS , CB e

CD são os coeficientes das variáveis, os quais representam os diversos custos envolvidos no modelo. Para o cálculo desses custos faz-se necessário o conhecimento das características da obra que deverão estar estabelecidas no projeto geométrico assim como deverão ser conhecidos os quantitativos das seções de corte e aterro, localização e características geotécnicas das jazidas - informações essas oriundas dos projetos de terraplenagem e pavimentação. Dessa forma, foi usada para solução e implementação do modelo em Programação Linear (PL), a versão 12.6.0.0 do software IBM CPLEX, empregando-se o ambiente IDE (Integrated Development Language) e a linguagem OPL (Optimization Programming Language). Para a determinação das taxas de produção e dos custos unitários associados aos coeficientes $CS(s, ca)$, $CB(i, ca)$ e $CD(k, s)$ recorreu-se a planilhas Excel, as quais são conectadas ao IBM CPLEX. O processo segue o fluxograma indicado na Figura 2. Finalmente, os seguintes resultados são apresentados pelo CPLEX usando-se os recursos de pós-processamento (ILOG Script):

- 1- volumes de materiais movimentados dos cortes para os aterros (quantidade, origem e destino).
- 2- volumes de materiais movimentados das jazidas para os aterros (quantidade, origem e destino).
- 3- volumes de materiais movimentados dos cortes para as áreas de bota-foras (quantidade, origem e destino).
- 4- Intervalos de tempo em que essas movimentações são feitas, considerando-se as remoções dos bloqueios e as liberações para o tráfego de equipamentos.
- 5- Custo mínimo total dos serviços.
- 6- Cronogramas sincronizados com as liberações das interferências.

Figura 2 – Fluxograma para resolução do modelo



- A- Dados geométricos, geotécnicos e propriedades dos materiais – oriundos dos projetos.
- B- Dados das interferências: posicionamentos e tempos de liberação.
- C- Custos unitários: provenientes de tabelas ou pesquisas de campo.
- D- Produção das equipes: provenientes de tabelas ou pesquisas de campo.
- E- Prazo para conclusão da obra.
- 1- Interface.
- 2- Calcula a matriz A e os vetores b e c do PPL (Problema de Programação Linear).
- 3- Montagem e resolução do PPL através do script do modelo de distribuição com interferências.
- 4- Emissão dos relatórios.

Fonte: elaborado pelo autor.

4 ESTIMATIVA DE CUSTO DAS OBRAS

4.1 Generalidades

A função objetivo considerada no modelo apresentado é o custo total dos serviços de terraplenagem e pavimentação, o qual deve ser minimizado. Esse custo, por sua vez, pode ser subdividido em várias parcelas, que são: escavação, carga, transporte, descarga e compactação dos materiais provenientes dos cortes e alocados nos aterros. Da mesma forma são considerados os custos para execução das camadas de pavimentação (reforço do subleito, sub-base e base), com os materiais provenientes das jazidas estudadas para esse fim. Para os bota-foras, considerados os materiais inservíveis ou em excesso, os custos são compostos de escavação, carga, transporte e descarga nos locais previamente determinados. Dessa forma, é possível se elaborar a composição de custos de cada serviço em função de pesquisas de preços e da produção das equipes de terraplenagem e pavimentação na forma de tabelas conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Exemplo de composição de custos (continua)

Tabela de Custos – Versão 026 – ENC. SOCIAIS 114,23%					
C3178 – ESCAVAÇÃO CARGA E TRANSPORTE – MATERIAL DE 1ª CATEGORIA – DISTÂNCIA DE 201 A 400 M					
Preço Adotado:8,6600					Unid: M3
Código	Descrição	Unid	Coefficiente	Preço	Total
Equipamentos (Custo horário)					
I0596	Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002	92,2635	0,0181
I0710	Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096	264,5403	2,5417
I0666	Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000	82,1957	0,0000
I0779	Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098	226,2947	2,2186

Tabela 2 – Exemplo de composição de custos (conclusão)

Tabela de Custos – Versão 026 – ENC. SOCIAIS 114,23%					
C3178 – ESCAVAÇÃO CARGA E TRANSPORTE – MATERIAL DE 1ª CATEGORIA – DISTÂNCIA DE 201 A 400 M					
Preço Adotado:8,6600				Unid: M3	
Código	Descrição	Unid	Coeficiente	Preço	Total
Equipamentos (Custo horário)					
I0576	Caminhão basculante 12 m³ (CHI)	H	0,0088	49,7578	0,4390
I0688	Caminhão basculante 12 m³ (CHP)	H	0,0206	146,2982	3,0120
Total equipamentos (custo horário)					8,2294
MÃO DE OBRA					
Servente		H	0,0294	14,7600	0,4341
Total mão de obra					0,4341
Total simples					8,66
ENCARGOS					<i>INCLUSOS</i>
BDI					0,00
TOTAL GERAL					8,66

CHP – Custo horário produtivo CHI – Custo horário Improdutivo

Fonte: SEINFRA (2021).

Esse é o procedimento adotado pelos diversos órgãos públicos para as obras rodoviárias de forma a se dispor de uma referência para a elaboração das licitações públicas bem como para se conduzir o gerenciamento das obras. É comum também que cada empresa tenha suas próprias composições calculadas em função de sua estrutura organizacional e

produtiva, apropriando seus custos através da experiência obtida nas obras já executadas. Será visto a seguir o procedimento adotado pelos órgãos rodoviários para a fixação dos custos dos diversos serviços.

Observando-se a formulação do Capítulo 3, verifica-se a necessidade do conhecimento da produção dos equipamentos para que seja possível a montagem das restrições (12), (13) e (14), que estabelecem que o prazo da obra D será cumprido. Como está sendo adotada a tabela de custos da SEINFRA-CE, podemos utilizá-la para a estimativa dessas produções a partir das suas composições de custos. Essas produções, em m^3 /dia estão representadas pelas variáveis PS , PB e PD . Além disso será exposto a seguir as premissas nas quais se fundamentou a SEINFRA – CE para o cálculo dos custos unitários dos serviços.

4.2 Estimativa dos custos unitários dos serviços

4.2.1 Produção das equipes mecânicas

Para a constituição das equipes mecânicas necessárias para a execução dos diversos serviços que constituem a obra, deve-se conhecer de antemão o projeto de engenharia com suas especificações e demais características, como: quantidades dos diversos serviços, tipos de materiais a serem trabalhados, como solos e agregados, distâncias de transporte, prazos de execução, condições climáticas da região e demais informações que influenciem na logística do empreendimento. A partir daí são constituídas as patrulhas de equipamentos apropriadas para cada tipo de serviço e dimensionadas para as quantidades e prazos conhecidos. Cabe aqui observar que nem sempre esse problema oferece uma única solução sendo o mais comum se dispor de várias alternativas, remetendo a questão à tecnologia mais adequada (BRASIL, 2010). A produção das patrulhas, ou das equipes mecânicas, para cada tipo de serviço depende do desempenho dos diversos equipamentos individuais, mas é regida pela produção de um equipamento principal. Por sua vez, a produção do equipamento principal é calculada em função de sua produção horária através de fórmulas específicas para cada tipo de equipamento. Na Tabela 3 estão relacionados os equipamentos mais usados nos serviços de terraplenagem e pavimentação.

Tabela 3 – Finalidade e tipos de equipamentos de terraplenagem e pavimentação

Serviços	Equipamentos utilizados
Desmatamento e limpeza	Tratores de esteira com lâmina
Escavação de solos	Tratores de lâmina/Moto-scrapers /Escavadeiras
Extração de areia	Escavadeiras com caçambas tipo drag-line ou clam-shell Bombas de sucção
Extração e Escavação de rochas	Perfuratriz/Compressor/Martelete/Trator de lâmina Rompedor Escavadeiras
Carga de materiais	Escavadeiras Carregadeiras
Produção de brita	Peneiras/Correias transportadoras Britadores
Transporte de materiais	Carretas Caminhões basculantes Caminhões de carroceria fixa
Espalhamento de materiais terrosos	Motoniveladoras Tratores de lâminas
Umedecimento de solos na pista	Caminhão tanque
Mistura de solos; homogeneização de umidade	Motoniveladora/Pulvi-misturadoras Grade de discos
Compactação	Rolo pé-de-carneiro Rolo liso vibratório Rolo de pneus Compactadores de placa Soquetes mecânicos
Serviços auxiliares	Tratores de pneus Retroescavadeiras
Distribuição de agregados	Distribuidor de agregados
Mistura de solos em central	Usina de solos Carregadeira

Fonte: elaborada pelo autor com base em Brasil (2010).

4.2.2 Produção horária dos equipamentos

4.2.2.1 Tempo de Ciclo

A execução dos serviços de terraplenagem envolve as seguintes operações principais (SENÇO, 2001):

- a) escavação;
- b) carga;
- c) transporte;
- d) descarga;
- e) umidificação e homogeneização do material;
- f) compactação dos aterros.

Nos trabalhos em obras de terra, os equipamentos que estão sendo utilizados deslocam-se conforme um determinado padrão regular. Essa movimentação consiste em: carregamento, transporte, descarga e retorno, ou alguma variação desses movimentos (CATERPILLAR BRASIL, 1977). O Tempo de Ciclo é o tempo necessário para que o equipamento execute um ciclo completo dessas operações, voltando em seguida para a posição inicial para recomencá-las (RICARDO; CATALANI, 2007). É comum a divisão do Tempo de Ciclo em duas parcelas: Tempo Fixo e Tempo Variável. O Tempo Fixo é independente da distância de transporte e retorno, sendo uma parcela aproximadamente constante para um mesmo equipamento e é composto dos tempos gastos em carga, descarga e manobras, sendo publicado pelos fabricantes a partir de estudos próprios de produção. Já o Tempo Variável depende das distâncias de transporte e das condições das vias de tráfego. O Tempo de Ciclo determina, assim, o número de viagens por hora, que, por sua vez, permitirá o cálculo da produção horária do equipamento.

No modelo de distribuição de materiais, é possível incluir também os serviços de pavimentação, como reforço do subleito, sub-base e base. Nesses casos, as operações são análogas às de terraplenagem, com a diferença de que os materiais são provenientes das jazidas especificadas para esse fim, sendo o custo de transporte, na maioria dos casos calculados separadamente por se tratar de maiores distâncias.

4.2.2.2 Fatores de correção

No cálculo da produção dos equipamentos são utilizados ainda os seguintes fatores de correção:

a) Fator de Eficiência (F_e)

O Fator de Eficiência é a relação entre o tempo de produção efetivo e o tempo de produção nominal de um equipamento. Esse fator incorpora ao cálculo de produção dos equipamentos as atividades de manutenção, deslocamentos entre frentes de serviço, preparação do equipamento e outras paralizações devidas à organização deficiente dos serviços ou esperas devidas a outros equipamentos. Em geral esse fator é tomado igual a 0,83 em construção rodoviária, o que corresponde a um tempo de produção efetivo de 50 min em um tempo total de produção de 60 min ($50/60 = 0,83$). Em restauração pode-se adotar um fator menor, igual a 0,75, equivalente à razão de $45\text{min}/60\text{min} = 0,75$ (BRASIL, 2017).

b) Fator de Conversão (F_{cv})

Os volumes de material manipulados pelos equipamentos nos serviços de terraplenagem e pavimentação são volumes soltos. O Fator de Conversão é a razão entre o volume no corte ou compactado e o volume transportado nas caçambas dos equipamentos (volume solto). Em geral adota-se os valores a seguir:

Materiais de 1ª categoria - solos residuais e sedimentares escavados por equipamentos comuns, como tratores, escavadeiras, tratores e carregadeiras,

$$F_{cv} = 1,0 \text{ m}^3/1,25 \text{ m}^3 = 0,8 \quad (20)$$

Materiais de 2ª categoria - materiais mais resistentes ao desmonte, como pedras soltas e que exigem o emprego de escarificação ou explosões descontínuas,

$$F_{cv} = 1,0 \text{ m}^3/1,39 \text{ m}^3 = 0,72 \quad (21)$$

Materiais de 3ª categoria - materiais com resistência ao desmonte mecânico e que exigem o emprego contínuo de explosivos, como rocha não alterada,

$$F_{cv} = 1,0 \text{ m}^3/1,75 \text{ m}^3 = 0,57. \quad (22)$$

c) Fator de Carga (F_{ca})

O Fator de Carga é a relação entre a capacidade efetiva do equipamento e sua capacidade nominal ou geométrica. Os valores usualmente utilizados são:

a) materiais de 1ª categoria: 0,90;

b) materiais de 2ª categoria: 0,80;

c) materiais de 3ª categoria: 0,70.

E quando se tratar de escavadeiras hidráulicas:

a) materiais de 1ª categoria: 1,00;

b) materiais de 2ª categoria: 0,80.

Um exemplo para o cálculo da produção horária de equipamentos é o da produção da carregadeira de pneus.

Seja,

C – Capacidade da caçamba em m³;

F_{ca} – Fator de Carga;

F_{cv} – Fator de Conversão;

F_e – Fator de Eficiência;

T_c – Tempo total de ciclo, em minutos;

P – Produção, em m³/h.

Assim:

$$P = \frac{60 \times C \times F_{ca} \times F_{cv} \times F_e}{T_c} \quad (23)$$

Para o caso de transportes em caminhões basculantes, a produção horária é dada por:

$$P = \frac{C \times F_{cv} \times F_e}{T_c} \quad (24)$$

Onde:

P – Produção em t.km/h;

C – Capacidade transportada em 1 km, em t.km;

F_{cv} – Fator de Conversão;

F_e – Fator de Eficiência;

T_c – Tempo total de ciclo em horas.

Aqui o tempo total de ciclo inclui os tempos fixos – tempos de carga, manobras e descarga – e tempos variáveis, que são os tempos de ida, carregado, e de volta, descarregado. Enquanto os tempos fixos dependem do tipo de equipamento (carregadeiras), os tempos variáveis dependem das velocidades dos caminhões, que por sua vez dependem das distâncias de transporte e das condições da via.

4.2.3 Custo horário dos equipamentos

O custo horário dos equipamentos corresponde à soma de todas as parcelas de custos incidentes sobre a propriedade e operação referente a uma hora. Esses custos são subdivididos em três parcelas.

4.2.3.1 Custo de Operação

São os custos com combustível, filtros e lubrificantes e mão-de-obra de operação. Esses custos dependem do tipo de equipamento, do tipo de serviço e das condições de trabalho e os fabricantes fornecem valores médios para estimativas de consumo, considerando-se ainda os custos com filtros e lubrificantes como 10% dos custos de combustível (BRASIL, 2017). As Tabelas 4 e 5 contêm dados de consumo de combustível para os equipamentos usuais.

Tabela 4 – Estimativa de consumo de combustível de equipamentos a Diesel

Descrição	Potência (kW)	Consumo médio (l/h)	Combustível (l/kW.h)
Carregadeira de pneus – capacidade 3,3 m ³ Caterpillar 966H – 213 kW	213	15,15	0,07
Escavadeira hidráulica de esteiras – capacidade 0,4 m ³ - Caterpillar 311D LRR – 60 kW	60	8	0,13
Escavadeira hidráulica de esteiras com caçamba – capacidade 1,5 m ³ - Caterpillar 323D L 110 kW	110	15,5	0,14
Escavadeira hidráulica de esteiras com caçamba – capacidade 1,78 m ³ - Caterpillar 324D L 140 kW	140	17,5	0,13
Motoniveladora Caterpillar 120K 93 kW	93	12,85	0,14
Retroescavadeira de pneus Caterpillar 416E 70 kW	70	13,85	0,2
Rolo compactador liso autopropelido vibratório 11 t Caterpillar CS533E 97 kW	97	12	0,12
Trator de esteiras com lâmina Caterpillar D8 – 259 kW	259	39,25	0,15
Trator de esteiras com lâmina Caterpillar D6N – 112 kW	112	17,6	0,16

Fonte: elaborada pelo autor com base em Brasil (2017).

Tabela 5 – Estimativa de consumo de combustível de caminhões a Diesel

Descrição	Potência (kW)	Combustível (l/kW.h)
Caminhão basculante - 5 m ³ (8,8 t) Mercedes Benz	125	0,166
Caminhão carroceria 15 t Mercedes Benz	170	0,166
Caminhão basculante de 6 m ³ (8,8 t) Mercedes Benz	150	0,166
Caminhão basculante de 10 m ³ (15 t) Mercedes Benz	170	0,166
Caminhão basculante para rocha 8 m ³ (13 t) Mercedes	170	0,166
Caminhão tanque 6000 l Mercedes Benz	150	0,166
Caminhão tanque 10000 l Mercedes Benz	170	0,166
Caminhão carroceria fixa 4 t Mercedes Benz	80	0,185
Caminhão carroceria fixa 9 t Mercedes Benz	150	0,166
Cavalo mecânico com reboque 29,5 t Mercedes Benz	250	0,158
Caminhão tanque 13000 l Mercedes Benz	170	0,166
Caminhão basculante 14 m ³ (20 t) Volvo	279	0,166
Caminhão basculante para rocha 12 m ³ (18 t) Volvo	279	0,166

Fonte: elaborada pelo autor com base em Brasil (2017).

Para incluir também os custos com lubrificantes, filtros e graxas, o Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes – Vol. 1 – DNIT - 2017 indica, baseando-se que estes custos representam cerca de 10% dos custos com combustíveis, o cálculo pela fórmula a seguir:

$$C_c = P \times F_c \times V_c \quad (25)$$

Onde:

C_c – Custo horário de combustíveis, lubrificantes, filtros e graxas (R\$/h);

P – Potência do motor (kW);

F_c – Coeficiente de consumo (l/kWh), que pode ser obtido da Tabela 6;

V_c – Valor do combustível (R\$/l).

Quanto à mão-de-obra de operação, é constituída pelos operadores dos diversos tipos de equipamentos e tem seu valor estabelecido pelas diversas escalas salariais praticadas no mercado de trabalho (BRASIL, 2017).

Tabela 6 – Coeficientes de consumo de combustíveis, lubrificantes, filtros e graxas

Descrição	Coeficientes de consumo
Equipamentos a diesel	0,18 l/kWh
Caminhões e veículos a diesel	0,18 l/kWh
Equipamentos e veículos a gasolina	0,20 l/kWh
Veículos a álcool	0,28 l/kWh

Fonte: (BRASIL, 2017).

4.2.3.2 Custo de Manutenção

A manutenção mecânica é uma despesa operacional, já que é decorrente da utilização direta do equipamento em virtude do desgaste progressivo das peças, mas não é diretamente proporcional ao número de horas trabalhadas da máquina (RICARDO; CATALANI, 2007). Enquanto a máquina é nova, a produtividade do equipamento é elevada, pois o risco de defeitos mecânicos é pequeno. À proporção que passa o tempo, em razão do desgaste das peças, aumenta o número de horas paradas, afetando a produção. Inclui também material rodante, pneus, partes de desgaste e reparos em geral.

Para facilitar a estimativa dos custos de manutenção, os fabricantes lançam mão de coeficientes baseados em pesquisas nas redes de oficinas, que permitem o cálculo desses gastos ao longo dos anos. Assim os custos de manutenção podem ser calculados pela seguinte expressão (BRASIL, 2017).

$$M_h = \frac{V_a \times k}{n \times HTA} \quad (26)$$

com o seguinte significado:

M_h – Custo de Manutenção Horária (R\$/h);

V_a – Valor de aquisição do equipamento (R\$);

k – Coeficiente de manutenção fornecido pelos fabricantes;

n – Vida útil (anos);

HTA – Total de horas trabalhadas por ano.

O coeficiente k engloba manutenção preventiva e corretiva, reparos em geral, substituição de peças e componentes, veículo de apoio para abastecimento, perda de produção com as horas paralisadas e mão-de-obra. A Tabela 7 apresenta o coeficiente de manutenção k para os equipamentos mais comuns usados em terraplenagem de pavimentação.

Tabela 7 – Coeficiente de manutenção de equipamentos

Descrição dos equipamentos	Coeficiente de manutenção (k)
Caminhão basculante – 14 m ³	0,9
Caminhão de carroceria – 15 t	0,9
Caminhão tanque – 13.000 l	0,9
Carregadeira de pneus – 3,3 m ³	0,7
Conjunto de britagem – 80 m ³ /h	0,6
Escavadeira hidráulica sobre esteiras	0,7
Motoscraper	0,9
Motoniveladora	0,9
Rolo compactador de pneus	0,8
Trator de esteiras com escarificador	1,0

Fonte: elaborada pelo autor com base em Brasil (2017).

