

## UMA ABORDAGEM DE PROGRAMAÇÃO INTEIRA PARA OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO E REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS

**Matheus Gomes Correia**  
**Ernesto Ferreira Nobre Júnior**  
**Tibérius de Oliveira e Bonates**  
Universidade Federal do Ceará

### RESUMO

Uma rodovia em más condições pode aumentar drasticamente o custo operacional do transporte. Devido a restrições orçamentárias, a programação da manutenção de rodovias consiste em um difícil problema de tomada de decisão. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um novo modelo matemático e uma variante diferente do problema de gerenciamento de pavimentos, resolvido com programação inteira e dentro de tempos computacionais aceitáveis. Em relação ao problema, é apresentada uma formulação original de programação inteira, e os resultados são comparados com uma técnica de limite superior (*upper bound*). Vários experimentos computacionais foram realizados com dados gerados aleatoriamente, resolvendo o modelo utilizando um solver de programação inteira. Foi utilizado o relaxamento linear para obtenção dos limites superiores. O modelo obteve soluções ótimas em tempos computacionais satisfatórios e as soluções de relaxamento linear obtidas foram quase ótimas, de maneira mais rápida.

### 1. PROPOSTA DA PESQUISA

Uma rodovia em estado precário pode aumentar o custo operacional de transporte em até 91,5% (CNT, 2017). Portanto, a redução dos custos logísticos de produção está diretamente ligada à melhoria das estradas. Além disso, esta situação é ainda mais notória nos países em desenvolvimento, onde devido a recursos escassos as estradas são abandonadas. No entanto, a negligência não só leva a custos de transporte mais altos, mas também afeta a futura reabilitação de estradas, sendo executada por um valor muito mais alto, se não for realizada de forma otimizada.

O uso de um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) é necessário para permitir a tomada de decisão otimizada em termos de custo para manutenção de estradas. No entanto, devido a restrições orçamentárias, programar a manutenção de rodovias é um problema difícil de tomada de decisão. Assim, determinar quais segmentos de uma rodovia devem ser reparados, bem como como e quando o reparo adotado deve ser realizado, pode ser considerado como um problema de otimização combinatória.

Considerando o exposto, esta pesquisa em desenvolvimento propõe desenvolver um modelo de Programação Inteira que encontre a solução ótima do Problema de Manutenção de Pavimentos Plurianual (*Multi-Year Pavement Maintenance Problem – MYPMP*).

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA RESUMIDA

Nas últimas três décadas, uma atenção considerável foi dada ao desenvolvimento de ferramentas de otimização de SGPs (YOO, 2004). A abordagem mais comum é o uso de programação matemática. Quatro técnicas são utilizadas principalmente: Programação Linear (PL), Programação Inteira (PI, uma variante da PL), Programação Dinâmica (PD) e heurística (CANCIAN, 2016).

Segundo Bradley *et al.* (1977), para muitos pesquisadores o modelo de PI é um dos modelos mais importantes. No entanto, PL e PI não apresentam bom desempenho quando problemas

suscetíveis de explosão combinatória estão presentes, como é abordado neste trabalho. Para problemas com um enorme espaço de solução, recomenda-se uma abordagem de PD ou a utilização de heurísticas (CANCIAN, 2016).

Em relação à PL e PI, modelos que produzem políticas ótimas para estratégias de manutenção e reabilitação (M&R) foram desenvolvidos (GOLABI *et al.*, 1982; CHEN *et al.*, 1992; WANG *et al.*, 1993; GRIVAS *et al.*, 1993; MBWANA e TURNQUIST, 1996). LI *et al.*, 1998; YOO, 2004). Ainda assim, nenhum desses trabalhos abordou o problema em uma rede rodoviária em larga escala, uma vez que a PI se torna computacionalmente intensa, se são consideradas decisões plurianuais (YOO, 2004).

Como é extremamente difícil resolver esse problema de maneira ótima (SANTOS *et al.*, 2019), muitos esforços têm sido feitos para resolvê-lo por meio de PD (FEIGHAN *et al.*, 1988, 1989; TACK; CHOU, 2002) ou heurísticas, especificamente utilizando Algoritmos Genéticos (AGs) (CHAN *et al.*, 1994; FWA *et al.*, 1994; FWA *et al.*, 1996; TACK; CHOU, 2002; BOSURGI e TRIFIRÒ, 2006; HERABAT; TANGPHAISANKUN, 2005; MATHEW; ISAAC, 2013; ELHADIDY *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2019).

