

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAIS EM OBRAS DE TERRAPLENAGEM E PAVIMENTAÇÃO

Pedro Guilherme Pinheiro Santos Fernandes
Ernesto Ferreira Nobre Júnior

Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

RESUMO

A logística e o planejamento das operações de movimentação de terra ainda seguem metodologias empíricas ou soluções matemáticas de difícil aplicação em obras rodoviárias. Em consequência, este estudo propõe o desenvolvimento de dois modelos de programação linear que garantam uma distribuição de materiais com menor custo e um planejamento eficiente dos serviços de terraplenagem e pavimentação. O primeiro modelo tem o objetivo de minimizar o custo da produção de misturas asfálticas, respeitando as faixas granulométricas, assim como parâmetros de interação entre os agregados. O segundo modelo utiliza programação linear inteira mista com objetivo de minimizar o custo das movimentações de terra, incorporando diversas características técnicas, tais como, propriedades geotécnicas, diferentes soluções de pavimentação, caminhos de serviço, produção de equipamentos pesados e, por fim, o prazo para término da obra. Entre os resultados, o modelo propõe a apresentação do orçamento e cronograma de atividades da obra.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento da distribuição de materiais é feito tradicionalmente pelo método de Brückner, metodologia de projeto criada por um engenheiro da *Bavarian State Railways*, com primeira divulgação no ano de 1847. Apesar de ser um método gráfico de aplicação fácil e de relativa eficácia, o método apresenta limitações. Como exemplo, o método não considera movimentação interna ao perfil traçado para construção do diagrama de volumes acumulados, além de não levar em conta complexidades geotécnicas (Mesquita, 2012).

Nos anos 1980, pesquisadores começaram a interpretar o problema da distribuição de materiais como um problema clássico de programação linear (PL), o “problema de transporte”. De forma geral, os corte são interpretados como a fonte produtora, enquanto os aterros se apresentam como o núcleo gerador de demanda. Em consequência, os modelos de PL têm como objetivo minimizar o custo ou a distância total associada a movimentação de material das zonas de corte para as zonas de aterro (Falcão, 2016).

Entre os primeiros pesquisadores a aplicar a PL como meio de planejamento da distribuição de materiais, destaca-se Nandgaonkar (1981), aplicando um modelo de otimização em um grande projeto de terraplenagem em Ahmednagar, Índia. Nandgaonkar (1981) utilizou a distância como variável de decisão, obtendo redução de 4% na distância total das movimentações. No mesmo ano, Mayer e Stark (1981) utilizaram um modelo de PL que tinha como função objetivo a minimização dos custos de movimentação. Desta forma, foram utilizados custos unitários de escavação, transporte e disposição de terra, proporcionais ao volume de solo movimentado. Mayer e Stark (1981) também consideraram os fatores de empolamento e incluíram a possibilidade do uso de empréstimos.

Mais tarde, Jayawardane e Price (1994) introduziram a possibilidade de planejamento conjunto do tempo e da distribuição de materiais. A metodologia de Jayawardane e Price (1994) utilizava um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) em conjunto a uma análise prévia por simulação, que tinha como objetivo a obtenção dos custos e índices de produtividade das equipes, onde cada equipe corresponde a um conjunto de equipamentos

ligados a escavação, carga, transporte e compactação em uma determinada movimentação.

Com as contribuições dos autores anteriormente citados, modelos de PL mais apurados foram desenvolvidos posteriormente, incorporando outros tópicos particulares do planejamento de obras rodoviárias, tais como, bloqueios ao longo da extensão da rodovia (Hare *et al*, 2011), construção de caminhos de serviço (Yi e Lu, 2016), diferentes camadas de solo em zonas corte e sequenciamento das operações de escavação (Gwak, 2018) .

O primeiro modelo a incorporar questões relacionadas a pavimentação e usinagem de materiais derivados de mistura, foi o modelo de Lima *et al* (2013) que incluía utilização de mistura de solo-brita nas camadas de sub-base e base. Contudo, o modelo de PLIM desenvolvido por Lima *et al* (2013) não trata dos serviços associados a aplicação do revestimento asfáltico. Em consequência, este trabalho visa incluir o planejamento das operações associadas a execução da camada de revestimento. Além disso, serão abordadas outras características técnicas, entre elas, diferentes soluções de pavimentação, caminhos de serviço, produção de equipamentos pesados e, por fim, o prazo para término da obra.