4.2.3.3 Custo de Propriedade

Custos de propriedades são as despesas que o proprietário tem que arcar independentemente do uso da máquina (CATERPILLAR DO BRASIL, 1977). São relativos à depreciação, remuneração do capital (juros), seguros e impostos. A depreciação é o maior dentre os custos de propriedade e está associado ao desgaste e obsolescência do equipamento. A depreciação depende da vida útil do equipamento, do valor de aquisição e do valor residual. O cálculo, adotando-se o método linear, se dá pela seguinte fórmula (BRASIL, 2017):

$$D_h = \frac{V_a - V_r}{n \times HTA} \quad (27)$$

com o seguinte significado:

D_h – Custo da depreciação horária (R\$/h);

V_a – Valor de Aquisição do equipamento (R\$);

V_r – Valor Residual (R\$);

n – Vida útil (anos);

HTA – Total de horas trabalhadas por ano.

A Tabela 8 apresenta valores das variáveis para cálculo da depreciação para os equipamentos usuais em terraplenagem de pavimentação.

Tabela 8 – Valores para cálculo da depreciação de equipamentos (continua)

Descrição	Potência	Combustível	Vida útil (anos)	HTA	Valor residual
Caminhão basculante – 14 m ³	295	D	6	2.000	40%
Caminhão carroceria – 15 t	188	D	7	2.000	40%
Caminhão tanque – 13000 l	188	D	7	2.000	40%
Carregadeira de pneus – 3,3 m ³	213	D	5	2.000	30%
Conjunto de britagem – 80 m ³ /h	313	E	7	2.000	20%

Tabela 8 – Valores para cálculo da depreciação de equipamentos (conclusão)

Descrição	Potência	Combustível	Vida útil (anos)	HTA	Valor residual
Escavadeira hidráulica sobre esteiras com caçamba – 1,5 m ³	110	D	5	2000	30%
Motoscraper	304	D	8,5	2.000	20%
Motoniveladora	93	D	7	2.000	30%
Rolo compactador de pneus autopropelido – 27 t	85	D	6	2.000	20%
Trator de esteiras com escarificador	259	D	9	2.000	30%

Fonte: elaborada pelo autor com base em Brasil (2017).

O segundo item que integra os custos de propriedade é o custo de oportunidade de capital, ou os juros sobre o capital, próprio ou de terceiros, investido pelo proprietário.

A taxa de juros deve incidir sobre o valor médio do investimento ao longo da vida útil do equipamento, sendo calculado pelas seguintes expressões (BRASIL, 2017):

$$V_m = \frac{(n+1)V_a}{2n} \quad (28)$$

$$J_h = \frac{V_m \times i}{HTA} \quad (29)$$

Onde:

V_m – Valor Médio do investimento (R\$);

n – Vida Útil (anos);

V_a – Valor de Aquisição do equipamento (R\$);

J_h – Custo horário de oportunidade do capital (R\$/h);

i – Taxa de juros anual (%);

HTA – Total de horas trabalhadas por ano.

O último item a compor os custos de propriedade são os custos com seguros e impostos. Os custos com seguros devem cobrir todos os prêmios de apólices gerais que se apliquem sobre o equipamento. Os impostos incluem as taxas de propriedade sobre as máquinas (CATERPILLAR BRASIL, 1977). O cálculo pode ser feito pela seguinte expressão:

$$I_h = \frac{i \times V_m}{HTA} \quad (30)$$

I_h - Custo horário de seguros e impostos;

i – Incidência média de seguros e impostos sobre os equipamentos (%);

V_m – Valor médio do investimento;

HTA – Total de horas trabalhadas por ano.

4.2.3.4 Custo Horário Produtivo e Improdutivo

Durante a operação do equipamento, uma parcela do tempo é gasta em produção efetiva e outra parcela, em decorrência de paralizações diversas devido às condições de trabalho, a máquina não produz. São introduzidos, assim, os conceitos de custo produtivo e improdutivo, respectivamente, para quando o equipamento esteja em produção ou em espera. Em função dos conceitos de custos de operação, manutenção e de propriedade tem-se, para custo horário produtivo (BRASIL, 2017):

$$C_{hp} = D_h + J_h + M_h + C_c + C_{mo} + I_h \quad (31)$$

Onde:

C_{hp} – Custo Horário Produtivo (R\$/h);

D_h – Depreciação horária (R\$/h);

J_h – Custo horário da oportunidade de capital (R\$/h);

M_h – Custo horário de manutenção (R\$/h);

C_c – Custo horário de combustíveis, lubrificantes, filtros e graxas (R\$/h);

C_{mo} – Custo horário com a mão-de-obra de operação (R\$/h);

I_h – Custo horário com seguros e impostos (R\$/h).

Da mesma forma:

$$C_{hi} = D_h + J_h + C_{mo} + I_h \quad (32)$$

C_{hi} – Custo Horário Improdutivo (R\$/h).

4.2.4 Composições de custos

Os órgãos públicos têm elaborado tabelas de preços dos diversos serviços rodoviários considerando, a título de simplificação, as produções horárias médias dos equipamentos e as pesquisas de preços dos diversos insumos envolvidos. A montagem das composições de custos é feita através da definição dos insumos com as suas respectivas quantidades para produzir uma unidade do serviço. É levado em conta, ainda, na elaboração das composições, o tempo operativo dos equipamentos, ou seja, as quantidades produtivas e improdutivas. No Anexo A estão apresentadas as composições de custos da SEINFRA – CE dos diversos serviços utilizados nos modelos apresentados nesse trabalho.

4.3 Custos da movimentação de terra

No modelo de distribuição de materiais apresentado, a função objetivo representa o custo total da movimentação de terras, como foi dito. Sua representação é:

$$\begin{aligned}
 Z = & \sum_{s \in S} \sum_{ca \in CA} \sum_{t \in W} CS(s, ca)XS(s, ca, t) + \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{t \in W} CD(k, s)XD(k, s, t) \\
 & + \sum_{i \in J} \sum_{ca \in CA} \sum_{t \in W} CB(i, ca)XB(i, ca, t) \quad (33)
 \end{aligned}$$

Para a montagem do modelo em Programação Linear é necessário o cálculo dos coeficientes CS , custo unitário de escavação, carga, transporte, homogeneização e compactação dos materiais entre cortes e aterros, CB , da mesma forma entre jazidas e aterros e CD , custo unitário dos bota-foras.

Conforme Lima (2003) esses custos podem ser expressos por:

$$CS(s, ca) = CXSCA(s, ca) + CTSCA(s, ca)LSCA(s, ca)\gamma(s) + CEA(ca)FS(s, ca) \quad (34)$$

Onde $CS(s, ca)$ é o custo unitário total (em R\$/m³) e inclui a escavação, carga, transporte, descarga, umidificação e compactação para executar a camada de aterro ca com o material procedente do corte s . As demais variáveis têm o seguinte significado:

$CXSCA(s, ca)$: custo de escavação e carga do material do corte s transportado para o aterro ca em R\$/m³, relativo ao volume natural. Para pequenas distâncias essa variável pode incluir o transporte.

$CTSCA (s, ca)$: custo de transporte entre o corte s e o aterro ca , em R\$/t.km. Em geral para pequenas distâncias esse custo já está incluído na escavação com $CXSCA$ sendo igual a zero nesse caso. Para distâncias maiores, como 5,0 km, por exemplo, calcula-se o transporte separadamente.

$LSCA (s, ca)$: distância entre o corte s e o aterro ca , em km.

$\gamma(s)$: densidade “in situ” do material do corte s , em t/m³.

$CEA (ca)$: custo de execução da camada de aterro ca , em R\$/m³, sendo o volume geométrico.

$FS (s, ca)$: fator de contração entre o corte s e o aterro ca .

Da mesma forma,

$$CB(i, ca) = CXICA(i, ca) + CTICA(i, ca)LICA(i, ca)\gamma_t(i) + CEA(ca)FI(i, ca) \quad (35)$$

Onde $CB (i, ca)$ é o custo unitário total (em R\$/m³) - incluindo escavação, carga, transporte, descarga, umidificação e compactação – para executar o aterro ca com o material procedente da jazida i . As demais variáveis têm o seguinte significado:

$CXICA (i, ca)$: custo de escavação e carga do material da jazida i quando transportado para o aterro ca em R\$/m³, sendo o volume natural.

$CTICA (i, ca)$: custo de transporte entre a jazida i e o aterro ca , em R\$/t.km;

$LICA (i, ca)$: distância entre a jazida i e a camada de aterro ca , em km.

$\gamma(i)$: densidade “in situ” da jazida i , em t/m³.

$CEA (ca)$: custo de execução do aterro ca , em R\$/m³, referente ao volume geométrico.

$FI (i, ca)$: fator de contração entre o material da jazida i e o do aterro ca .

E, finalmente

$$CD(k, s) = CXKS(k, s) + CTSK(s, k)LSK(s, k)\gamma(s) \dots \dots \dots (36)$$

Onde $CD(k, s)$ é o custo para expurgar o material do corte s para a área de bota fora k .

$CXKS(k, s)$: custo de escavação e carga do material do corte s quando transportado para a área de bota-fora k , em R\$/m³, sendo o volume natural.

$CTSK(s, k)$: custo de transporte entre o corte s e a área de bota-fora k , em R\$/t.km;

$LSK(s, k)$: distância entre a camada de corte s e a área de bota-fora k , em km;

$\gamma(s)$: densidade “in situ” do material do corte s , em t/m³

5 PROGRAMAÇÃO

5.1 Linguagens de modelagem

As linguagens de modelagem foram criadas para simplificar a solução de problemas de programação matemática e muitos problemas dessa natureza podem ser expressos em uma linguagem de computador cuja sintaxe é próxima à apresentação matemática padrão. Essas linguagens dispõem de vários recursos, como matrizes e conjuntos, bem como equivalentes em linguagem de computador às notações algébricas tradicionais.

Por exemplo, em AMPL (A Mathematical Programming Language), uma expressão como

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i$$

pode ser escrita como

soma {i em 1..n} a [i] * x [i]

Além disso, essas linguagens fornecem uma separação clara entre o modelo e os dados do problema.

No Capítulo 3 foi desenvolvido o modelo matemático do problema de otimização das operações de terraplenagem com interferências. Como foi visto, é um modelo de Programação Linear, com o emprego do CPLEX Optimization Studio da IBM, aplicativo de suporte à decisão baseado em otimização.

O software consiste em uma linguagem de modelagem, dois mecanismos de otimização para resolver os modelos e um ambiente de desenvolvimento integrado para testar e depurá-los, que são:

- 1) OPL (Optimization Programming Language), a linguagem de programação de otimização, usada para escrever modelos matemáticos. Na OPL, um projeto é definido como um conjunto de dois tipos de arquivos: os arquivos de modelo e os de dados. É uma linguagem de modelagem que visa simplificar a solução de problemas de otimização. Problemas de Programação Linear, Programação Inteira e otimização combinatória surgem em uma variedade de áreas de aplicação, que incluem planejamento, programação, sequenciamento e alocação de recursos. Dessa forma ela fornece suporte à modelagem desses diversos tipos de problemas, dando acesso a algoritmos de última geração.

- 2) IDE (Integrated Development Environment), o ambiente de desenvolvimento integrado que permite desenvolver e testar os modelos. A janela principal do CPLEX Studio possui dicas que aparecem quando se move o ponteiro do mouse sobre a maioria dos elementos da janela principal.

Para trabalhar com um modelo no IDE, deve-se primeiro criar um projeto. O modelo e os dados associados são adicionados ao projeto. Em seguida, cria-se um modelo com a linguagem de modelagem OPL na área de edição do IDE e depois salva-se o código OPL em um arquivo com a extensão .mod. Normalmente, um arquivo de dados é criado no IDE e os dados são salvos em um arquivo com a extensão .dat, mas também pode-se ter um modelo simples com os dados dentro do modelo.

- 3) O mecanismo CPLEX Optimizer, para encontrar soluções para modelos que requerem técnicas de programação matemática. Esse mecanismo implementa o método Simplex, para a resolução dos problemas de Programação Linear.
- 4) O mecanismo CP Optimizer, que faz uso de tecnologia de otimização baseada nos princípios da inteligência artificial, não utilizada nesse trabalho.

5.2 Programação linear

A Programação Linear é uma ferramenta importante para problemas de busca combinatória, não apenas porque resolve com eficiência uma grande classe de problemas importantes, mas também porque é o bloco básico de algumas técnicas fundamentais nesta área. Um problema de programação linear consiste em minimizar uma função objetivo linear sujeita a um conjunto de restrições lineares sobre variáveis reais restritas, conforme visto em 3.1.1. Os modelos em Programação Linear têm a vantagem de poderem ser resolvidos em tempo polinomial e solucionadores robustos agora estão disponíveis para resolver programas lineares de grande escala.

5.3 Dados externos

A linguagem OPL permite a leitura de dados a partir de uma fonte externa, como um banco de dados ou uma planilha. Nesse trabalho os dados dos modelos foram inseridos em planilhas do Excel, as quais foram conectadas ao código OPL através da instrução “SheetConnection”.

5.4 Pré-processamento e pós-processamento

Outro recurso da linguagem OPL é a possibilidade de se construir funções. São as funções próprias do usuário, as quais permitem a preparação dos dados – designado pré-processamento - de um determinado problema para, a partir daí, serem utilizados na montagem dos modelos, seja em Programação Linear, Programação Quadrática ou Programação Inteira.

No presente trabalho, o modelo em Programação Linear é montado em função dos custos de escavação, carga, transporte e compactação, que por sua vez depende da geometria da obra e demais informações dos materiais disponíveis. Dessa forma foram construídas funções para a determinação desses custos com o auxílio da instrução “execute”. Como exemplo, o seguinte bloco “execute” calcula o custo de escavação, carga, transporte e compactação de uma determinada seção em corte s para uma outra seção em aterro ca .

```
execute DADOSCS{
    function CUSTOCS(CORTES, ATERROS){
        return CXSCA[s][ca] + CTSCA[s][ca]*LSCA[s][ca]*GAMA[s] +
        CEA[ca]*FS[s][ca];
    }
}
```

Os termos da função CUSTOCS (CORTES, ATERROS) têm o seguinte significado:

$CXSCA[s][ca]$ – Custo de escavação e carga da seção em corte s para a seção em aterro ca .

$CTSCA[s][ca]$ – Custo de transporte da seção em corte s para a seção em aterro ca .

$LSCA[s][ca]$ – Distância entre a seção em corte s e a seção em aterro ca .

De modo semelhante, a instrução “execute” pode ser utilizada no pós-processamento, ou seja, na saída dos resultados. O exemplo a seguir mostra o resultado da função objetivo e das movimentações entre os cortes s e os aterros ca .

```
execute dadosXS{
    writeln ("RESULTADOS");
    writeln("CUSTO TOTAL:", cplex.getObjValue());
    for(var s in CORTES)
    for(var ca in ATERROS)
    if (XS[s][ca]>0) {
        writeln("XS("+ s +', '+ ca +"): " + ' ' + XS[s][ca]);
    }
}
```

}

}

6 RESULTADOS

Um dos objetivos dos modelos é alocar os materiais de terraplanagem e pavimentação ao longo do trecho de forma a se obter o menor custo, respeitando, naturalmente, as restrições inerentes a cada problema em particular. A partir da consideração das interferências no modelo é possível a determinação de um cronograma de ataque dos serviços, dependente dos prazos de liberação dos bloqueios e do prazo estabelecido para a conclusão da obra. Dessa forma, a partir da comparação entre os resultados dos modelos e os dos projetos analisados, pode-se esperar os seguintes resultados:

- a) redução no custo total dos serviços (determinação do custo mínimo e da movimentação de materiais ótima);
- b) detecção de inconsistências nos projetos, se houver;
- c) plano de ataque ótimo dos serviços;
- d) percentual de reflexo nos custos de uma redução do prazo da obra.

Com relação aos exemplos hipotéticos, serão realizadas análises de sensibilidade para se determinar a relação entre os prazos estabelecidos para a conclusão das obras, o seu custo e o número de bloqueios. Serão analisados a seguir uma série de exemplos numéricos e um caso prático de uma obra onde serão destacadas as principais conclusões.

6.1 Exemplo 1

A obra referente ao Exemplo 1 está indicada em planta e perfil na Figura 3 e o objetivo desse exemplo é analisar o reflexo da variação do prazo de execução nos custos. Para isso foram estabelecidos três cenários:

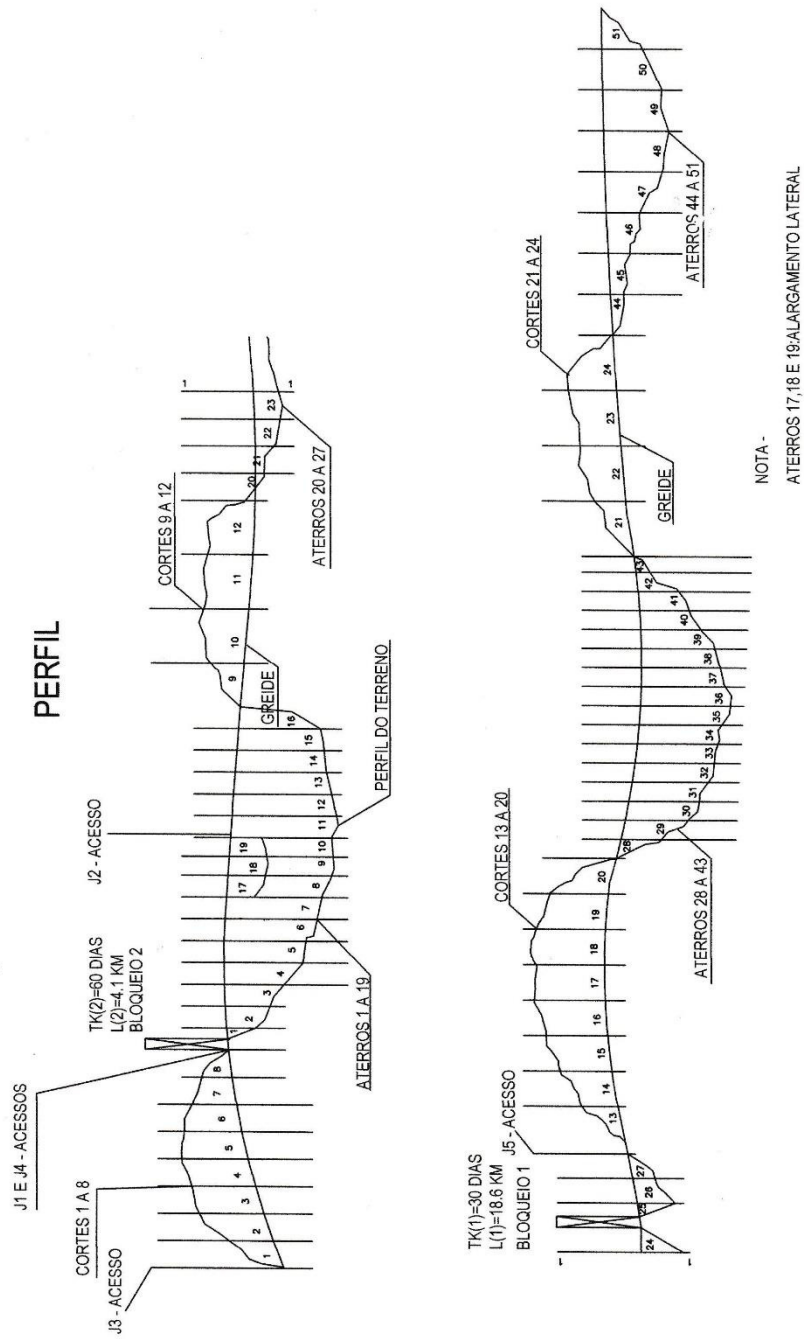
Cenário 1: $D=100$ dias

Cenário 2: $D=80$ dias

Cenário 3: $D=70$ dias

Os demais dados são os mesmos para os três cenários.

Figura 3 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, aterros, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1



Fonte: elaborado pelo autor

Com relação à produção, é possível se fazer uma estimativa através das próprias tabelas de custos. Por exemplo, para as variáveis *XS* os serviços envolvidos são: escavação, carga, transporte e compactação dos aterros com o material proveniente dos cortes. A seguir é reproduzida a composição do serviço “ESCAVAÇÃO, CARGA E TRANSPORTE - MATERIAL DE 1ª CATEGORIA, DE 801 A 1000 m” (Tabela 9), extraída da tabela SEINFRA-24.1, em h/m³. Pode-se verificar que a produção do serviço é dependente da produção do trator de esteiras com lâmina e escarificador e potência de 155 HP, com 0,0098 horas/m³. Admitindo-se uma jornada de trabalho de 8 horas/dia chega-se a uma produção (1/PS) de 1,225 dias/1000 m³ para a equipe indicada na tabela. A equipe de compactação poderá ser dimensionada em função dessa produção estimada e, analisando-se a composição do item “COMPACTAÇÃO DE ATERROS 100% PN” (Tabela 10), extraída também da tabela SEINFRA-24.1, verifica-se que a produção dos compactadores é de 0,0044 horas/m³, equivalente a 0,44 dias/1000 m³, adotando-se fator de aterro de 1,25.

Para as variáveis *XB* e *XD* será também adotado para (1/PB) e (1/PD) o valor de 1,225 dias /1000 m³, por se tratar de serviços semelhantes, salientando-se que na resolução dos modelos não se faz necessário o cálculo da produção pelos dados da tabela, podendo-se estabelecer um valor a partir dos equipamentos disponíveis assim como das condições de campo. Faz-se necessário também dimensionar as equipes de transporte (caminhões caçamba) sincronizadas com essas produções.

Tabela 9 – Coeficientes em h/m³ dos equipamentos referentes ao serviço “ESCAVAÇÃO CARGA E TRANSPORTE DE MATERIAL DE 1ª CATEGORIA DE 801 A 1000 m” (continua)

Descrição	Unidade	Coeficiente
EQUIPAMENTOS		
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI) (*)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP) (*)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0043

Tabela 9 – Coeficientes em h/m³ dos equipamentos referentes ao serviço “ESCAVAÇÃO CARGA E TRANSPORTE DE MATERIAL DE 1ª CATEGORIA DE 801 A 1000 m” (conclusão)

Descrição	Unidade	Coeficiente
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0349
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
MÃO-DE-OBRA		
Servente	H	0,0294
(*) CHI e CHP – Custo horário Improdutivo e Produtivo		

Fonte: (SEINFRA, 2021, *online*).

Tabela 10 – Coeficientes em h/m³ dos equipamentos referentes ao serviço “COMPACTAÇÃO DE ATERROS 100% P.N.” (continua)

Descrição	Unidade	Coeficiente
EQUIPAMENTOS		
Grade de discos (CHI) (*)	H	0,0008
Grade de discos (CHP) (*)	H	0,0037
Motoniveladora (CHI)	H	0,0000

Tabela 10 – Coeficientes em h/m³ dos equipamentos referentes ao serviço “COMPACTAÇÃO DE ATERROS 100% P.N.” (conclusão)

Descrição	Unidade	Coeficiente
Motoniveladora (CHP)	H	0,0044
Caminhão tanque 8000 l (CHI)	H	0,0000
Caminhão tanque 8000 l (CHP)	H	0,0089
Trator de pneus (CHI)	H	0,0008
Trator de pneus (CHP)	H	0,0037
Compactador pé-de-carneiro vibratório autopropelido (CHI)	H	0,0018
Compactador pé-de-carneiro vibratório autopropelido (CHP)	H	0,0026
MÃO-DE-OBRA		
Servente	H	0,0222
(*) CHI e CHP – Custo horário Improdutivo e Produtivo		

Fonte: (SEINFRA, 2021, *online*).

Como a construção do modelo depende do conhecimento da geometria da obra e das características geotécnicas dos materiais, na Tabela 11 são apresentados os quantitativos de cortes e aterros nas diversas seções originários dos projetos. Os demais dados estão indicados nos desenhos da Figura 3 e Apêndice A.

Tabela 11 – Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 1

Cortes	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)
1	1,00	1	1,00	25	1,00
2	2,00	2	2,00	26	1,00
3	3,00	3	2,00	27	1,00
4	4,00	4	2,00	28	2,00
5	5,00	5	2,00	29	2,00
6	3,00	6	2,00	30	1,00
7	2,00	7	2,00	31	1,00
8	1,00	8	2,00	32	1,00
9	1,00	9	2,00	33	3,00
10	3,00	10	2,00	34	2,00
11	3,00	11	2,00	35	1,00
12	1,00	12	2,00	36	1,00
13	1,00	13	2,00	37	2,00
14	2,00	14	1,00	38	3,00
15	3,00	15	1,00	39	3,00
16	4,00	16	1,00	40	3,00
17	5,00	17	3,00	41	1,00
18	3,00	18	2,00	42	1,00
19	2,00	19	1,00	43	1,00
20	1,00	20	1,00	44	1,00
21	1,00	21	2,00	45	2,00
22	3,00	22	3,00	46	2,00
23	3,00	23	3,00	47	2,00
24	1,00	24	3,00	48	2,00
				49	2,00
				50	3,00
				51	3,00

Fonte: elaborada pelo autor.

6.1.1 - Exemplo 1 - Cenário 1

Os dados do Cenário 1 são os seguintes:

Produção (PS, PB e PD): 1,225 dias/1000 m³

Quantidade de bloqueios: 2

Tempos de liberação dos bloqueios: TK(1) = 30 dias; TK(2) = 60 dias

Prazo da obra (D): 100 dias

Na Tabela 12 estão os valores das variáveis $XS(s,ca,t)$ mostrando a movimentação dos materiais entre os cortes e os aterros nos determinados intervalos de tempo. Da mesma forma, na Tabela 13 estão os valores das variáveis $XB(i,ca,t)$ mostrando a movimentação dos

materiais entre as jazidas e os aterros. O valor encontrado da função objetivo foi de R\$1.977.075,35 (custo mínimo total dos serviços), obtido com o auxílio do software Cplex.

Tabela 12 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 - Cenário 1.

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	>60	1,00
2	3	>60	2,00
3	4	>60	2,5
3	8	>60	0,5
4	5	>60	2,5
4	18	>60	1,5
5	6	>60	2,5
5	17	>60	2,25
5	18	>60	0,25
6	7	>60	2,5
6	17	>60	0,5
7	8	>60	2,00
8	17	>60	1,0
9	21	0-30	1,0
10	23	0-30	3,0
11	20	0-30	0,25
11	21	0-30	1,5
11	25	30-60	1,25
12	20	0-30	1,0
13	31	0-30	1,0
14	32	0-30	1,25
14	33	0-30	0,75
15	33	0-30	3,0
16	34	0-30	2,5
16	35	0-30	0,75
16	38	0-30	0,75
17	35	0-30	0,5
17	37	0-30	0,75
17	39	0-30	3,75
18	36	0-30	1,25
18	37	0-30	1,75
19	38	0-30	2,0
20	38	0-30	1,0
21	47	0-30	1,0
22	49	0-30	2,5
22	50	0-30	0,5
23	51	0-30	3,0
24	44	0-30	1,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Nas Tabelas 14 e 15 encontram-se os resumos das movimentações de materiais e o tempo necessário para sua realização, a partir dos quais foi elaborado o cronograma da Figura

4. Nas tabelas estão indicados três intervalos de tempo, que são: entre 0 e 30 dias, entre 30 e 60 dias e após 60 dias, limitando-se ao prazo D , estipulado para a conclusão da obra. A movimentação deve ocorrer nesses intervalos já que a disponibilidade de material depende diretamente da liberação dos bloqueios. A tentativa de se aumentar a velocidade de ataque resultará ou na ociosidade do equipamento por falta de material ou então no aumento dos custos, pela necessidade de se obter o material em jazidas mais distantes.

Tabela 13 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 - Cenário 1.

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
2	9	0-30	2,22
2	10	0-30	2,22
2	11	0-30	2,22
2	12	0-30	2,22
2	13	0-30	2,22
2	14	0-30	1,11
2	15	0-30	1,11
2	16	0-30	1,11
2	18	0-30	0,67
2	19	0-30	1,11
2	48	30-60	0,22
2	50	30-60	2,89
2	51	30-60	0,67
3	1	>60	1,11
3	2	>60	1,33
3	3	>60	0,44
5	22	30-60	3,33
5	23	30-60	0,67
5	24	30-60	3,33
5	26	0-30	1,11
5	27	0-30	1,11
5	28	0-30	2,22
5	29	0-30	2,22
5	30	0-30	1,11
5	31	0-30	0,22
5	40	0-30	3,33
5	41	0-30	1,11
5	42	0-30	1,11
5	43	0-30	1,11
5	44	0-30	0,22
5	45	0-30	2,22
5	46	0-30	2,22
5	47	0-30	1,33
5	48	0-30	2,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Ainda nas Tabelas 14 e 15, onde estão indicados os resumos dos quantitativos das variáveis *XS* e *XB*, a coluna *Duração* se refere ao tempo de execução dos serviços relativos a cada variável, calculado a partir da produção admitida de 1,225 dia /1000 m³, o que permite elaborar o cronograma da Figura 4. No cronograma estão indicados, no eixo horizontal, o tempo em dias e no eixo vertical as variáveis de decisão, assim descritas:

- a) *XS*(0 – 30) – Volume de material movimentado entre cortes e aterros, em 1000 m³, a partir do início da obra (“0” dias). Entre parênteses estão indicados o início das operações e o tempo de liberação do próximo bloqueio (a ser liberado, no caso 30 dias). Compreende escavação, carga, transporte e as operações de umidificação, homogeneização e compactação do material deixando-se a plataforma na cota de terraplenagem de projeto. A barra horizontal representa o tempo necessário para realizar essas operações, calculado a partir da Tabela 14, no caso, 43,8 dias.
- b) *XS*(30 – 60) - Volume de material movimentado entre cortes e aterros, em 1000 m³, a partir de 30 dias (liberação do primeiro bloqueio). Indicado também, entre parênteses, o tempo de liberação do próximo bloqueio, 60 dias. Da mesma forma, compreende todos os serviços de terraplenagem. A barra horizontal representa o tempo necessário para realizar essas operações, calculado a partir da Tabela 14, no caso, 1,5 dia.
- c) *XS*(Após 60) - Volume de material movimentado entre cortes e aterros, em 1000 m³, a partir de 60 dias (liberação do segundo bloqueio). Da mesma forma, compreende todos os serviços de terraplenagem. A barra horizontal representa o tempo necessário para realizar essas operações, calculado a partir da Tabela 14, no caso, 25,7 dias.
- d) *XB*(0 – 30) – Volume de material movimentado entre jazidas e aterros, em 1000 m³, a partir do início da obra (“0” dias). Entre parênteses estão indicados o início das operações e o tempo de liberação do próximo bloqueio (a ser liberado, no caso 30 dias). Compreende escavação, carga, transporte e as operações de umidificação, homogeneização e compactação do material deixando-se a plataforma na cota de terraplenagem de projeto. A barra horizontal representa o tempo necessário para realizar essas operações, calculado a partir da Tabela 15, no caso, 47,6 dias.
- e) *XB*(30 – 60) - Volume de material movimentado entre jazidas e aterros, em 1000 m³, a partir de 30 dias (liberação do primeiro bloqueio). Indicado também,

entre parênteses, o tempo de liberação do próximo bloqueio, 60 dias. Da mesma forma, compreende todos os serviços de terraplenagem. A barra horizontal representa o tempo necessário para realizar essas operações, calculado a partir da Tabela 15, no caso, 13,6 dias.

- f) XB(Após 60) - Volume de material movimentado entre jazidas e aterros, em 1000 m³, a partir de 60 dias (liberação do segundo bloqueio). Da mesma forma, compreende todos os serviços de terraplenagem. A barra horizontal representa o tempo necessário para realizar essas operações, calculado a partir da Tabela 15, no caso, 3,5 dias.

A partir do cronograma é possível ver que o período total de execução foi de 85,7 dias, menor que 100 dias portanto.

Tabela 14 – Resumo das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 - Cenário 1.

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	43,79	35,75
30-60	1,53	1,25
>60	25,73	21,00

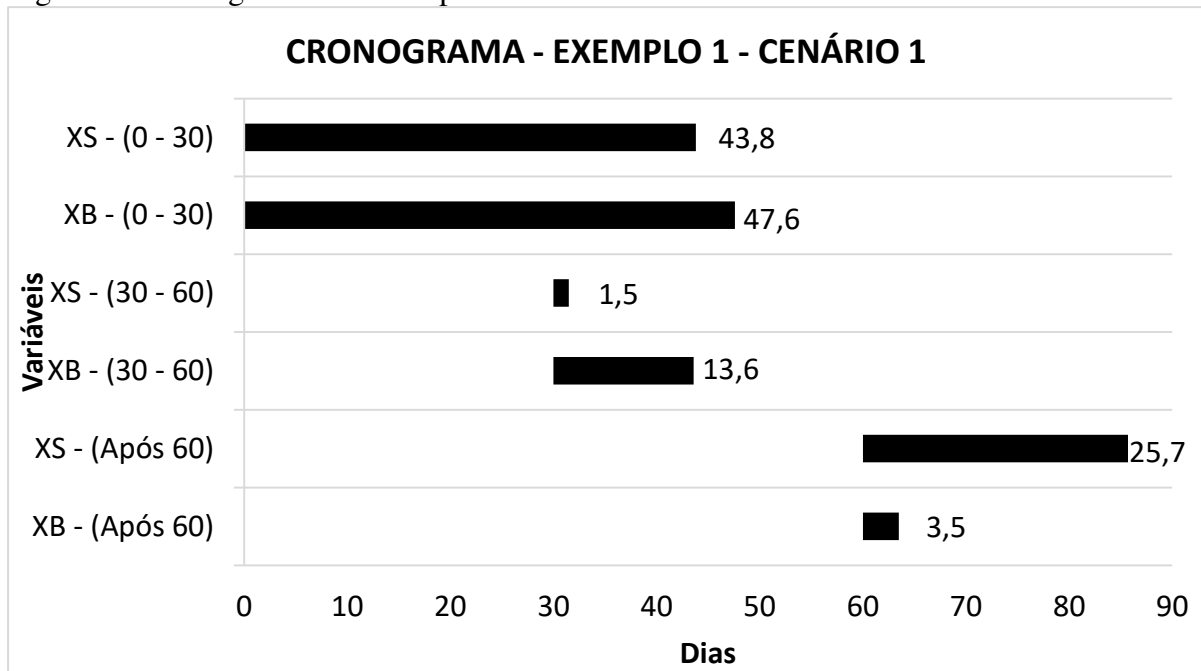
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Resumo das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 - Cenário 1.

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	47,59	38,85
30-60	13,61	11,11
>60	3,53	2,88

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4 – Cronograma do Exemplo 1 - Cenário 1.



Fonte: elaborado pelo autor

6.1.2 exemplo 1 – cenário 2

Os dados do Cenário 2 são os seguintes:

Taxa de produção: 1,225 dias/1000 m³

Quantidade de bloqueios: 2

Tempos para liberação dos bloqueios: TK(1) = 30 dias; TK(2)= 60 dias

Prazo da obra (D): 80 dias

Nesse caso, o valor alcançado da função objetivo foi R\$ 2.048.109,52, o que resulta num acréscimo de 3,6% em relação ao Cenário 1, cujo custo de execução é de R\$1.977.075,35, com prazo de 100 dias. Isso decorre do fato de que com o prazo mais curto – pode-se observar pelo cronograma da Figura 5 que o prazo de execução resultou em exatos 80 dias – nem todas as movimentações de materiais estavam disponíveis, em razão dos bloqueios, obrigando o modelo a escolher uma alternativa mais custosa, inclusive expurgando parte do material, como se vê na Tabela 21, onde consta o resumo da variável XD. Observe-se que esta foi a solução encontrada pelo modelo para executar a obra no prazo de 80 dias: expurgar parte do material (4,67 mil m³) antes de 30 dias, conforme se vê no cronograma da Figura 5 (variável XD (0-30)) substituindo esse material por material das jazidas. Nas Tabelas 16, 17 e 18 encontram-se as

movimentações de material dos cortes para os aterros, das jazidas para os aterros, e dos cortes para os bota foras e nas Tabelas 19, 20 e 21, os resumos de todas as variáveis.

Tabela 16 - Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	>60	1
2	3	>60	2
3	4	>60	2,5
4	5	>60	2,5
4	8	>60	0,83
5	6	>60	2,5
5	8	>60	1,67
5	17	>60	0,83
6	7	>60	2,5
9	21	0-30	1,0
10	23	0-30	3,0
11	20	0-30	0,25
11	21	0-30	1,5
11	25	30-60	1,25
12	20	0-30	1,0
13	31	0-30	1,0
14	32	0-30	1,25
14	33	0-30	0,75
15	33	0-30	3,0
16	34	0-30	2,5
16	35	0-30	0,75
16	38	0-30	0,75
17	35	0-30	0,5
17	37	0-30	0,75
17	39	0-30	3,75
18	36	0-30	1,25
18	37	0-30	1,75
19	38	0-30	2,0
20	38	0-30	1,0
21	47	0-30	1,0
22	49	0-30	2,5
22	50	0-30	0,5
23	51	0-30	3,0
24	44	0-30	1,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 17 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
2	9	0-30	2,22
2	10	0-30	2,22
2	11	0-30	2,22
2	12	0-30	2,22
2	13	0-30	2,22
2	14	0-30	1,11
2	15	0-30	1,11
2	16	0-30	1,11
2	17	0-30	2,60
2	18	0-30	2,22
2	19	0-30	1,11
2	48	30-60	0,22
2	50	30-60	2,89
2	51	30-60	0,67
3	1	>60	1,11
3	2	>60	1,33
3	3	>60	0,44
5	22	30-60	3,33
5	23	30-60	0,67
5	24	30-60	3,33
5	26	0-30	1,11
5	27	0-30	1,11
5	28	0-30	2,22
5	29	0-30	2,22
5	30	0-30	1,11
5	31	0-30	0,22
5	40	0-30	3,33
5	41	0-30	1,11
5	42	0-30	1,11
5	43	0-30	1,11
5	44	0-30	0,22
5	45	0-30	2,22
5	46	0-30	2,22
5	47	0-30	1,33
5	48	0-30	2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 18 - Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 2

k (Área para botas-foras)	s (Seção em corte)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	3	0-30	0,5
1	4	0-30	0,67
1	8	0-30	1,0
1	6	0-30	0,5
1	7	0-30	2,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 19 - Resumo das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 2

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	43,79	35,75
30-60	1,53	1,25
>60	20,00	16,33

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 20- Resumo das variáveis XB (i, ca, t) do exemplo 1 – cenário 2

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	52,68	43,00
30-60	13,61	11,11
>60	3,53	2,88

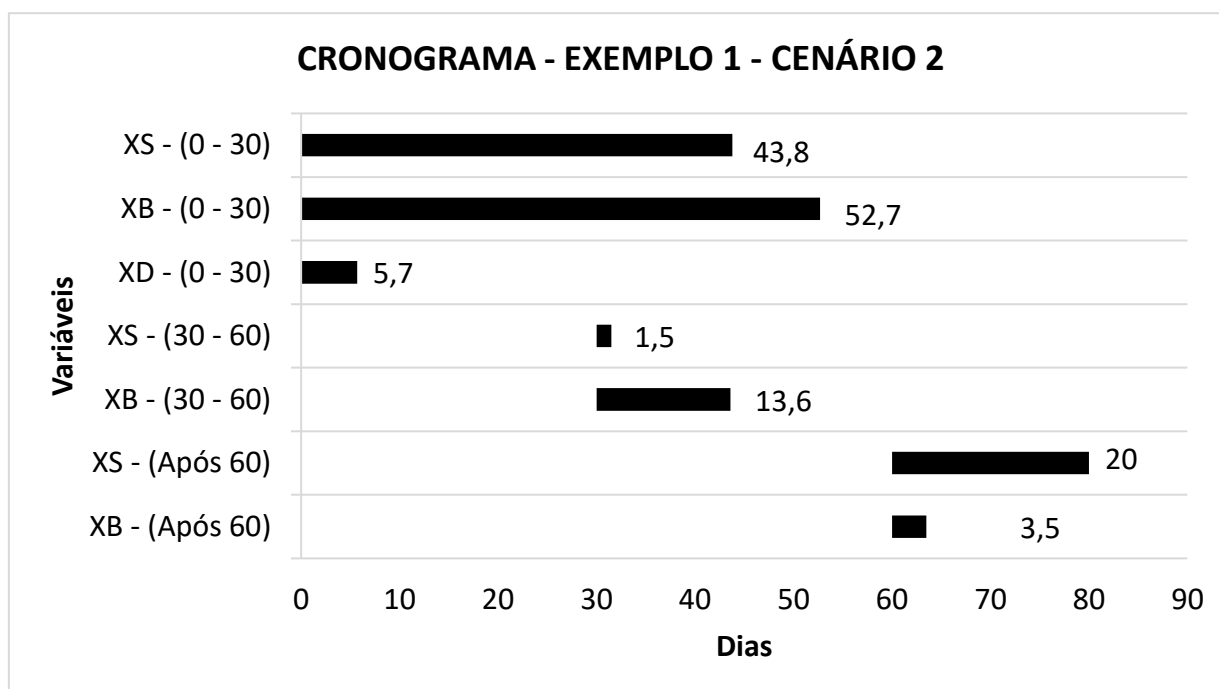
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 21 - Resumo das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 2

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	5,72	4,67

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 5 – Cronograma do Exemplo 1 – Cenário 2



Fonte: elaborado pelo autor

6.1.3 Exemplo 1 – Cenário 3

Os dados do Cenário 3 são os seguintes:

Produção: 1,225 dia/1000 m³

Quantidade de bloqueios: 2

Tempos para liberação dos bloqueios: TK (1) = 30 dias; TK(2) = 60 dias

Prazo da obra (D): 70 dias

O valor da função objetivo para o cenário 3 é de R\$ 2.179.881,88, o que resulta num acréscimo de 10,26% em relação ao Cenário 1, com prazo de 100 dias. Como no Cenário 2, isso decorre do fato de que, com o prazo mais curto, nem todas as movimentações de materiais estavam disponíveis, em razão dos bloqueios. Na Tabela 22 estão os valores das variáveis $XS(s,ca,t)$ mostrando a movimentação dos materiais entre os cortes e os aterros nos determinados intervalos de tempo. Na Tabela 23 estão os valores das variáveis $XB(i,ca,t)$ mostrando a movimentação dos materiais entre as jazidas e os aterros e na Tabela 24 as variáveis $XD(k,s,t)$ indicando os expurgos. Nas Tabelas 25, 26 e 27 estão os resumos das variáveis XS, XB e XD, respectivamente. Na Figura 6 está indicado o cronograma, onde pode-se ver o cumprimento do prazo em exatos 70 dias, valendo aqui as mesmas descrições dos Cenários 1 e 2. Para cumprir o prazo, novamente o modelo optou por expurgar parte dos cortes e utilizar nos aterros um maior volume proveniente das jazidas, conforme pode-se ver no cronograma da Figura 6.