2. QUESTÕES DE PESQUISA

O trabalho aborda a PL como técnica de otimização, e tem como função objetivo a minimização dos custos de construção. Desta forma, foi feita uma análise sistemática da literatura com a finalidade de obter questões de pesquisa a respeito da modelagem e possível contribuição técnico-científica do trabalho. Entre as perguntas elaboradas, estão:

- Como são obtidas as variáveis de decisão?
- Essas variáveis correspondem à realidade de campo?
- Como o planejamento do tempo será incorporado ao modelo?
- Como serão estimados os índices de produtividade das equipes?
- Como inserir atividades de pavimentação ligadas ao revestimento?
- Como inserir diferentes possibilidades de caminhos de serviço?

3. OBJETIVOS

Em resposta às questões de pesquisa, o objetivo principal do trabalho é desenvolver modelos de PL com intuito de minimizar o custo das operações de terraplenagem e pavimentação considerando o planejamento de tempo da obra. Entre os objetivos específicos estão: Compreender a utilização de técnicas de otimização dentro do projeto e planejamento de obras viárias, revisando e comparando os modelos matemáticos propostos na literatura; Avaliar se os modelos propostos na literatura são condizentes com as técnicas construtivas; Desenvolver uma metodologia de análise de projetos para obtenção das variáveis de decisão; Desenvolver um modelo de otimização que considere o tempo de execução das atividades e prazo de contrato; Validar o modelo através de projetos reais de terraplenagem e pavimentação.

4. MÉTODO

Para alcançar os objetivos definidos anteriormente, a pesquisa proposta foi dividida em três etapas: Formulação do problema, validação e análise comparativa dos resultados. Devido a inserção das atividades de pavimentação, serão utilizados dois modelos, o primeiro referente à dosagem das misturas asfálticas nas usinas e o segundo modelo referente à distribuição de materiais. O software IBM CPLEX foi utilizado para resolução dos modelos.

4.1. Modelo 1

O primeiro modelo é relativo à otimização da dosagem do material de revestimento, garantindo que seja utilizada uma dosagem padrão do concreto betuminoso usinado a quente. O modelo de PL apresenta como objetivo a minimização dos custos de dosagem através da escolha da proporção de diferentes agregados, tendo em vista que o teor de asfalto só poderá ser definido posteriormente através de ensaios. A função objetivo corresponde ao produto das porcentagens de cada agregado e do custo unitário correspondente (Função objetivo = \sum (custo unitário \times % agregados)). Entre as restrições estão os parâmetros de dosagem definidos pelo método Bailey conforme formulação de Vavrik (2000), sendo utilizados os intervalos de proporção de agregados graúdos, os intervalos da proporção graúda do agregado miúdo e os intervalos da proporção fina do agregado miúdo. Outra restrição está relacionada ao método de faixa de agregados dominantes (Kim, 2006), onde será estabelecido um valor máximo de porosidade que garanta uma composição estável do corpo pétreo da mistura asfáltica e resistência à deformação permanente. O modelo também apresenta restrições relativas aos limites granulométricos definidos por DNIT (2006) e AASHTO (2013).

4.2. Modelo 2

O segundo modelo tem a função de distribuir os materiais das obras de terraplenagem e pavimentação. A função objetivo corresponde ao produto do volume das movimentações de cortes (i) /empréstimos (k) para aterros (j) /bota-foras (w) e o custo unitário, com adição dos custos de execução do revestimento que englobam transporte, implantação das usinas, imprimação e compactação (Função objetivo = \sum [custo unitário (C) \times volume (X)] + custo do revestimento (Cr)). O custo do revestimento varia com o posicionamento da usina ao longo da extensão da rodovia, desta forma o modelo incorpora possíveis localizações de implantação da usina de asfalto. Também é proposta a utilização de diferentes possibilidades de caminhos de serviço (l) para transporte de material coletado de jazidas e para descarte de materiais em bota-foras, como apresentado na Figura 1.