Tabela 22 - Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3 (continua)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	>60	1
2	3	>60	2
3	4	>60	2,5
4	5	>60	2,5
4	6	>60	0,16
9	21	0-30	1,0
10	23	0-30	3,0
11	20	0-30	0,25
11	21	0-30	1,5
11	25	30-60	1,25
12	20	0-30	1,0
13	31	0-30	1,0
14	32	0-30	1,25
14	33	0-30	0,75
15	33	0-30	3,0
16	34	0-30	2,5
16	35	0-30	0,75
16	37	0-30	0,75
17	35	0-30	0,5
17	38	0-30	0,75
17	39	0-30	3,75

Tabela 22 - Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3 (conclusão)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
18	36	0-30	1,25
18	37	0-30	1,75
19	38	0-30	2,0
20	38	0-30	1,0
21	47	0-30	1,0
22	49	0-30	2,5
22	50	0-30	0,5
23	51	0-30	3,0
24	44	0-30	1,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 23 - Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3 (continua)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
2	7	0-30	2,22
2	8	0-30	2,22
2	9	0-30	2,22
2	10	0-30	2,22
2	11	0-30	2,22
2	12	0-30	2,22
2	13	0-30	2,22
2	14	0-30	1,11
2	15	0-30	1,11
2	16	0-30	1,11
2	17	0-30	3,33
2	18	0-30	2,22
2	19	0-30	1,11
2	48	30-60	0,22
2	50	30-60	2,89
2	51	30-60	0,67
3	1	>60	1,11
3	2	>60	1,33
3	3	>-60	0,44
3	6	>-60	2,08
5	22	30-60	3,33
5	23	30-60	0,67
5	24	30-60	3,33
5	26	0-30	1,11
5	27	0-30	1,11
5	28	0-30	2,22
5	29	0-30	2,22
5	30	0-30	1,11
5	31	0-30	0,22
5	40	0-30	3,33
5	41	0-30	1,11
5	42	0-30	1,11
5	43	0-30	1,11

Tabela 23 - Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 1 – Cenário 3 (conclusão)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
5	44	0-30	0,22
5	45	0-30	2,22
5	46	0-30	2,22
5	47	0-30	1,33
5	48	0-30	2,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 24 - Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 3

k (Área para botas-foras)	s (Seção em corte)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	5	0-30	3,33
1	6	0-30	3,0
1	7	0-30	2,0
2	3	0-30	0,5
2	4	0-30	1,34
2	8	0-30	1,0
3	5	0-30	1,67

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 25 - Resumo das variáveis XS (s, ca, t) - Exemplo 1 – Cenário 3

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	43,79	35,75
30-60	1,53	1,25
>60	10,00	8,16

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 26 - Resumo das variáveis XB (i, ca, t) - Exemplo 1 – Cenário 3

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	59,01	48,17
30-60	13,61	11,11
>60	6,08	4,96

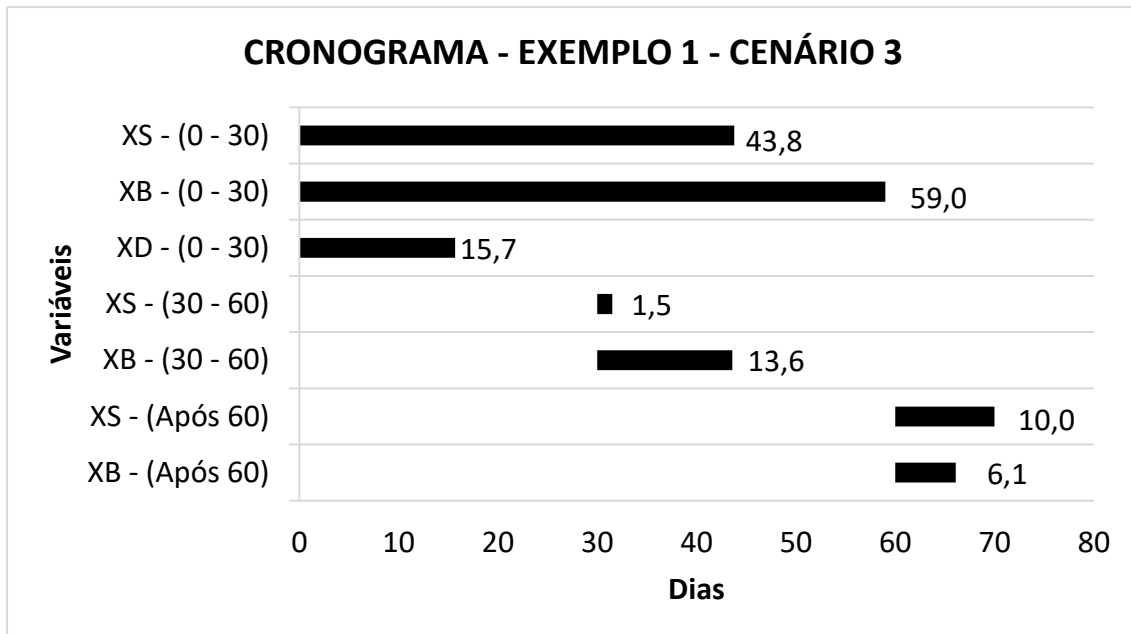
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 27 - Resumo das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 1 – Cenário 3

T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
0-30	15,73	12,84

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 6 - Cronograma do Exemplo 1 – Cenário 3



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 28 - Resumo da movimentação de material do Exemplo 1 – Cenário 1 – Volumes em 1000 m³ - D=100 dias

Origem		Destino		
Cortes	Jazidas	Bota-foras	Aterro (solto)	Aterro (compactado)
58,00	-	-	58,00	46,40
-	52,84	-	52,84	47,56
Total				93,96

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 29 - Resumo da movimentação de material do Exemplo 1 – Cenário 2 – Volumes em 1000 m³ - D=80 dias

Origem		Destino		
Cortes	Jazidas	Bota-foras	Aterro (solto)	Aterro (compactado)
53,33	-	4,67	53,33	42,66
-	56,99	-	56,99	51,29
Total				93,95

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 30 - Resumo da movimentação de material do Exemplo 1 – Cenário 3 – Volumes em 1000 m³ D=70 dias

Origem		Destino		
Cortes	Jazidas	Bota-foras	Aterro (solto)	Aterro (compactado)
45,16	-	12,84	45,16	36,13
-	64,24	-	64,24	57,81
Total				93,94

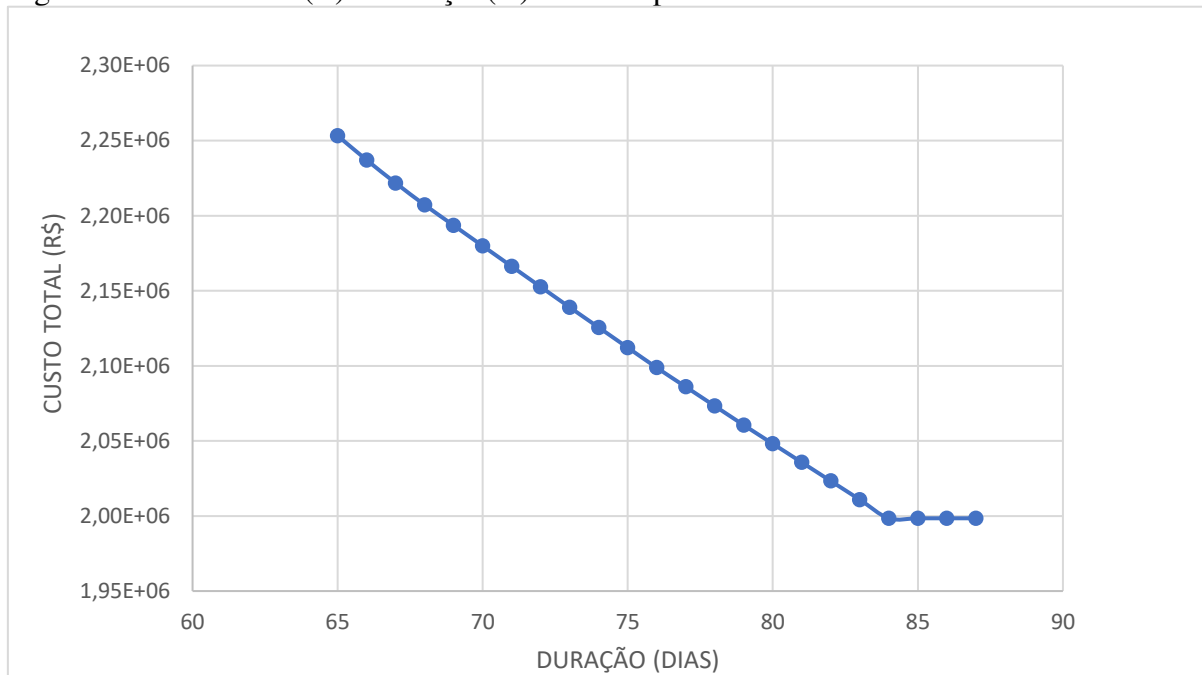
Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando-se a estratégia adotada pelo modelo frente à redução dos prazos, pode-se constatar através das Tabelas 28, 29 e 30, onde constam os resumos das movimentações entre origem e destino dos materiais, que parte do material dos cortes foi sendo expurgada, substituindo-se por material das jazidas, à proporção que os prazos foram se reduzindo.

Pelo que foi observado nos cenários apresentados, nota-se que ao se tentar reduzir os prazos nas obras com bloqueios, mantendo-se as condições de desempenho dos equipamentos e as mesmas taxas de produção, há um aumento nos custos por uma questão logística. O Exemplo 1 foi, assim, executado com vários prazos de conclusão (D) com o objetivo de se verificar dois aspectos principais: o tempo em que D começa a gerar resultados inviáveis (D_1) e o tempo em que começa a resultar em custos constantes (D_2), significando que a partir daí os bloqueios já não interferem nos custos (Figura 7). Para a construção da curva da Figura 7 e a determinação de D_1 e D_2 , o modelo foi processado para prazos D decrescentes até resultar em um valor inviável (*infeasible*), com precisão de um dia, que é o valor D_1 . Processasse a seguir o modelo com valores crescentes de D até resultar em valores constantes para a função objetivo, sendo este o valor de D_2 . Foi encontrado então D_1 igual a 65 dias e D_2 igual a 86 dias. Cabe aqui esclarecer que esses limites só fazem sentido se os bloqueios estiverem incorporados ao modelo matemático desenvolvido, caso contrário, o prazo pode ser inferior ao limite D_1 , por exemplo, mas com um reflexo ainda maior sobre os custos, o que será visto nos próximos três cenários.

Com relação à nomenclatura das variáveis, indicadas nas tabelas e cronogramas, a indicação $XS(0 - 30)$, por exemplo, significa a movimentação entre cortes e aterros a partir de “0” (início da obra), no primeiro intervalo de tempo entre os bloqueios. $XS(30 - 60)$ é a movimentação a partir de 30 dias e $XS(>60)$, a partir de 60 dias. No Exemplo 1, a obra foi dividida em três intervalos de tempo, em dias: 0-30, 30-60 e a partir de 60.

Figura 7 - Curva Custo(C) x Duração(D) do Exemplo 1



Fonte: elaborado pelo autor

Existem muitas formas de se realizar a movimentação de materiais numa obra de terraplenagem. Mas é razoável que se procure minimizar os custos ou o prazo. Nos cenários anteriores viu-se que ao se tentar reduzir o prazo houve um aumento no custo porque nem todo o material existente estava acessível, em decorrência dos bloqueios. Conforme se pode ver nos cronogramas, os serviços são executados à proporção que os bloqueios são liberados. No caso em que se decida por uma redução mais drástica no prazo é possível uma forma de ataque simultâneo, em três frentes. Por exemplo, na figura 3 do Exemplo 1, divide-se o trecho em três segmentos: do km 0 até o km 4,1 (Bloqueio 2), do km 4,1 ao km 18,6 (Bloqueio 1) e do km 18,6 até o final. Assim empregam-se três patrulhas nesses segmentos simultaneamente, com o intuito de se reduzir ainda mais o tempo de execução da obra. No Cenário 4 serão analisados os reflexos nos custos a partir dessa decisão.

6.1.4 Exemplo 1 – Cenário 4

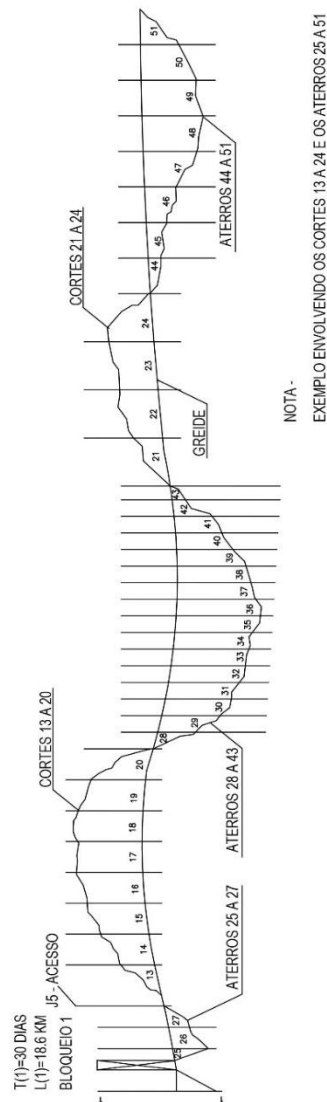
Esse cenário é o problema de distribuição de materiais de terraplenagem sem bloqueios e resolvido também através dos recursos da Programação Linear. Aqui foi utilizado o mesmo equacionamento do Capítulo 3 sem considerar as restrições dos bloqueios, com os três segmentos em que o trecho foi subdividido analisados separadamente. Dessa forma, se os

três segmentos fossem atacados simultaneamente, para se conseguir uma redução no prazo de conclusão da obra, o custo mínimo seria a soma dos custos de execução desses três segmentos.

6.1.4.1 Segmento 1

O primeiro segmento está indicado na Figura 8, correspondente ao segmento entre o km 18,6 (Bloqueio 1) e o final da obra, com os quantitativos da Tabela 31.

Figura 8 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, aterros, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 1



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 31 – Quantitativos de cortes e aterros do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 1

Cortes	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)
1	0,00	1	0,00	25	1,00
2	0,00	2	0,00	26	1,00
3	0,00	3	0,00	27	1,00
4	0,00	4	0,00	28	2,00
5	0,00	5	0,00	29	2,00
6	0,00	6	0,00	30	1,00
7	0,00	7	0,00	31	1,00
8	0,00	8	0,00	32	1,00
9	0,00	9	0,00	33	3,00
10	0,00	10	0,00	34	2,00
11	0,00	11	0,00	35	1,00
12	0,00	12	0,00	36	1,00
13	1,00	13	0,00	37	2,00
14	2,00	14	0,00	38	3,00
15	3,00	15	0,00	39	3,00
16	4,00	16	0,00	40	3,00
17	5,00	17	0,00	41	1,00
18	3,00	18	0,00	42	1,00
19	2,00	19	0,00	43	1,00
20	1,00	20	0,00	44	1,00
21	1,00	21	0,00	45	2,00
22	3,00	22	0,00	46	2,00
23	3,00	23	0,00	47	2,00
24	1,00	24	0,00	48	2,00
				49	2,00
				50	3,00
				51	3,00

Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo de programação linear sem bloqueios relativo ao Segmento 1 resulta no valor da função objetivo de R\$ 1.101.107,39, com a distribuição indicada nos Tabelas 32 e 33.

Tabela 32 – Resultados das variáveis XS (s, ca) do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 1

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
13	31	1
14	32	1,25
14	33	0,75
15	33	3,00
16	34	2,50
16	38	1,5
17	35	1,25
17	39	3,75
18	36	1,25
18	37	1,75
19	37	0,75
19	38	1,25
20	38	1,00
21	47	1,00
22	49	2,50
22	50	0,50
23	51	3,00
24	44	1,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 33 - Resultados das variáveis XB (i, ca) do Exemplo 1 - Cenário 4 – Segmento 1

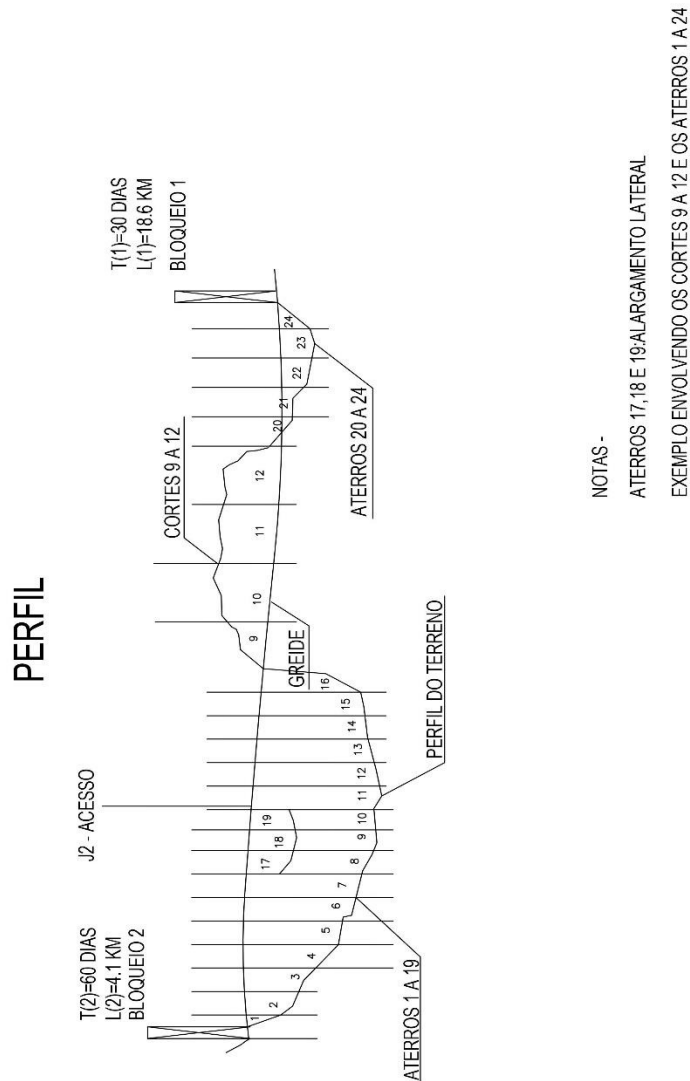
i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
5	25	1,11
5	26	1,11
5	27	1,11
5	28	2,22
5	29	2,22
5	30	1,11
5	31	0,22
5	40	3,33
5	41	1,11
5	42	1,11
5	43	1,11
5	44	0,22
5	45	2,22
5	46	2,22
5	47	1,33
5	48	2,22
5	50	2,89
5	51	0,67

Fonte: elaborada pelo autor.

6.1.4.2 Segmento 2

Trata-se do segmento indicado na Figura 9, correspondente ao trecho entre o km 4,1 (Bloqueio 2) e o km 18,6 (Bloqueio 1) com os quantitativos indicados no Tabela 34.

Figura 9 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, aterros, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1 – Cenário 4 - Segmento 2.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 34 - Quantitativos de cortes e aterros do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 2

Cortes	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)
1	0,00	1	1,00	25	0,00
2	0,00	2	2,00	26	0,00
3	0,00	3	2,00	27	0,00
4	0,00	4	2,00	28	0,00
5	0,00	5	2,00	29	0,00
6	0,00	6	2,00	30	0,00
7	0,00	7	2,00	31	0,00
8	0,00	8	2,00	32	0,00
9	1,00	9	2,00	33	0,00
10	3,00	10	2,00	34	0,00
11	3,00	11	2,00	35	0,00
12	1,00	12	2,00	36	0,00
13	0,00	13	2,00	37	0,00
14	0,00	14	1,00	38	0,00
15	0,00	15	1,00	39	0,00
16	0,00	16	1,00	40	0,00
17	0,00	17	3,00	41	0,00
18	0,00	18	2,00	42	0,00
19	0,00	19	1,00	43	0,00
20	0,00	20	1,00	44	0,00
21	0,00	21	2,00	45	0,00
22	0,00	22	3,00	46	0,00
23	0,00	23	3,00	47	0,00
24	0,00	24	3,00	48	0,00
				49	0,00
				50	0,00
				51	0,00

Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo de Programação Linear sem bloqueios relativo ao Segmento 2 resulta no valor da função objetivo de R\$ 936.836,78, com a distribuição indicada nas Tabelas 35 e 36.

Tabela 35 - Resultados das variáveis XS (s, ca) do Exemplo 1 - Cenário 4 – Segmento 2.

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
9	16	1,0
10	23	3,0
11	12	0,25
11	13	2,5
11	20	0,25
12	20	1,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 36 - Resultados das variáveis XB (i, ca) do Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 2.

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
2	7	2,22
2	8	2,22
2	9	2,22
2	10	2,22
2	11	2,22
2	12	2,0
2	14	1,11
2	15	1,11
2	16	0,22
2	17	3,33
2	18	2,22
2	19	1,11
3	1	1,11
3	2	2,22
3	3	2,22
3	4	2,22
3	5	2,22
3	6	2,22
5	21	2,22
5	22	3,33
5	23	0,67
5	24	3,33

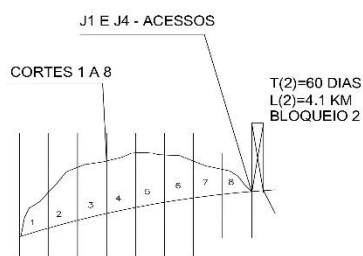
Fonte: elaborada pelo autor.

6.1.4.3 Segmento 3

O Segmento 3 está indicado na Figura 10, correspondente ao trecho entre o km 0 e o km 4,1 (Bloqueio 2) com os quantitativos indicados na Tabela 37.

Figura 10 – Perfil natural do terreno e greide com numeração dos cortes, estaqueamento e indicação dos bloqueios – Exemplo 1 – Cenário 4 – Segmento 3.

PERFIL



NOTA -
EXEMPLO ENVOLVENDO OS CORTES 1 A 8

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 37 - Quantitativos de cortes e aterros do Exemplo 1 - Cenário 4 – Segmento 3.

Cortes	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)
1	1,00	1	0,00	25	0,00
2	2,00	2	0,00	26	0,00
3	3,00	3	0,00	27	0,00
4	4,00	4	0,00	28	0,00
5	5,00	5	0,00	29	0,00
6	3,00	6	0,00	30	0,00
7	2,00	7	0,00	31	0,00
8	1,00	8	0,00	32	0,00
9	0,00	9	0,00	33	0,00
10	0,00	10	0,00	34	0,00
11	0,00	11	0,00	35	0,00
12	0,00	12	0,00	36	0,00
13	0,00	13	0,00	37	0,00
14	0,00	14	0,00	38	0,00
15	0,00	15	0,00	39	0,00
16	0,00	16	0,00	40	0,00
17	0,00	17	0,00	41	0,00
18	0,00	18	0,00	42	0,00
19	0,00	19	0,00	43	0,00
20	0,00	20	0,00	44	0,00
21	0,00	21	0,00	45	0,00
22	0,00	22	0,00	46	0,00
23	0,00	23	0,00	47	0,00
24	0,00	24	0,00	48	0,00
				49	0,00
				50	0,00
				51	0,00

Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo de Programação Linear sem bloqueios relativo ao Segmento 3 resulta no valor da função objetivo de R\$ 263.666,00, com a distribuição indicada no Tabela 38. Observe-se que nesse modelo há apenas expurgos.

Tabela 38 - Resultados das variáveis XD (k, s) do Exemplo 1 - Cenário 4 - Segmento 3 (continua)

k (Área para bota-foras)	s (Seção em corte)	Volume (1000 m ³)
1	5	2,33
1	6	3,00
1	7	2,00
1	8	1,00

Tabela 38 - Resultados das variáveis XD (k, s) do Exemplo 1 - Cenário 4 – Segmento 3 (conclusão)

k (Área para bota-foras)	s (Seção em corte)	Volume (1000 m ³)
2	3	1,67
2	4	4,00
2	5	2,67
3	1	1,00
3	2	2,00
3	3	1,33

Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma, o custo mínimo total da obra com ataque simultâneo nos três segmentos é a soma indicada na Tabela 39.

Tabela 39 - Resumo do Exemplo 1 – Cenário 4 - Segmentos 1, 2 e 3

Segmento	Função Objetivo (R\$)
1	1.101.107,39
2	936.836,78
3	263.666,00
TOTAL	2.301.610,17

Fonte: elaborada pelo autor.

Na Tabela 40 estão indicados os reflexos nos custos da decisão de ataque simultâneo dos três segmentos. O custo total com ataque simultâneo é de R\$ 2.301.610,17, o que resulta nos significativos reflexos de 16,41 %, em relação ao Cenário 1, com bloqueios com o prazo da obra *D* de 100 dias e de 12,38% em relação ao Cenário 2, com prazo *D* de 80 dias. Nos casos em que houver prioridade do prazo em relação aos custos, pode-se utilizar a curva Custo x Duração (Figura 7) para se analisar o reflexo dessa decisão.

Tabela 40 - Reflexo nos custos da redução do prazo de execução – Exemplo 1

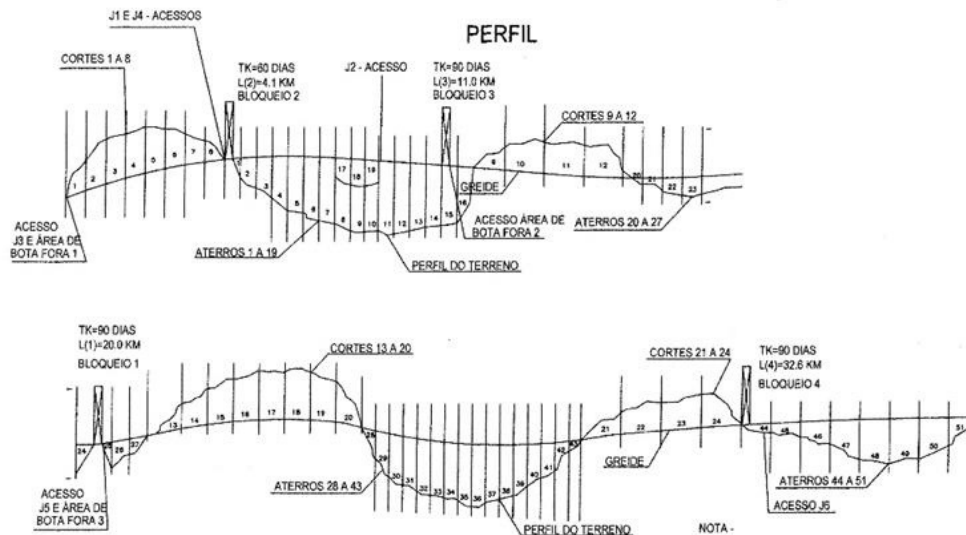
Cenário	Valor(R\$)	Prazo (Dias)	Acréscimo
A) Cenário 4 (separados)	2.301.610,17	60	-
B) Programação Linear com 2 bloqueios (Cenário 1)	1.977.075,35	100	16,41 % (A/B)
C) Programação Linear com 2 bloqueios (Cenário 2)	2.048.109,52	80	12,38 % (A/C)
D) Programação Linear com 2 bloqueios (Cenário 3)	2.179.881,88	70	5,58% (A/D)

Fonte: elaborada pelo autor.

6.2 Exemplo 2

Esse exemplo tem o objetivo de avaliar como a distribuição de materiais pode ser planejada incorporando-se interferências no modelo de Programação Linear. Assim, é apresentada uma análise de sensibilidade que avalia como o número de bloqueios e os diferentes prazos de conclusão (D) podem influenciar no custo total das obras. No Exemplo 2 (Figura 11), foi considerada uma rodovia com 36 km de extensão com quatro bloqueios, seis jazidas, três áreas para bota-foras, vinte e quatro seções em corte e cinquenta e uma seções em aterros. Os dados deste exemplo e as planilhas com resultados estão no Apêndice A.

Figura 11 – Trecho de rodovia para o Exemplo 2

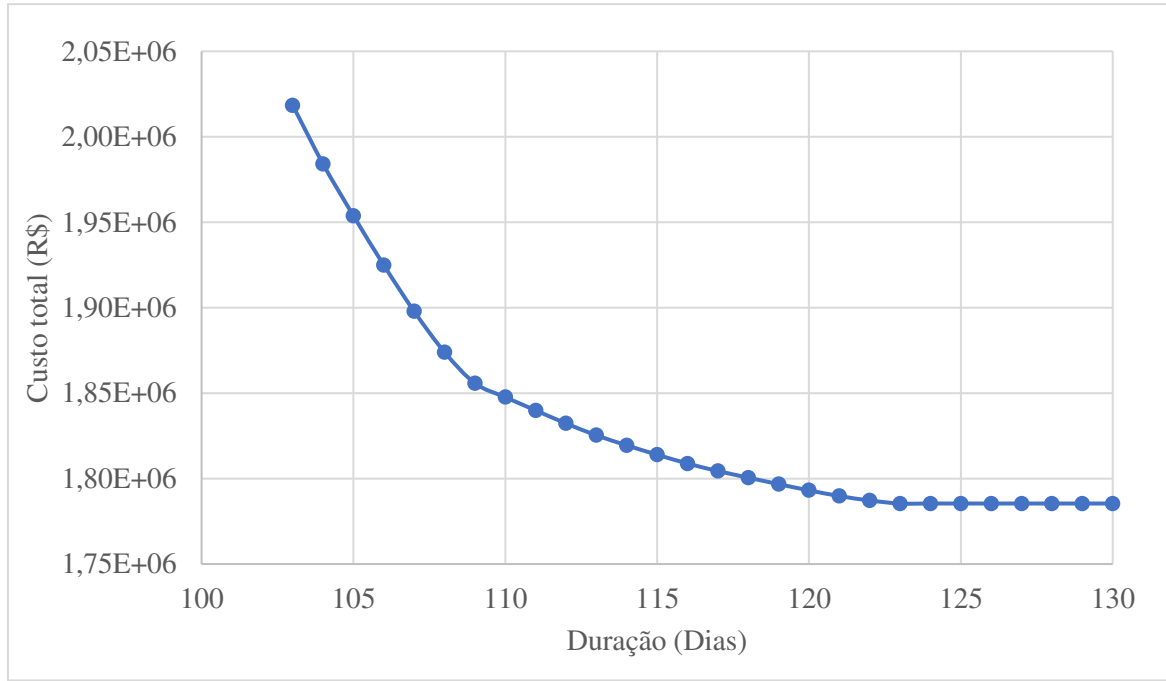


Fonte: elaborada pelo autor

Nesse exemplo, o modelo foi processado com os prazos D indicados na Figura 12, adotando-se o mesmo procedimento do Exemplo 1, com o objetivo de se determinar os limites D_1 e D_2 , já definidos no item 6.1.3. Os prazos indicados no gráfico são os prazos viáveis com precisão de um dia. Dessa forma, a Figura 12 mostra que $D_1=103$ dias é o prazo de execução mais curto onde há uma solução viável e mostra que para $D > D_2=123$ dias, o custo da obra não varia com o prazo. Assim, para o cenário em que $D > D_2=123$ dias, o modelo em Programação Linear foi capaz de esperar a remoção dos bloqueios encontrando uma solução mais econômica para a alocação dos materiais provenientes dos cortes e jazidas para os aterros e bota-foras. Ao

contrário, para $D < D_2 = 123$ dias nem todas as movimentações entre origem e destino, analisadas pelo modelo,

Figura 12 - Variação do custo do projeto com o prazo de execução – Exemplo 2

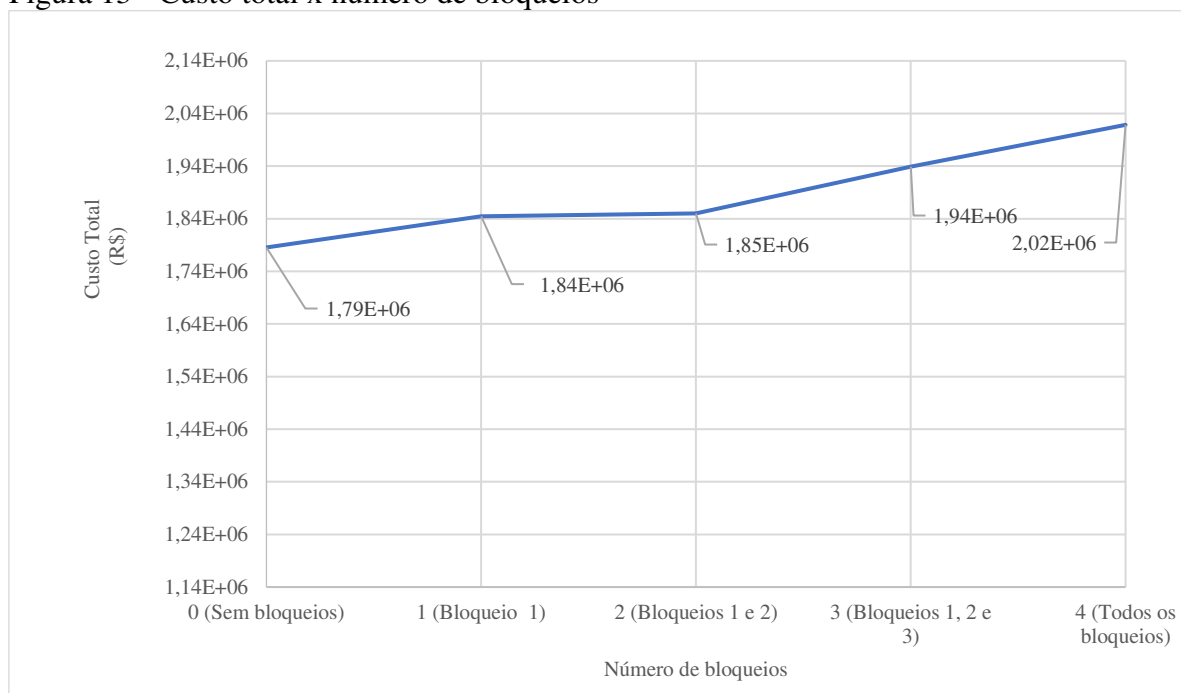


Fonte: elaborado pelo autor

são viáveis, forçando o modelo a escolher entre alternativas mais custosas. Como exemplo, verifica-se que o cenário com $D=103$ dias é 11,54 % mais caro do que aquele com $D=123$ dias. Nesse caso a curva Custo (C) x Duração(D) (Figura 12) tem um formato aproximado de uma hipérbole, com um incremento mais intenso do custo nas proximidades de D_1 e mais suave próximo a D_2 , pois ao se tentar aproximar a duração de D_1 , poucos bloqueios estão liberados e o modelo é obrigado a optar por alternativas mais onerosas. Ao se aproximar de D_2 ocorre o inverso até que todas as alternativas estão liberadas e o valor de C permanece constante.

Após se analisar a influência dos prazos nos custos, através do Exemplo 2 foi possível se avaliar a importância das interferências na modelagem comparando-se as diferenças nos custos considerando-se ou não os bloqueios. Portanto, foi adotado um prazo de execução constante de $D=103$ dias, por ser o menor prazo viável, e cinco cenários (Figura 13) onde o primeiro ignorou os quatro bloqueios e considerou os 36 km como um trecho contínuo, ao passo que nos outros cenários incluiu-se, consecutivamente de um a quatro bloqueios, que são as interferências mostradas na Figura 11.

Figura 13 - Custo total x número de bloqueios



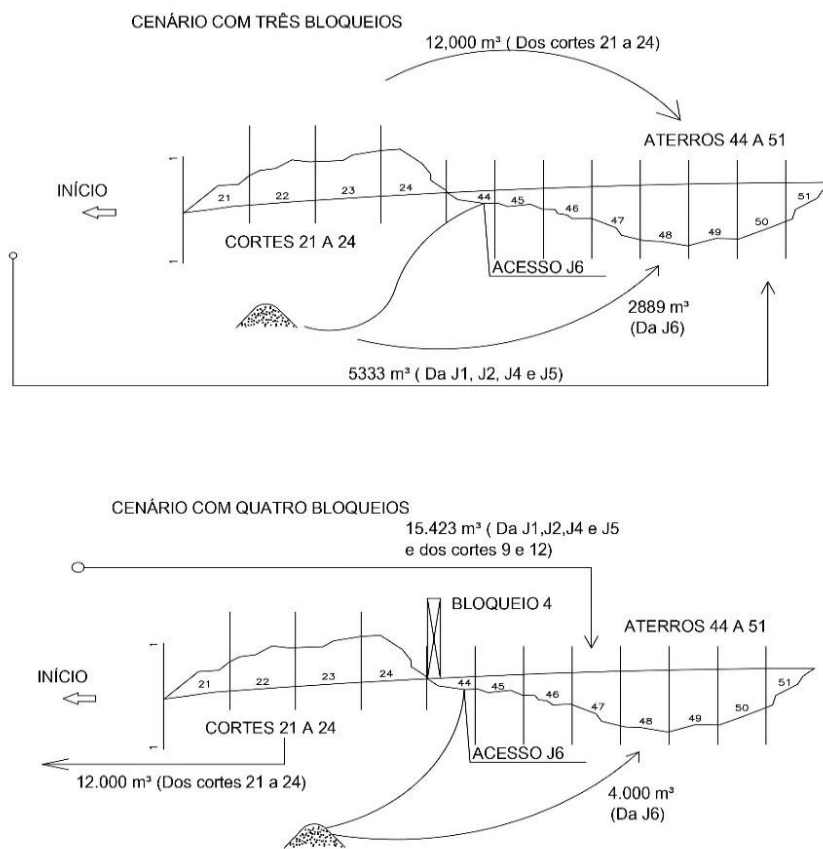
Fonte: elaborado pelo autor

Como mostrado na Figura 13, os custos de terraplenagem crescem com o número de bloqueios, apresentando um acréscimo de 13,05% ao se comparar o cenário com quatro bloqueios com o cenário sem bloqueios. Conseqüentemente, foi possível observar que ao se ignorar os bloqueios, ignora-se também os custos adicionais decorrentes das mudanças dos planos iniciais da movimentação dos materiais. Como exemplo (Figura 14), o cenário com três bloqueios não considerou o Bloqueio 4, ao contrário do último cenário, com todos os bloqueios. Dessa forma, as seções em aterro de 44 a 51 receberam 17.333 m³ de solo das seções em corte 21 a 24 e das jazidas J1, J2, J4 e J5, e apenas 2.889 m³ da J6, que é a jazida mais custosa. Contudo, quando o Bloqueio 4 é considerado, as seções em aterro 44 a 51 só podem receber material das seções em corte e das jazidas J1, J2, J4 e J5, depois de 90 dias, limitando o intervalo de tempo para alocações de material que não sejam procedentes da J6. Portanto as seções em aterro 44 a 51 recebem 4.000 m³ da J6 e 15.423 m³ de outras fontes (J1, J2, J4, J5 e seções em corte 9 e 12), no cenário com quatro bloqueios, representando R\$ 187.985,70 em custos adicionais apenas para aterrar as seções de 44 a 51.

Durante a análise da influência dos bloqueios nos custos, nota-se que a menor variação foi entre o cenário com dois bloqueios (Bloqueios 1 e 2) e o cenário com um bloqueio (apenas o Bloqueio 1). Isso se deve a dois aspectos principais. Primeiro, o Bloqueio 2 tem o mais curto tempo de liberação. Conseqüentemente há poucas movimentações bloqueadas pelo Bloqueio 2 que são mais vantajosas que aguardar sua remoção por sessenta dias, gerando apenas

pequenas mudanças nos custos totais entre os cenários com 1(um) bloqueio (sem o Bloqueio 2) e com dois bloqueios (com o Bloqueio 2). Segundo, o Bloqueio 2 tem apenas uma pequena influência nas movimentações próximas ao Bloqueio 1. Portanto, poucas dessas movimentações mudaram quando o Bloqueio 2 foi considerado (cenário com dois bloqueios) ou não (cenário com um bloqueio). Os resultados desse exemplo estão detalhados no Apêndice A.