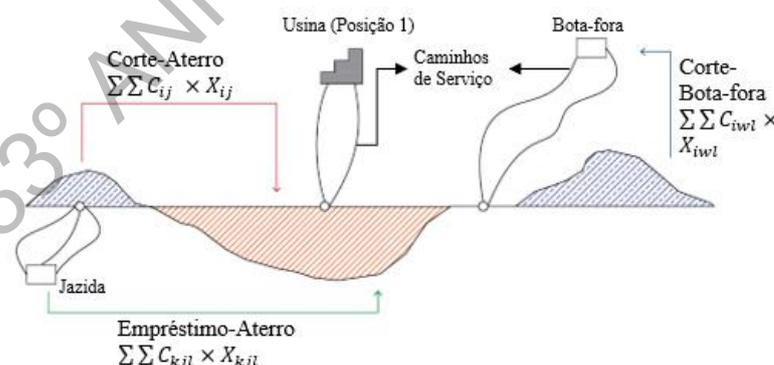


Figura 1: Perfil longitudinal e operações de movimentação de terra

Ao contrário das movimentações convencionais de corte para aterro, o custo unitário das movimentações empréstimo-aterro e corte-bota-fora envolve os custos de construção do caminho de serviço e os custos de transporte ao longo dessas vias. Esses custos unitários de transporte são função das rampas e das condições de rolamento, em consequência, será criada uma função de custo com base em dados de campo e de acordo com a teoria do trabalho mecânico, sendo utilizados coeficientes e considerações de Ricardo e Catalani (2007).

Entre as restrições do modelo estão as inequações que garantem o equilíbrio do volume

transferido das fontes (corte e empréstimos), o controle do volume recebido nos núcleos de demanda (aterros e bota-foras), e as restrições que asseguram o planejamento do tempo das operações. As restrições de tempo correspondem à razão entre o volume movimentado e o índice de produtividade horário designado a um conjunto de equipamentos. Em consequência, o trabalho inclui uma estimativa de produção mais prática em comparação a Jayawardane e Price (1994), independente de simulação. A estimativa tem base nas formulações de Ricardo e Catalani (2007) e Hicks (1993), sendo feita uma análise por regressão com base no volume movimentado, capacidade das unidades transportadoras, peso específico do material, rampa efetiva e tempo de ciclo médio das operações.

4.3. Validação e análise comparativa dos resultados

A validação dos modelos será feita através de um exemplo numérico fictício de menor porte e depois será realizada uma análise de projeto real, onde serão comparados o orçamento e planejamento otimizados aos produtos originais da obra. O projeto utilizado será o da rodovia BR-316, no segmento entre município de Canapi (AL) e o povoado de Carié (AL).

5. RESULTADOS ESPERADOS

Ao final da pesquisa espera-se obter redução dos custos globais do orçamento da rodovia BR-316 em comparação ao projeto original. Em análises prévias, considerando somente os custos de terraplenagem, houve redução de aproximadamente 16% no orçamento.

Agradecimentos

Agradecimento à CAPES pelo suporte e auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (2013) *M 323: Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. Washington, DC.
- DNIT (2006). *DNIT 031/2006: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico*. Rio de Janeiro, RJ.
- Falcão, A. F. (2016). *Modelo de roteirização para a terraplenagem em obras Rodoviárias aplicando programação linear inteira*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza
- Gwak, H. S., Seo, J., en Lee, D. E. (2018) Optimal cut-fill pairing and sequencing method in earthwork operation. *Automation in Construction*, 87, 60–73. doi:10.1016/j.autcon.2017.12.010
- Hare, L. W.; Koch, V. R.; Lucet, Y. (2011) Models and algorithms to improve earthwork operations in road design using mixed integer linear programming. *European J. of Op. Research*, n. 215, Julho 2011. 470-480.
- Hicks, J.C. (1993) Haul-unit Performance. *J. of Const. Eng. and Management*, v. 119, n. 3, p. 646-653.
- Jayawardane, A. K. W., & Price, A. D. F. (1994), *A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations*, Part I, In: Proceedings of Institution of Civil Engineers - Transport, 105, pp. 195-207.
- Kim, S. (2006). *Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture*. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Florida, Gainesville.
- Lima, R. X. de, Nobre Júnior, E. F., Prata, B. de A. e Weissmann, J. (2013). Distribution of materials in road earthmoving and paving: a mathematical programming approach. *J. of Const. Eng. and Management*. 2013.139:1046-1054.
- Mayer, R. H., Stark, R. M. (1981), Earthmoving Logistics. *Journal of the Construction Division*, Vol. 107, No. 2, June 1981, pp. 297-312.
- Mesquita, M. M. R. (2012). *Distribuição de terras usando uma extensão da Teoria de Brückner*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto. Porto.
- Nandgaonkar, S. M. (1981), Earthwork Transportation Allocations: Operations Research. *Journal of the Construction Division*, ASCE, Vol.107, No. 2, 1981, pp 373-392
- Ricardo, H. S., Catalani, G. (2007) *Manual Prático de Escavação*. Ed. PINI, São Paulo, SP.
- Vavrik, W. R. (2000) *Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock*. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Illinois.
- Yi, C., Lu, M. (2016) A mixed-integer linear programming approach for temporary haul road design in rough-grading projects. *Automation in Construction*, 71 (Part 2), 314–324. doi:10.1016/j.autcon.2016.08.022