Figura 14 - Esquema de movimentação dos cenários com três e quatro bloqueios – Exemplo 2



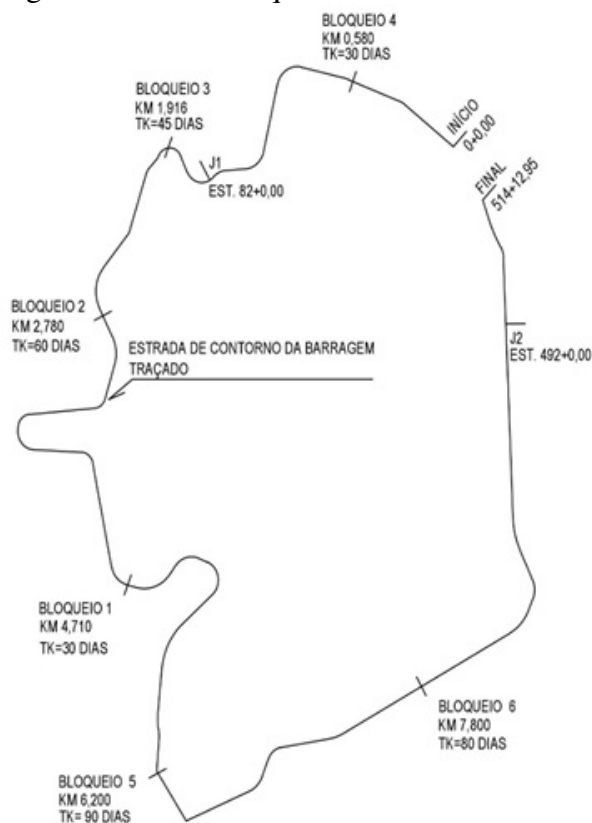
Fonte: elaborado pelo autor

6.3 Exemplo 3

O objetivo do Exemplo 3 é mostrar como o modelo pode ser aplicado na prática e, dessa forma, o modelo em Programação Linear foi utilizado num projeto viário real com interferências. Além disso, esse exemplo comparou a solução otimizada com o orçamento inicial do projeto para se avaliar os reflexos financeiros a favor do modelo.

A obra analisada é a via de manutenção da barragem do Rio Maranguapinho localizada nos municípios de Maracanaú e Maranguape, no Estado do Ceará. Essa via foi projetada para permitir o acesso dos equipamentos de manutenção das linhas de transmissão de energia e possui 10,58 km de extensão por 5,30 m de largura. A via tem um traçado em circuito fechado (Figura 15) e com apenas quatro pontos de acesso dos equipamentos: o início, o final do trecho e os acessos das jazidas J1 e J2. Dessa forma as equipes não podem acessar o trecho pelas laterais, sendo esses pontos os únicos meios de acesso para o transporte de material. Além disso seis interferências foram incluídas no projeto, todas referentes a construção de bueiros, como indicado na Figura 15. Previamente, as seções em corte e aterro da via foram definidas a partir do projeto geométrico e, demais dados, a partir dos estudos geotécnicos. Assim, a via foi dividida em cinco seções em corte e cinquenta e duas seções em aterro, como mostra a Tabela 41.

Figura 15 - Planta esquemática da Estrada de Contorno da Barragem do Rio Maranguapinho



Fonte: elaborada pelo autor com base em projeto da Secretaria das Cidades do Estado do Ceará

Tabela 41 - Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 3

Cortes	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)
1	0,065	1	0,540	25	2,865
2	0,378	2	0,446	26	0,436
3	0,008	3	1,128	27	0,748
4	0,136	4	0,744	28	0,780
5	0,067	5	0,277	29	0,611
		6	0,440	30	0,881
		7	0,688	31	2,524
		8	0,652	32	0,280
		9	0,603	33	0,299
		10	1,192	34	0,721
		11	0,413	35	0,775
		12	1,134	36	0,552
		13	3,109	37	0,712
		14	3,489	38	0,634
		15	1,563	39	0,629
		16	1,690	40	0,524
		17	1,118	41	0,418
		18	0,554	42	0,534
		19	0,909	43	0,581
		20	1,579	44	0,532
		21	2,902	45	0,766
		22	3,836	46	0,534
		23	4,197	47	0,520
		24	3,532	48	0,684
				49	1,128
				50	1,640
				51	0,865
				52	0,507

Fonte: elaborada pelo autor.

Seguindo a metodologia de otimização do Capítulo 3, foram importados pelo IBM CPLEX os custos unitários, o posicionamento dos bloqueios, seus prazos de liberação, índices de produtividade da frota, prazo de conclusão da obra e demais dados geométricos e geotécnicos, que estão indicados na Tabela 42 e no Apêndice B.

Tabela 42 – Custos unitários do projeto para o Exemplo 3

Discriminação	Unid	Preço unit.
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT 50 a 200 m	m³	7,82
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 200 a 400 m	m³	8,66
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 400 a 600 m	m³	9,12
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 600 a 800 m	m³	10,04
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 800 a 1000 m	m³	10,53
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1000 a 1200 m	m³	10,72
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1200 a 1400 m	m³	11,63
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1400 a 1600 m	m³	12,05
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1600 a 1800 m	m³	12,91
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1800 a 2000 m	m³	13,36
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 2000 a 3000 m	m³	13,70
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 3000 a 4000 m	m³	15,78
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 4000 a 5000 m	m³	17,52
Escavação e carga 1ª cat. DMT> 5000 m (*)	m³	5,21

(*) Transporte calculado separadamente

Custo unitário de transportes com distâncias maiores que 5,0 km calculados pela função linear $Y=0,62X + 0,9$, conforme SEINFRA-026.

Y: custo por tonelada

X: distância de transporte em km

Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, o modelo em Programação Linear apresentou um custo total $Z = R\$ 896.214,57$ e a distribuição otimizada está apresentada na forma das variáveis XS , movimento entre cortes e aterros (Tabela 43) XB , movimento entre jazidas e aterros (Tabela 44) e XD , para o movimento entre os cortes e as áreas de bota-foras. Contudo, a única área para bota-foras disponível não foi utilizada, já que todo o material dos cortes foi destinado aos aterros, tornando, assim, todos os valores de XD , iguais a zero.

Tabela 43 - Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 3

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	Início T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	31	60	0,065
2	25	60	0,378
3	12	45	0,008
4	29	45	0,136
5	33	80	0,067

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 44 - Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 3 (continua)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	Início T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	1	30	0,540
1	2	30	0,445
1	3	45	1,128
1	4	0	0,744
1	5	45	0,276
1	6	30	0,440
1	7	45	0,688
1	8	0	0,652
1	9	30	0,603
1	10	0	1,192
1	11	45	0,413
1	12	45	1,125
1	13	45	3,107
1	14	45	3,488
1	15	60	1,562
1	16	60	1,689
1	17	60	1,118
1	18	60	0,554
1	19	60	0,909
1	20	60	1,578
1	21	60	2,900
1	22	60	3,835
1	23	60	4,195
1	25	60	2,485

Tabela 44 - Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 3 (conclusão)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	Início T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	26	60	0,436
1	27	60	0,748
1	28	60	0,780
1	29	60	0,475
1	30	60	0,881
1	31	60	1,585
1	34	90	0,721
1	35	90	0,774
1	36	90	0,552
1	37	90	0,711
1	38	90	0,633
1	39	90	0,370
2	24	90	3,530
2	31	90	0,872
2	32	80	0,280
2	33	80	0,231
2	39	80	0,259
2	40	30	0,524
2	41	45	0,418
2	42	45	0,533
2	43	30	0,580
2	44	45	0,532
2	45	30	0,765
2	46	45	0,534
2	47	45	0,519
2	48	45	0,684
2	49	30	1,127
2	50	45	1,639
2	51	45	0,864
2	52	45	0,507

Fonte: elaborada pelo autor.

A Tabela 43 apresenta todos os volumes otimizados relacionados às movimentações entre cortes e aterros (XS), descrevendo a origem de cada corte s , o destino ca e o tempo $T(t)$, a contar do início da obra em que essas movimentações acontecem. Da mesma forma, a Tabela 44 apresenta todos os volumes otimizados relacionados às movimentações entre jazidas e aterros (XB), descrevendo a origem i de cada alocação, o destino ca e o tempo $T(t)$.

Com os tempos $T(t)$, os volumes XS e XB e as produtividades estimadas ($1/PS$, $1/PB$ e $1/PD$ em dia/1000 m³) (Apêndice B), foi construído um cronograma, elaborado a partir da Tabela 45, onde no eixo x se representa o tempo de execução e no eixo y as variáveis XS e XB , com os respectivos tempos de início, conforme representado na Figura 16.

O cronograma da Figura 16 mostra duas importantes características do modelo. Primeiro, o modelo considera diferentes equipes trabalhando em paralelo tanto nas operações dos cortes para os aterros, bem como das jazidas para os aterros. Segundo, mostra que os

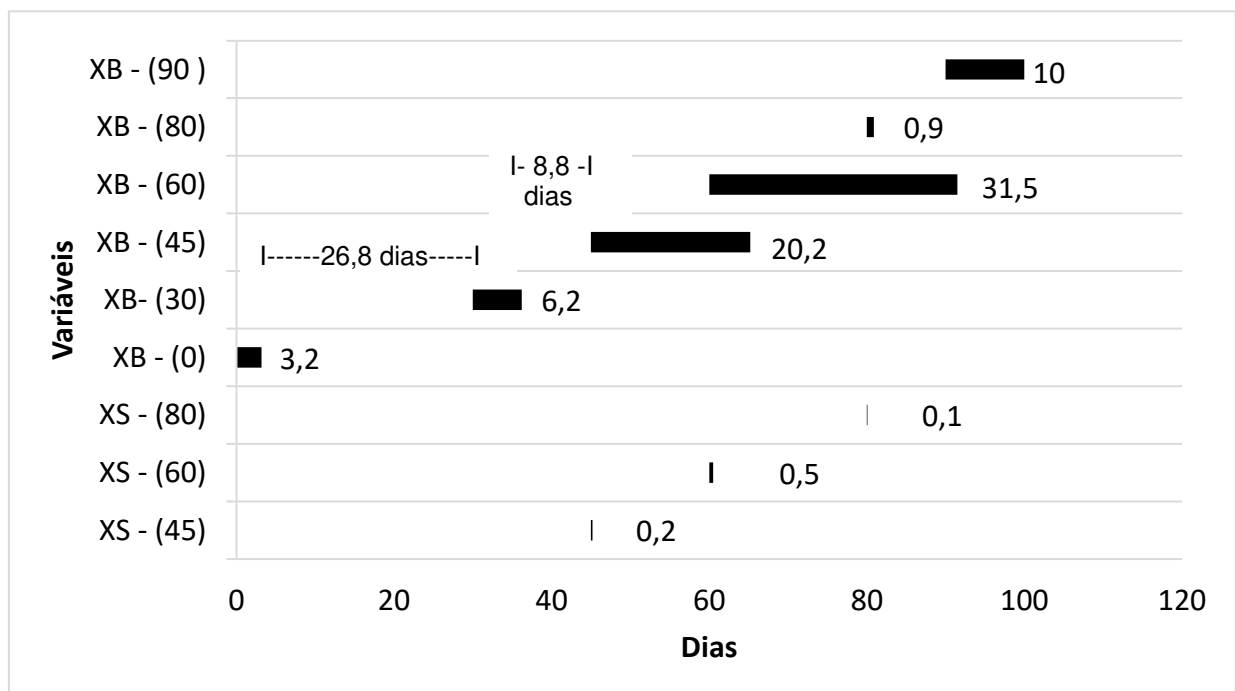
bloqueios podem gerar longos intervalos de tempo com os equipamentos ociosos. Para ilustrar isso, verifica-se que há dois intervalos na Figura 16. O primeiro está localizado entre o fim das movimentações entre jazidas e aterros iniciadas em $T(t)=0$ e a remoção dos Bloqueios 1 e 4 (26,8 dias), e o segundo está localizado entre o final das movimentações entre jazidas e aterros iniciadas em $T(t) = 30$ dias e a remoção do Bloqueio 3 (8,8 dias).

Tabela 45 - Resumo das variáveis XS (s, ca, t) e XB (i,ca,t) do Exemplo 3

Início T(t) (Dias)	Duração (Dias)	Volume (1000 m ³)
	XS (s, ca, t)	
45	0,18	0,144
60	0,54	0,443
80	0,08	0,067
	XB (i, ca, t)	
0	3,17	2,588
30	6,15	5,024
45	20,16	16,455
60	31,52	25,730
80	0,94	0,770
90	10,00	8,163

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16 - Cronograma para o Exemplo 3



Fonte: elaborado pelo autor

Finalmente, nas Tabelas 46 e 47, estão apresentados para efeito de comparação o orçamento original da obra e um novo orçamento que foi elaborado baseado nos resultados otimizados e nos custos da Tabela SEINFRA – 026, onde três tipos de custos unitários para as operações de terraplenagem foram utilizados: um custo unitário para escavação, carga e transporte baseado em diferentes intervalos de distâncias de transporte; um custo unitário para espalhamento, homogeneização e compactação, baseado no volume compactado; e um custo unitário para distâncias de transporte superiores a 5 km, baseado no peso de material transportado. Além disso essa tabela também apresenta o orçamento original para efeito de comparação

O orçamento otimizado apresentou uma redução de custos de 2,12% comparado com o orçamento original, que não considerou as interferências nesse planejamento. Conseqüentemente, a solução original não apenas ignorou os bloqueios, mas também escolheu uma movimentação mais custosa. Por exemplo, 79,3% (47.116,68 m³) das movimentações do projeto original têm distâncias maiores que 2 km, enquanto a solução otimizada apresentou 50,9% (30.250,62 m³), como mostra a Tabela 47.

Tabela 46 - Orçamento de projeto para o Exemplo 3

Discriminação	Unid	Quant.	Preço unit.	Totais
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria com trator sobre esteiras 347 HP e caçamba 6m ³ , DMT 50 a 200 m	m ³	8.328,46	7,82	65.128,56
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 400 a 600 m	m ³	873,80	9,12	7.969,06
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1000 a 1200 m	m ³	2.960,43	10,72	31.735,81
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1400 a 1600 m	m ³	135,74	12,05	1.635,67
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 2000 a 3000 m	m ³	42.755,08	13,70	585.744,60
Escavação e carga, 1ª cat. DMT>5000 m	m ³	4.361,60	5,21	22.723,94
Transp. local com DMT entre 4,01 E 30 km - $Y=0,62X + 0,9$ - DMT=5,77 km	t	7.545,57	4,48	33.804,15
Compactação de aterros a 95% Proctor Normal	m ³	51.665,31	3,23	166.878,95
Total geral				915.620,74

Fonte: elaborado pelo autor com base em projeto da Secretaria das Cidades do Estado do Ceará

Tabela 47 - Orçamento otimizado do projeto para o Exemplo 3 (continua)

Discriminação	Unid	Quant.	Preço unit.	Totais
Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT 50 a 200 m	m ³	4.028,95	7,82	31.506,39
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 200 a 400 m	m ³	3.563,88	8,66	30.791,92
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 400 a 600 m	m ³	1.878,60	9,12	17.132,83
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 600 a 800 m	m ³	1.935,13	10,04	19.428,71
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 800 a 1000 m	m ³	4.616,63	10,53	48659,28
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1000 a 1200 m	m ³	5147,61	10,72	55.182,38
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1200 a 1400 m	m ³	2.588,25	11,63	30.127,23
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1400 a 1600 m	m ³	2.761,90	12,05	33.280,90
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1600 a 1800 m	m ³	1.535,82	12,91	19.796,72
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 1800 a 2000 m	m ³	1.078,02	13,36	14380,79
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 2000 a 3000 m	m ³	14.121,46	13,70	193.464,00
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 3000 a 4000 m	m ³	5.832,14	15,78	92.031,17
Escavação, carga e transp. 1ª cat. DMT 4000 a 5000 m	m ³	2.940,90	17,52	51.406,93
Escavação e carga 1ª cat. DMT > 5000 m	m ³	7.356,13	5,21	38.325,44
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,08 km) (*)	t	1.247,15	4,05	5.050,96

Tabela 47 - Orçamento otimizado do projeto para o Exemplo 3 (conclusão)

Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,16 km) (*)	t	6.107,06	4,10	25.038,95
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,17 km) (*)	t	112,45	4,11	462,17
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,28 km) (*)	t	1.339,30	4,17	5.584,88
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,48 km) (*)	t	954,22	4,30	4.103,15
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,68 km) (*)	t	1.230,76	4,42	5.439,96
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,77 km) (*)	t	0,00	4,48	00,00
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 5,88 km) (*)	t	1.095,72	4,55	4.985,53
Transp. local com DMT >5000 m (DMT = 6,08 km) (*)	t	639,44	4,67	2.986,18
Compactação de aterros	m ³	51.665,31	3,23	166.878,95
Total geral				896.214,57

(*) Custo unitário de transportes com distâncias maiores que 5,0 km calculados pela função linear $Y=0,62X + 0,9$, conforme SEINFRA-026.

Y: custo por tonelada

X: distância de transporte em km

Fonte: elaborado pelo autor.

6.4 Performance do modelo

Em geral, os tempos de processamento (incluindo importação de dados) foram consideravelmente baixos para todos os cenários e exemplos testados. No Exemplo 2, a primeira análise relacionada com a duração do projeto testou 28 cenários no qual o tempo de processamento levou em média 3,49 s, apresentando um valor mínimo de 3,01 s e um valor máximo de 3,92 s. Para a segunda análise, os cinco cenários (0 a 4 bloqueios) apresentaram uma média de 3,66 s, um mínimo de 3,45 s e um máximo de 3,93 s. Por outro lado, o Exemplo 3 apresentou um tempo de processamento maior, com um valor de 4,26 s

7 CONCLUSÃO

Os modelos matemáticos para a alocação dos materiais de terraplenagem e pavimentação nem sempre são exequíveis em campo devido à presença de interferências. No presente modelo estas interferências foram incorporadas, considerando-se assim os obstáculos que impedem a livre circulação dos equipamentos, como desapropriações, redes de energia, de água ou obstáculos inerentes ao projeto em consideração como redes de drenagem ou obras de arte corrente (bueiros), por exemplo.

Com o objetivo de se avaliar a influência dos bloqueios e como a forma de ataque dos serviços se refletem nos custos foi apresentado o Exemplo 1. Conforme foi visto, a alocação dos materiais é realizada levando-se em conta a produção das máquinas e o prazo para a conclusão dos serviços. Dessa forma, com os resultados do Exemplo 1, foi elaborada uma análise de sensibilidade onde pode-se constatar a importância de se levar em conta nas obras rodoviárias a presença das interferências sob pena de se incorrer em atrasos no cronograma, ociosidade dos equipamentos e consequentes prejuízos. Cabe aqui um esclarecimento acerca da velocidade com que se desenvolvem os serviços porque uma velocidade de ataque maior através de ganhos de produtividade leva a uma redução dos prazos e dos custos, estes em razão da redução do custo horário das máquinas. Mas nem sempre é assim se forem levadas em conta as interferências ao longo da obra. Apenas a redução do prazo da obra, na comparação do Cenário 2 com o Cenário 1, Exemplo 1, foi suficiente para causar um acréscimo de 3,6% no custo da obra, em razão da indisponibilidade de material em locais mais próximos causada pela presença dos bloqueios. A ocorrência de interferências em obras rodoviárias é um fato comum e com frequência não são levadas em conta na fase de planejamento, sendo elaborados os orçamentos, cronogramas físico-financeiros e os planos para movimentação dos materiais como se a obra fosse livre de obstáculos. Daí a importância da quantificação desses fatos que, se de certa forma eram conhecidos, através de obras infundáveis e orçamentos extrapolados, por outro lado são uma lacuna na literatura. Conforme a publicação *Practices for Establishing Contract Completion Dates for Highway Projects (USA, 2017)*, estabelecer o prazo contratual da obra é uma parte importante do processo de desenvolvimento do projeto rodoviário, já que desempenha um importante papel na determinação dos custos totais em projetos de prazos muito curtos tendendo a aumentar o custo da obra, afirmação que, de certa forma, vai ao encontro das conclusões desse trabalho.

O modelo desenvolvido permite que os resultados sejam analisados através dos cronogramas de barras, conforme foi feito em relação aos Cenários 1, 2 e 3 do Exemplo 1. Os

cronogramas permitem visualizar os períodos ociosos entre as frentes de trabalho e permitem verificar o prazo estabelecido para a conclusão da obra.

Com relação à produção das equipes, esta deve ser estimada e ficar a critério do construtor e deve ser estabelecida em função das características da obra e do equipamento disponível, podendo-se lançar mão também das tabelas de preços que incorporem a composição de custos com os coeficientes de produção dos equipamentos. O modelo desenvolvido tem essa flexibilidade, considerada mais realista, e no modelo matemático essas produções são representadas pelas variáveis PS, PB e PD.

A versatilidade do modelo permite que se faça a análise de diversos cenários permitindo assim que se preveja o reflexo nos custos da obra de decisões referentes a forma de ataque dos serviços. Há casos em que um prazo mínimo é fundamental. Assim, o modelo permitiu a análise de uma redução mais drástica do prazo da obra do Exemplo 1. A redução do prazo para 60 dias só seria possível dividindo-se a obra em partes e executando-as separadamente sem transpor os bloqueios. Ao final da liberação do Bloqueio 2 (TK=60 dias), a obra estaria concluída. Cabe observar que os trechos modelados em separados foram resolvidos com o modelo de distribuição em Programação Linear sem bloqueios e, dessa forma, cada um tem um custo mínimo e o custo total foi calculado somando-se os três segmentos e chegando-se assim à Tabela 40 onde pode-se ver o reflexo de 16,41% nos custos ao se atacar a obra dessa forma.

Outra importante análise permitida pelo modelo diz respeito ao estudo dos prazos. No Exemplo 2 foi construído o gráfico Custo (C) x Duração (D), Figura 12, determinando-se o valor de D_1 que torna o modelo inviável, o que significa que nas condições estabelecidas nesse exemplo não é possível executar a obra nesse prazo, sendo recomendável não se estabelecer o prazo da obra muito próximo a D_1 , a não ser sob um planejamento minucioso, que incorpore o máximo possível de situações. Esse recurso do modelo é relevante, já que permite incorporar ao planejamento as interferências, evitando-se prazos inexecutáveis (*infeasible*). Por outro lado, foi possível também determinar o valor mínimo D_2 a partir do qual o custo da obra não é afetado pela influência dos bloqueios. Essa determinação também é importante, principalmente quando há uma necessidade maior de redução do prazo, pois permite se conhecer o quanto se afasta do prazo correspondente ao custo mínimo.

Caso haja a possibilidade de se eliminar algumas interferências na fase de planejamento, é possível examinar o reflexo dessa decisão no custo da obra. No Exemplo 2 foi realizada a análise de sensibilidade através do gráfico da Figura 13, onde pode-se comparar os valores do custo vs número de bloqueios. Além disso, através dos resultados das variáveis XS,

XB e XD e dos cronogramas, é possível verificar quais movimentações foram mais ou menos afetadas pela presença ou não dos bloqueios.

O último exemplo apresentado mostra como o modelo pode ser aplicado em um caso real. Trata-se de uma obra de manutenção de uma barragem em formato de circuito fechado com acesso em apenas quatro pontos. Com o modelo apresentado foi possível incorporar as interferências e se conseguir uma economia de 2,12% em relação ao orçamento de projeto e note-se que o orçamento original do projeto não as levou em conta no prazo executivo. Dessa forma a economia conseguida com o orçamento otimizado pode ser maior, já que devido às interferências pode ocorrer que o prazo não seja cumprido, ou que o orçamento original seja superado.

Ao contrário de outras abordagens, que lidam com algoritmos complexos chegando-se a soluções quase ótimas, esse estudo trouxe uma nova abordagem para resolver o problema da distribuição de materiais em obras de terraplenagem e pavimentação com interferências usando uma sólida metodologia de otimização integrada a um modelo em Programação Linear, de baixo custo computacional, que pode com facilidade ser implementada pelos planejadores e gerentes. Esse estudo adotou ainda como matriz de custos unitários a base de dados da SEINFRA-CE, evitando-se, dessa forma abordagens de simulação-otimização integradas, já que a tabela de custos da SEINFRA usa uma base de dados estatística a partir de pesquisas de preços e da observação do desempenho dos equipamentos em obras regionais.

Finalmente, a metodologia apresentada mostrou-se de fácil implementação já que o protocolo para a obtenção e pré-processamento dos dados foi desenvolvido no Excel. O link entre o Excel e o IBM CPLEX versão 12.6.0.0 não apresentou nenhum problema de conectividade. Assim, a solução proposta pode ser implementada tanto em empresas privadas de engenharia como em Departamentos Estaduais de Rodovias.

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se enumerar os seguintes itens:

a) Desvios

O modelo considera que a movimentação entre cortes e aterros se dê ao longo do traçado da via, com as distâncias de transporte consideradas iguais às do estaqueamento. Não foram considerados desvios, mas é possível incluí-los nas variáveis XS. Sugere-se aqui a ampliação do modelo com a inclusão dos desvios, lembrando que se forem muitos, o esforço computacional pode aumentar bastante.

b) Misturas de materiais

O modelo pode ser ampliado para incluir a mistura de materiais nas camadas de pavimentação, sendo os materiais misturados na pista ou usinados. Deve-se, nesse caso, conhecer as alternativas de misturas oriundas do projeto de pavimentação. As restrições aos bloqueios são similares e no caso de misturas usinadas, deve-se conhecer a posição da usina de solos e os acessos ao trecho. Vale lembrar que esse problema se converte em um problema de designação, obrigando o uso de variáveis binárias (Programação Inteira Mista).

c) Curva Custo(C) X Duração(D)

Cada obra tem uma curva CxD típica. Em curvas muito ‘íngremes’ as reduções de prazo implicam em crescimento mais acentuado dos custos, ao contrário das curvas mais ‘suaves’. Sugere-se aqui elaborar as curvas CxD com a determinação de D_1 e D_2 característicos para diversos tipos de obras e pesquisar que implicação elas têm na fixação dos prazos.

d) Mobilização e desmobilização

É de praxe que a mobilização e a desmobilização dos equipamentos sejam consideradas nos custos das obras apenas no início e no final, sendo o custo avaliado como transporte e tendo como unidade R\$/km. Em obras com interferências, o modelo pode fracionar os serviços em pequenos intervalos, sendo necessário o deslocamento de partes da frota para vários pontos diversas vezes. Sugere-se então incluir esse custo no modelo.

REFERÊNCIAS

- BATALIONE, G. **Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Distrito Federal, 2007.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de implantação básica de rodovia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2010.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Diretrizes básicas para desapropriações**. Rio de Janeiro: IPR, 2011.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de custos de infraestrutura de transportes: metodologia e conceitos**. Brasília: [s.n.], 2017. v. 1.
- BURDETT, R.; KOZAN, E.; KENLEY, R. Block Models for Improved Earthwork Allocation Planning in Linear Infrastructure Construction. **Engineering Optimization**, [s.l.], v. 47, n. 3, p. 347-369, 2014.
- CATERPILLAR BRASIL S. A. **Princípios Básicos de Terraplenagem**. [S.l.: s.n.], 1977.
- CHRISTIAN, J.; CALDERA, H. Earthmoving cost optimization by operational research. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 4, 1988.
- DAEWOOD, N. N.; CASTRO, S. Automating road construction planning with a specific-domain simulation system. **Journal of Information Technology in Construction**, United Kingdom, [s.l.], v. 14, p. 556-573, 2009.
- EASA, S. M. Earthwork Allocations with Linear Unit Costs. **Journal of Construction, Engineering and Management**, [s.l.], v. 114, n. 4, p. 641-655, 1988b.
- EASA, S. M. Earthwork Allocations with Nonconstant Unit Costs. **Journal of Construction, Engineering and Management**, [s.l.], v. 113, n. 1, p. 34-50, 1987.
- EASA, S. M. Selection of Roadways Grades that Minimize Earthwork Cost Using Linear Programming. **Transpn Res.** [s.l.], Great Britain, v. 22, n. 2, p. 121-136, 1988a.
- EHRlich, P. J. **Pesquisa Operacional**: curso introdutório. São Paulo: Atlas, 1991.
- FALCÃO, V. A.; PRATA, B. de A.; NOBRE JÚNIOR, E. F. Optimization Techniques Applied to Earthmoving and Highway Construction: a Survey. **International Review of Civil Engineering**, [s.l.], v. 7, n. 5, 2016.

HARE, W. L.; KOCH, V. R.; LUCET, Y. Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming. **European Journal of Operational Research**, [s.l.], v. 215, n. 2, p. 470-480, 2011. Disponível em: 10.1016/j.ejor.2011.06.011. Acesso em: 14 jun. 2020.

HUANG, R.; HALPIN, D. POLO: Planning and optimization for linear operations. **Proc., Second Congress, Computing in Civil Engineering**, [s.l.], v. 1, p. 1126-1133, 1995.

IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V 12.6.0 documentation (2013)

JASSIM, H. S. H; KRANTZ, J.; LU, W.; OLOFSSON, T. A Model to Reduce Earthmoving Impacts. **Journal of Civil Engineering and Management**, [s.l.], v. 26, n. 6, p. 490-512, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12641>. Acesso em: 02 jan. 2020.

JAYAWARDANE, A. K. W.; HARRIS, F. C. Further development of Integer Programming in Earthwork Optimization. **Journal of Construction, Engineering and Management**, [s.l.], v. 116, n. 1, p. 18-34, 1990.

JAYAWARDANE, A. K. W.; PRICE, A. D. F. A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations, Parts I and II. **Proc. Instn. Civ. Engrs Transp.**, [s.l.], v. 105, n. 4, p. 195-207, 1994.

JI, Y. *et al.* **Mathematical Modeling of Earthwork Optimization Problems**. [S.l.: s.n.], 2010.

KANTOROVITCH, L. On the translocation of masses. **Management Sciences**, [s.l.], v. 5, n.1, p. 1-4, 1958.

KATARIA, S.; SAMDANI, S. A.; SINGH, K. A. **Ant Colony Optimization in Earthwork Allocation**. [S.l.: s.n.], 2005.

LI, D.; LIU, C.; LU, M. Optimizing earthwork hauling plan with minimum cost flow network. *In: INTERNATIONAL CONSTRUCTION SPECIALTY CONFERENCE*, 5., 2015, Vancouver, Canadá. **Anais [...]**. Vancouver, Canadá, 2015.

LI, D.; LU, M. Automated Generation of Work Breakdown Structure and Project Network Model for Earthwork Project Planning: A Flow Network Based Optimization Approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s.l.], jul, 2016.

LIMA, R. X. **Logística da Distribuição de Materiais em Pavimentação Rodoviária: uma modelagem em programação matemática**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, Brasil, 2003.

LIMA, R. X.; NOBRE JÚNIOR, E. F. Pesquisa Operacional: Aplicações à Engenharia Rodoviária. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO*, 32., 2000, Brasília, Brasil. **Anais [...]**. Brasília, 2000.

LIMA, R. X.; NOBRE JÚNIOR, E. F.; WEISSMANN, J.; PRATA, B. A. Distribution of Materials in Road Earthmoving and Paving: Mathematical Programming Approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s.l.], v. 139, n. 8, p. 1046-1054, 2013.

MAYER, R. H.; STARK, R. M. Earthmoving Logistics. **Journal of Construction Division**, [s.l.], v. 107, n. 2, p. 297-312, 1981.

MOREB, A. A. Linear programming model for finding optimal roadway grades that minimize earthwork cost. **European Journal of Operational Research**, [s.l.], v. 93, n. 1, p. 148-154, 1996.

MOSELHI, F.; HASSANEIN, A. Optimized Scheduling of Linear Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s.l.], v. 129, n. 6, p. 664-673, 2003.

NANDGAONKAR, S. M. Earthwork Transportation, Allocations: Operation Research. **Journal of the Construction Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE)**, [s.l.], v. 107, n. 2, 1981.

PARENTE, M.; CORREIA, A. G.; CORTEZ, P. A Novel Integrated Optimization System for Earthwork Tasks. **Transportation Research Procedia**, [s.l.], v. 14, p. 3601-3610, 2016.

PESQUISA CNT de rodovias 2018: Relatório gerencial. Brasília: CNT/SEST SENAT, 2018.

REDA, R. RPM: Repetitive project modeling. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s.l.], v. 116, n. 2, p. 316-330, 1990.

RICARDO, H. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação: terraplenagem e escavação de rocha**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO CEARÁ (SEINFRA). (Ceará). **Tabela de custos Versões 24.1 (2016/2018) e 026 (2018/20121)**. Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://www.seinfra.ce.gov.br/tabela-de-custos/>. Acesso em: 12 fev. 2021.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 2001. v. 1 e v. 2.

SILVEIRA, L. R.; BORGES, R. A. Uso de materiais alternativos para melhoria de solo na pavimentação de vias. **E&S – Engineering and Science**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 73-82, 2016.

STARK, R. M.; NICHOLLS, R. L. **Mathematical Foundations for Design**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1972.

YI, C.; LU, M. A mixed-integer linear programming approach for temporary haul road design in rough-grading projects. **Automation in Construction**, Canadá, v. 71, parte 2, 2016.

APÊNDICE A - DADOS E RESULTADOS DOS EXEMPLOS 1 E 2

1 – DADOS E RESULTADOS DO EXEMPLO 1

Tabela 1 – Dados das jazidas e área para bota-foras para o Exemplo 1

Nº	Volume (1000 m ³)	Densidade (t/m ³)
1	40,00	1,60
2	35,00	1,60
3	20,00	1,70
4	20,00	1,65
5	30,00	1,70
Bota foras (capacidade)	10,00	-

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Localização de cortes e aterros para o Exemplo 1

Corte	Localização(km)	Aterro	Localização(km)	Aterro	Localização(km)
1	0,25	1	4,25	25	18,85
2	0,75	2	4,75	26	19,35
3	1,25	3	5,25	27	19,85
4	1,75	4	5,75	28	23,4
5	2,25	5	6,25	29	23,8
6	2,75	6	6,75	30	24,2
7	3,25	7	7,25	31	24,6
8	3,75	8	7,75	32	25
9	12,5	9	8,25	33	25,4
10	13,5	10	8,75	34	25,8
11	14,5	11	9,25	35	26,2
12	15,5	12	9,75	36	26,6
13	20,2	13	10,25	37	27
14	20,6	14	10,75	38	27,4
15	21	15	11,25	39	27,9
16	21,4	16	11,85	40	28,2
17	21,8	17	8	41	28,6
18	22,2	18	8,1	42	29
19	22,6	19	8,1	43	29,4
20	23	20	16,25	44	33
21	30	21	16,75	45	33,4
22	30,8	22	17,25	46	33,8
23	31,6	23	17,75	47	34,2
24	32,4	24	18,25	48	34,6
				49	35
				50	35,4
				51	35,8

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Localização das jazidas para o Exemplo 1

Jazida	Ponto de acesso (km)	Distância fixa (km)
1	4,0	10,0
2	8,0	11,0
3	0,0	4,0
4	4,0	15,0
5	20,0	10,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Distância dos cortes à área para bota-foras para o Exemplo 1

Corte	Distância (km)
1	9,00
2	8,50
3	8,00
4	7,50
5	7,00
6	6,50
7	6,00
8	5,50
9	5,50
10	6,50
11	7,50
12	8,50
13	13,20
14	13,60
15	14,00
16	14,40
17	14,80
18	15,20
19	15,60
20	16,00
21	23,00
22	23,80
23	24,60
24	25,40

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Fatores de aterro para o Exemplo 1

Fator	Valor
FS (aterros/cortes)	0,8
FI (aterros/jazidas)	0,9
FKC (expurgos/cortes)	1,2

Fonte: elaborada pelo autor.

2 – DADOS E RESULTADOS DO EXEMPLO 2

Tabela 6 – Quantitativos de cortes e aterros para o Exemplo 2

Cortes	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)	Aterros	Volume (1000 m ³)
1	13,4	1	1,00	25	1,00
2	4,7	2	2,00	26	1,00
3	4,0	3	2,00	27	1,00
4	5,0	4	2,00	28	2,00
5	6,00	5	2,00	29	2,00
6	3,00	6	2,00	30	1,00
7	7,00	7	2,00	31	1,00
8	2,00	8	2,00	32	1,00
9	15,00	9	2,00	33	3,00
10	6,00	10	2,00	34	2,00
11	3,00	11	2,00	35	1,00
12	7,00	12	2,00	36	1,00
13	1,00	13	2,00	37	2,00
14	2,00	14	1,00	38	3,00
15	3,00	15	1,00	39	3,00
16	4,00	16	1,00	40	3,00
17	5,00	17	3,00	41	1,00
18	3,00	18	2,00	42	1,00
19	2,00	19	1,00	43	1,00
20	1,00	20	1,00	44	1,00
21	1,00	21	2,00	45	2,00
22	3,00	22	3,00	46	2,00
23	3,00	23	3,00	47	2,00
24	5,00	24	3,00	48	2,00
				49	2,00
				50	3,00
				51	3,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Dados das jazidas para o Exemplo 2

Nº	Volume (1000 m ³)
1	1,00
2	0,80
3	0,40
4	12,0
5	8,00
6	4,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Localização de cortes e aterros para o Exemplo 2

Corte	Localização(km)	Aterro	Localização(km)	Aterro	Localização(km)
1	0,25	1	4,25	25	18,85
2	0,75	2	4,75	26	19,35
3	1,25	3	5,25	27	19,85
4	1,75	4	5,75	28	23,4
5	2,25	5	6,25	29	23,8
6	2,75	6	6,75	30	24,2
7	3,25	7	7,25	31	24,6
8	3,75	8	7,75	32	25
9	12,5	9	8,25	33	25,4
10	13,5	10	8,75	34	25,8
11	14,5	11	9,25	35	26,2
12	15,5	12	9,75	36	26,6
13	20,2	13	10,25	37	27
14	20,6	14	10,75	38	27,4
15	21	15	11,25	39	27,9
16	21,4	16	11,85	40	28,2
17	21,8	17	8	41	28,6
18	22,2	18	8,1	42	29
19	22,6	19	8,1	43	29,4
20	23	20	16,25	44	33
21	30	21	16,75	45	33,4
22	30,8	22	17,25	46	33,8
23	31,6	23	17,75	47	34,2
24	32,4	24	18,25	48	34,6
				49	35
				50	35,4
				51	35,8

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 9 – Localização das jazidas para o Exemplo 2

Jazida	Ponto de acesso (km)
1	4,0
2	8,0
3	0,0
4	4,0
5	20,2
6	33,1

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 10 – Localização das áreas para bota foras para o Exemplo 2

Bota fora	Ponto de acesso (km)
1	0,0
2	11,2
3	20,2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 11 – Tempos de liberação dos bloqueios para o Exemplo 2

B	TK(b) – Dias
1	90
2	60
3	90
4	90

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 12 – Capacidade das áreas para bota-foras para o Exemplo 2

VBF	Volumes (1000 m ³)
1	0,5
2	0,5
3	10,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 13 – Fatores de aterro para o Exemplo 2

Fator	Valor
FS (aterros/cortes)	0,8
FI (aterros/jazidas)	0,9
FKC (expurgos/cortes)	1,2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 14 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 1 – trecho sem bloqueios (continua)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
1	2	2,5
1	3	0,8
1	14	1,25
1	18	2,5
1	19	1,25

Tabela 14 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 1– Trecho sem bloqueios (continuação)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
1	48	1,1
1	50	3,25
1	51	0,75
2	3	1,7
2	11	0,5
2	13	2,5
3	4	2,5
3	11	1,5
4	5	2,5
4	9	1,75
4	11	0,5
4	17	0,25
5	6	2,5
5	17	3,5
6	7	2,5
6	12	0,5
7	8	2,5
7	10	2,5
7	12	2
8	1	1,25
8	9	0,75
9	15	1,25
9	16	1,25
9	21	2,5
9	22	3,75
9	24	1,5
9	26	0,75
9	30	1,25
9	31	1,25
9	35	1,25
9	36	0,25
10	23	3,75
10	24	2,25
11	25	1,25
11	26	0,5
11	27	1,25
12	20	1,25

Tabela 14 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 1 – Trecho sem bloqueios (conclusão)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
12	28	2,5
12	29	2,5
12	33	0,75
13	33	1
14	32	1,25
14	33	0,75
15	33	1,25
15	34	1,75
16	34	0,75
16	40	3,25
17	38	1,25
17	39	3,75
18	36	1
18	37	0,5
18	38	1,5
19	37	2
20	38	1
21	47	1
22	49	2,5
22	50	0,5
23	51	3
24	44	1,25
24	45	2,5
24	46	1,25

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 2 - Cenário 1 – Trecho sem bloqueios

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	Volume (1000 m ³)
5	40	0,444
5	41	1,111
5	42	1,111
5	43	1,111
5	46	1,111
5	47	1,333
5	48	1,244

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 2 - Trecho com 1 bloqueio (Bloqueio 1) (continua)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	0 – 90	2,5
1	3	0 – 90	2,038
1	11	0 – 90	0,5
1	13	0 – 90	2,5
1	14	0 – 90	1,25
1	18	0 – 90	2,5
1	19	0 – 90	1,25
1	50	>90	0,862
2	3	0 - 90	0,462
3	4	0 - 90	2,5
3	11	0 - 90	1,5
4	5	0 - 90	2,5
4	9	0 - 90	1,75
4	11	0 - 90	0,5
4	17	0 - 90	0,25
5	6	0 - 90	2,5
5	17	0 - 90	3,5
6	7	0 - 90	2,5
6	12	0 - 90	0,5
7	8	0 - 90	2,5
7	10	0 - 90	2,5
7	12	0 - 90	2
8	1	0 - 90	1,25
8	9	0 - 90	0,75
9	15	0 - 90	1,25
9	16	0 - 90	1,25
9	21	0 - 90	2,5
9	22	0 - 90	3,75
9	23	0 - 90	1,5
9	26	0 - 90	0,75
9	28	>90	2,5
9	30	>90	1,25
9	31	>90	0,25
10	23	0 - 90	2,25
10	24	0 - 90	3,75

Tabela 16 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 2 - trecho com 1 bloqueio (Bloqueio 1) (conclusão)

s (Seção em corte)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
11	25	0 - 90	1,25
11	26	0 - 90	0,5
11	27	0 - 90	1,25
12	20	0 - 90	1,25
12	29	>90	2,5
12	33	>90	3,25
13	31	0 - 90	1
14	32	0 - 90	1,25
14	39	0 - 90	0,75
15	33	0 - 90	0,5
15	34	0 - 90	1,25
15	35	0 - 90	1,25
16	34	0 - 90	1,25
16	40	0 - 90	2,75
17	36	0 - 90	1,25
17	37	0 - 90	0,5
17	38	0 - 90	2,75
17	40	0 - 90	0,5
18	39	0 - 90	3
19	37	0 - 90	2
20	38	0 - 90	1
21	47	0 - 90	1
22	49	0 - 90	2,5
22	50	0 - 90	0,5
23	51	0 - 90	3
24	44	0 - 90	1,25
24	45	0 - 90	2,5
24	46	0 - 90	1,25

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 17 – Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 2 – Cenário 2 - modelo com 1 bloqueio (Bloqueio 1)

k (Bota fora)	s (Seção em corte)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
2	2	0 - 90	0,417
3	2	>90	3,821

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 18 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 2 - trecho com 1 bloqueio (Bloqueio 1)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	50	>90	1
2	50	>90	0,133
2	51	>90	0,667
3	50	>90	0,4
5	40	0 – 90	0,444
5	41	0 – 90	1,111
5	42	0 – 90	1,111
5	43	0 – 90	0,078
5	46	0 – 90	1,111
5	47	0 – 90	1,333
5	48	0 – 90	2,222
5	50	0 – 90	0,589
6	43	0 – 90	1,034

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 19 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 3 - trecho com 2 bloqueios (Bloqueios 1 e 2) (continua)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	60 - 90	2,5
1	3	60 - 90	2,038
1	18	60 - 90	1,85
1	19	60 - 90	1,25
1	46	>90	0,235
1	47	>90	1,5
1	48	>90	2,5
1	50	>90	1,525
2	3	60 - 90	0,462
3	4	60 - 90	2,5
3	11	60 - 90	0,852
3	18	60 - 90	0,648
4	5	60 - 90	2,5
4	9	60 - 90	1,75
4	11	60 - 90	0,5
4	17	60 - 90	0,25
5	6	60 - 90	2,5
5	17	60 - 90	3,5

Tabela 19 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 3 - trecho com 2 bloqueios (Bloqueios 1 e 2) (continuação)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (dias)	Volume (1000 m ³)
6	7	60 – 90	2,5
6	12	60 – 90	0,5
7	8	60 – 90	2,5
7	10	60 – 90	2,5
7	12	60 – 90	2
8	1	60 – 90	1,25
8	9	60 - 90	0,75
9	14	0 - 60	1,25
9	15	0 - 60	1,25
9	16	0 - 60	1,25
9	21	0 - 60	2,5
9	22	0 - 60	3,75
9	23	0 - 60	2,648
9	25	0 - 60	1,102
9	26	0 - 60	1,25
10	11	0 - 60	1,148
10	23	0 - 60	1,102
10	24	0 - 60	3,75
11	13	0 - 60	2,5
11	25	0 - 60	0,148
11	27	0 - 60	0,352
12	20	0 - 60	1,25
12	27	0 - 60	0,900
12	28	>90	2,5
12	29	>90	2,352
13	31	0 - 60	1
14	32	0 - 60	1,25
14	33	0 - 60	0,75
15	33	0 - 60	3
16	34	0 - 60	2,5
16	35	0 - 60	0,25
16	37	0 - 60	0,5
16	39	0 - 60	0,75
17	35	0 - 60	1
17	36	0 - 60	1,25
17	38	0 - 60	2,75
18	39	0 - 60	3
19	37	0 - 60	2
20	38	0 - 60	1

Tabela 19 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 3 - trecho com 2 bloqueios (Bloqueios 1 e 2) (conclusão)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (dias)	Volume (1000 m ³)
21	47	0 - 60	1
22	49	0 - 60	2,5
22	50	0 - 60	0,5
23	51	0 - 60	3
24	44	0 - 60	1,25
24	45	0 - 60	2,5
24	46	0 - 60	1,25

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 20 – Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 2 – Cenário 3 - trecho com 2 bloqueios (Bloqueios 1 e 2)

k (Bota fora)	s (Seção em corte)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
2	2	60- 90	0,417
3	2	>90	3,821

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 3 - trecho com 2 bloqueios (Bloqueios 1 e 2)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	50	>90	1
2	50	>90	0,133
2	51	>90	0,667
3	50	>90	0,4
5	29	0 -60	0,132
5	30	0 -60	1,111
5	31	0 -60	0,222
5	40	0 -60	3,333
5	41	0 -60	1,111
5	42	0 -60	1,111
5	43	0 -60	0,078
5	46	0 -60	0,902
6	43	0 -60	1,034

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 4 - Trecho com 3 bloqueios (Bloqueios 1, 2 e 3) (continua)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	60 - 90	1,638
1	2	>90	0,862
1	3	60 - 90	2,5
1	12	60 - 90	2,5
1	13	60 - 90	0,214
1	19	60 - 90	1,25
3	4	60 - 90	2,5
3	5	60 - 90	0,25
3	11	60 - 90	1,25
4	5	60 - 90	2,25
4	6	60 - 90	0,25
4	18	60 - 90	2,5
5	6	60 - 90	2,25
5	17	60 - 90	3,75
6	7	60 - 90	2,5
6	8	60 - 90	0,5
7	8	60 - 90	2
7	9	60 - 90	2,5
7	10	60 - 90	2,5
8	1	60 - 90	0,8
8	11	60 - 90	1,2
9	14	>90	1,25
9	15	0 - 60	1,25
9	16	0 - 60	1,25
9	21	0 - 60	2,5
9	22	0 - 60	3,75
9	23	0 - 60	1,55
9	25	0 - 60	1,036
9	26	0 - 60	1,25
9	30	>90	1,164
10	11	>90	0,05
10	23	0 - 60	2,2
10	24	0 - 60	3,75
11	13	>90	2,286
11	25	0 - 60	0,214
11	27	0 - 60	0,5
12	20	0 - 60	1,25
12	27	0 - 60	0,75
12	28	>90	2,5

Tabela 22 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 4 - Trecho com 3 bloqueios (Bloqueios 1, 2 e 3) (conclusão)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m³)
12	29	>90	2,5
13	31	0 – 60	1
14	32	0 – 60	1,25
14	33	0 – 60	0,75
15	33	0 – 60	3
16	34	0 – 60	2,5
16	38	0 – 60	0,75
16	39	0 – 60	0,75
17	35	0 – 60	1,25
17	36	0 – 60	1,25
17	37	0 – 60	0,5
17	38	0 – 60	2
18	39	0 – 60	3
19	37	0 – 60	2
20	38	0 – 60	1
21	47	0 – 60	0,5
21	48	0 – 60	0,5
22	49	0 – 60	2,5
22	50	0 – 60	0,5
23	51	0 – 60	3
24	44	0 – 60	1,25
24	45	0 – 60	2,5
24	46	0 – 60	1,25

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 23 – Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 2 – Cenário 4 - trecho com 3 bloqueios (Bloqueios 1, 2 e 3)

k (Bota fora)	s (Seção em corte)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m³)
1	1	0 – 60	0,417
2	2	>90	0,417
3	1	>90	4,019
3	2	>90	4,283

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 24 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 4 - Trecho com 3 bloqueios (Bloqueios 1, 2 e 3)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	50	>90	0,333
1	51	>90	0,667
2	50	>90	0,8
3	1	60 - 90	0,4
4	50	>90	1,387
5	30	0 - 60	0,076
5	31	0 - 60	0,222
5	40	0 - 60	3,333
5	41	0 - 60	1,111
5	42	0 - 60	1,111
5	48	0 - 60	1,778
5	50	0 - 60	0,368
6	43	0 - 60	1,111
6	46	0 - 60	1,111
6	47	0 - 60	1,778

Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 25 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 5 - Trecho com 4 bloqueios (Bloqueios 1, 2, 3 e 4) (continua)

s(seção em corte)	ca(seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	2	60 - 90	1,638
1	2	>90	0,862
1	3	60 - 90	2,5
1	17	60 - 90	0,214
1	18	60 - 90	2,5
1	19	60 - 90	1,25
3	4	60 - 90	2,5
3	17	60 - 90	1,5
4	5	60 - 90	2,5
4	13	60 - 90	0,464
4	17	60 - 90	2,03
5	6	60 - 90	2,5
5	12	60 - 90	2,5
5	13	60 - 90	1
6	7	60 - 90	2,5
6	13	60 - 90	0,5
7	8	60 - 90	2,5
7	10	60 - 90	2,5

Tabela 25 – Resultados das variáveis XS s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 5 - trecho com 4 bloqueios (Bloqueios 1, 2, 3 e 4) (continuação)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
7	11	60 – 90	2
8	1	60 – 90	0,8
8	9	60 – 90	0,7
8	11	60 – 90	0,5
9	9	>90	1,8
9	14	>90	1,25
9	15	0 – 60	1,25
9	16	0 – 60	1,25
9	21	0 – 60	2,5
9	22	0 – 60	3,75
9	23	0 – 60	1,5
9	25	0 – 60	0,036
9	29	>90	0,75
9	30	>90	0,353
9	48	>90	0,561
10	23	0 – 60	2,25
10	24	0 – 60	3,75
11	13	>90	0,536
11	25	0 – 60	1,214
11	26	0 – 60	1,25
12	20	0 – 60	1,25
12	27	0 – 60	1,25
12	30	>90	0,25
12	46	>90	1,75
12	47	>90	2,5
13	31	0 – 60	1
14	32	0 – 60	1,25
14	33	0 – 60	0,75
15	33	0 – 60	3
16	34	0 – 60	2,5
16	37	0 – 60	0,25
16	41	0 – 60	1,25
17	35	0 – 60	1,25
17	37	0 – 60	2,25
17	38	0 – 60	0,75
17	39	0 – 60	0,75
18	28	0 – 60	1,25
18	39	0 – 60	1,75
19	28	0 – 60	0,25

Tabela 25 – Resultados das variáveis XS (s, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 5 - trecho com 4 bloqueios (Bloqueios 1, 2, 3 e 4) (conclusão)

s(Seção em corte)	ca(Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
19	29	0 – 60	1,75
20	28	0 – 60	1
21	43	0 – 60	1
22	31	0 – 60	0,25
22	36	0 – 60	1,25
22	42	0 – 60	1,25
22	43	0 – 60	0,25
23	38	0 – 60	3
24	39	0 – 60	1,25
24	40	0 – 60	3,75

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 26 – Resultados das variáveis XD (k, s, t) do Exemplo 2 – Cenário 5 - trecho com 4 bloqueios (Bloqueios 1, 2, 3 e 4)

k (Bota fora)	s (Seção em corte)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	1	0 – 60	0,417
2	2	>90	0,417
3	1	>90	4,019
3	2	>90	4,283

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 27 – Resultados das variáveis XB (i, ca, t) do Exemplo 2 – Cenário 5 - trecho com 4 bloqueios (Bloqueios 1, 2, 3 e 4)

i (Jazida)	ca (Seção em aterro)	T(t) (Dias)	Volume (1000 m ³)
1	51	>90	1
2	51	>90	0,8
3	1	60 – 90	0,4
4	51	>90	1,387
5	30	0 – 60	0,575
5	48	>90	1,723
5	49	>90	2,222
5	50	>90	3,333
5	51	>90	0,146
6	44	0 – 60	1,111
6	45	0 – 60	2,222
6	46	0 – 60	0,667

Fonte: elaborada pelo autor

APÊNDICE B - DADOS DO EXEMPLO 3

1 – DADOS E RESULTADOS DO EXEMPLO 3

Tabela 1 – Volumes das jazidas para o Exemplo 3

Nº	Volume (1000 m ³)
1	48,00
2	14,40

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 2 – Localização de cortes e aterros para o Exemplo 3

Corte	Localização(km)	Aterro	Localização(km)	Aterro	Localização(km)
1	0,93	1	0,1	25	4,9
2	2,08	2	0,3	26	5,1
3	2,25	3	0,5	27	5,3
4	5,37	4	0,7	28	5,5
5	9,47	5	0,9	29	5,7
		6	1,1	30	5,9
		7	1,3	31	6,1
		8	1,5	32	6,3
		9	1,7	33	6,5
		10	1,9	34	6,7
		11	2,1	35	6,9
		12	2,3	36	7,1
		13	2,5	37	7,3
		14	2,7	38	7,5
		15	2,9	39	7,7
		16	3,1	40	7,9
		17	3,3	41	8,1
		18	3,5	42	8,3
		19	3,7	43	8,5
		20	3,9	44	8,7
		21	4,1	45	8,9
		22	4,3	46	9,1
		23	4,5	47	9,3
		24	4,7	48	9,5
				49	9,7
				50	9,9
				51	10,1
				52	10,24

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 3 – Localização das jazidas para o Exemplo 3

Jazida	Ponto de acesso (km)
1	1,66
2	9,86

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Localização das áreas para bota-foras para o Exemplo 3

Bota fora	Ponto de acesso (km)
1	0,2 para km 0,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Tempos de liberação e posição dos bloqueios para o Exemplo 3

Bloqueio	TK(b) – Dias	Posição (km)
1	30	4,71
2	60	2,78
3	45	1,92
4	30	0,58
5	90	6,20
6	80	7,80

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Capacidade das áreas para bota-foras para o Exemplo 3

VBF	Volumes (1000 m ³)
1	10,00

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Fatores de aterro para o Exemplo 3

Fator	Valor
FS(Aterros/cortes)	0,87
FI(Aterros/jazidas)	0,87
FKC(Expurgos/cortes)	1,2

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Produtividades e prazo da obra para o Exemplo 3

Variável	Valor
1/PS (Aterros/cortes)	1,225 dia/1000 m ³
1/PB (Aterros/jazidas)	1,225 dia/1000 m ³
1/PD (Expurgos/cortes)	1,225 dia/1000 m ³
D	100 dias

Fonte: elaborada pelo autor.

ANEXO A - COMPOSIÇÕES DE CUSTOS – COEFICIENTES - SEINFRA-CE

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, até 200 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0027
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0169
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 201 a 400 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000

Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0088
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0206
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 401 a 600 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0041
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0253
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 601 a 800 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0094
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0298
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 801 a 1000 m

UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0043
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0349
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 1001 a 1200 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0024
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0369
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 1201 a 1400 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000

Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0078
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0412
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 1401 a 1600 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0034
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0456
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 1601 a 1800 m (continua)		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0094
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0494
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 1801 a 2000 m		
UNID.: m³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m³ (CHI)	H	0,0047
Caminhão basculante 12 m³ (CHP)	H	0,0541
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 2001 a 3000 m		
UNID.: m³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m³ (CHI)	H	0,0012
Caminhão basculante 12 m³ (CHP)	H	0,0576
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 3001 a 4000 m		
UNID.: m³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096

Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0094
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0690
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Escavação e carga de material de 1ª categoria, de 4001 a 5000 m		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)	H	0,0002
Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)	H	0,0096
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)	H	0,0000
Trator de esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)	H	0,0098
Caminhão basculante 12 m ³ (CHI)	H	0,0062
Caminhão basculante 12 m ³ (CHP)	H	0,0821
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0294

SERVIÇO: Compactação de aterros, 95% Proctor Normal		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Caminhão tanque 8.000 l (CHI)	H	0,0000
Caminhão tanque 8.000 l (CHP)	H	0,0089
Grade de discos (CHI)	H	0,0008
Grade de discos (CHP)	H	0,0037
Motoniveladora (CHI)	H	0,0000
Motoniveladora (CHP)	H	0,0042
Trator de Pneus (CHI)	H	0,0008
Trator de Pneus (CHP)	H	0,0037

Compactador pé de carneiro vibratório autopropelido (CHI)	H	0,0027
Compactador pé de carneiro vibratório autopropelido (CHP)	H	0,0017
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0222

SERVIÇO: Compactação de aterros, 100 % Proctor Normal(continua)		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
Equipamentos (Custo horário)		
Caminhão tanque 8.000 l (CHI)	H	0,0000
Caminhão tanque 8.000 l (CHP)	H	0,0089
Grade de discos (CHI)	H	0,0008
Grade de discos (CHP)	H	0,0037
Motoniveladora (CHI)	H	0,0000
Motoniveladora (CHP)	H	0,0044
Trator de Pneus (CHI)	H	0,0008
Trator de Pneus (CHP)	H	0,0037
Compactador pé de carneiro vibratório autopropelido (CHI)	H	0,0018
Compactador pé de carneiro vibratório autopropelido (CHP)	H	0,0026
SERVIÇO: Compactação de aterros, 100 % Proctor Normal(conclusão)		
UNID.: m ³		
Descrição	Unid	Coeficiente
MÃO DE OBRA		
Servente	H	0,0222

SERVIÇO: Carregadeira de pneus 180 HP (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
MÃO DE OBRA		
Depreciação	H	50,0512
Juros	H	16,8923
MÃO DE OBRA		
Operador de carregadeira	H	1,0000

SERVIÇO: Carregadeira de pneus 180 HP (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	50,0512
Juros	H	16,8923
Óleo diesel	L	27,0000
Manutenção	H	75,0768
MÃO DE OBRA		
Operador de carregadeira	H	1,0000

SERVIÇO: Trator esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	40,266
Juros	H	16,6097
MÃO DE OBRA		
Operador de trator de esteiras	H	1,0000

SERVIÇO: Trator esteiras com lâmina e escarificador 155 HP (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	40,2660
Juros	H	16,6097
Óleo diesel	L	23,2500
Manutenção	H	60,3990
MÃO DE OBRA		
Operador de trator de esteiras	H	1,0000

SERVIÇO: Caminhão basculante 12 m³ (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	20,2002
Juros	H	6,8176
MÃO DE OBRA		
Motorista de caminhão	H	1,0000

SERVIÇO: Caminhão basculante 12 m³ (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	20,2002
Juros	H	16,6097
Óleo diesel	L	18,4000
Manutenção	H	30,3004
MÃO DE OBRA		
Motorista de caminhão	H	1,0000

SERVIÇO: Caminhão tanque 8.000 l (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	14,6051
Juros	H	4,9292
MÃO DE OBRA		
Motorista de caminhão	H	1,0000

SERVIÇO: Caminhão tanque 8.000 l (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente

Depreciação	H	14,6051
Juros	H	4,9292
Óleo diesel	L	18,4000
Manutenção	H	21,9076
MÃO DE OBRA		
Motorista de caminhão	H	1,0000

SERVIÇO: Grade de discos (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	2,2251
Juros	H	0,8159

SERVIÇO: Grade de discos (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	2,2251
Juros	H	0,8159
Manutenção	H	1,2362

SERVIÇO: Motoniveladora (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	40,2862
Juros	H	15,1073
MÃO DE OBRA		
Operador de motoniveladora	H	1,0000

SERVIÇO: Motoniveladora (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	40,2862
Juros	H	15,1073
Óleo diesel	L	21,0000
Manutenção	H	50,3577
MÃO DE OBRA		
Operador de motoniveladora	H	1,0000

SERVIÇO: Trator de pneus (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	6,8616
Juros	H	2,8304
MÃO DE OBRA		
Operador de trator de pneus	H	1,0000

SERVIÇO: Trator de pneus (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	6,8616
Juros	H	2,8304
Óleo diesel	L	15,0000
Manutenção	H	7,7194
MÃO DE OBRA		
Operador de trator de pneus	H	1,0000
SERVIÇO: Compactador pé de carneiro vibratório autopropelido (CHI)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente

Depreciação	H	24,6367
Juros	H	9,0335
MÃO DE OBRA		
Operador de compactador autopropelido	H	1,0000

SERVIÇO: Compactador pé de carneiro vibratório autopropelido (CHP)		
UNID.: H		
Descrição	Unid	Coeficiente
Depreciação	H	24,2367
Juros	H	9,0335
Óleo diesel	L	19,05
Manutenção	H	32,8490
MÃO DE OBRA		
Operador de compactador autopropelido	H	1,0000