Esforços foram feitos para considerar diferentes objetivos, criando modelos mais complexos. Meneses (2013) considerou diferentes objetivos, propondo uma Ferramenta de Apoio à Decisão Multiobjetiva (MODAT). Bryce *et al.* (2014) desenvolveram uma técnica para considerar a relação entre custos, condição e consumo de energia. Khiavi e Mohammadi (2018) consideram três objetivos diferentes: minimizar o custo de agência, custos do usuário e maximizar o valor residual dos pavimentos no final do período analisado. Para resolver o modelo, um AG baseado em Ordenação Não-Dominada (NSGA-II) foi desenvolvido.

### 3. METODOLOGIA

Inicialmente, uma extensa revisão da literatura foi feita, buscando trabalhos na área em periódicos internacionais. Desta forma, identificou-se uma oportunidade de se utilizar PI para a resolução do MYPMP. Após a definição da utilização de PI, um modelo matemático foi criado. Buscou-se então o melhor solver disponível para resolver o MYPYP. Desta forma, o software escolhido foi o IBM ILOG CPLEX, pois tem uma linguagem de fácil programação (*Optimization Programming Language* - OPL) para implementação do modelo, além de obter os melhores resultados em comparação com os seus concorrentes e oferecer uma versão acadêmica gratuita e completa.

Para verificação e validação do modelo, várias instâncias aleatórias foram geradas, utilizando a linguagem de programação Python, variando os componentes do MYPYM, como o número de segmentos, tempo de planejamento e orçamento anual. As instâncias geradas foram executadas no CPLEX, computando: solução do relaxamento linear, tempo para obtê-lo, solução de programação inteira, tempo para obtê-lo, e o intervalo de relaxação linear.

Por fim, após confirmar que os resultados preliminares são satisfatórios, o próximo passo da pesquisa se trata de contatar outros autores para comparar soluções encontradas e tempos computacionais, como também de obter dados reais para a realização de um estudo de caso.

### 4. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

No fim da pesquisa, se espera ter desenvolvido um procedimento computacionalmente eficiente para o planejamento plurianual obtido por uma solução de programação inteira, além de desenvolver um modelo de predição linear simples da condição dos pavimentos. Espera-se também que o modelo desenvolvido seja capaz de resolver problemas compatíveis com uma rede rodoviária de um país, e que este mesmo modelo seja mais eficiente que os já existentes.

Utilizando as instâncias geradas aleatoriamente, o modelo foi executado no CPLEX, obtendo as soluções ótimas. Também se utilizou a técnica de relaxamento linear para obter os limites superiores, oferecendo assim uma solução próxima do ótimo, mas em um menor tempo. As instâncias geradas foram criadas alterando o número de segmentos, tempo de planejamento e orçamento anual. Para cada alteração desses componentes, 10 instâncias foram geradas. O número de segmentos utilizado foi de 100 ou 1.000 segmentos, o período de planejamento variou-se de 10, 20 ou 30 anos e o orçamento foi calculado também com uma certa variação. Sendo assim, 6 cenários diferentes são estudados e os resultados estão dispostos na Tabela 1.

**Tabela 1: Resultados preliminares**

Segmentos	Anos	zPI	tzPI(s)	zRL	tzRL(s)	DRL (%)
100	10	7.958,20	3,89	8.836,48	1,64	11,04%
	20	16.066,00	8,70	17.839,26	3,08	11,04%
	30	24.165,00	16,55	26.843,30	4,56	11,08%
1.000	10	79.610,80	91,22	88.408,60	43,19	11,05%
	20	160.784,10	167,00	178.416,18	79,19	10,97%
	30	241.849,10	292,14	268.420,50	138,82	10,99%

em que *zPI*: solução inteira;  
*tzPI*: tempo para obtenção da solução inteira;  
*zRL*: solução obtido pela relaxação linear;  
*tzRL*: tempo para obtenção da relaxação linear; e  
*DRL*: diferença entre a solução da relaxação linear e a solução inteira.

As três primeiras colunas, Segmentos, Anos e Orçamento, se referem a diferentes cenários. Cada cenário foi executado com 10 instâncias diferentes, e os resultados apresentados se refere à média das 10 instâncias. Na quarta e quinta coluna, *zPI* e *tzPI*, as soluções ótimas são dispostas, com o tempo para o encontro dessas soluções. A sexta e sétima coluna, *zRL* e *tzRL*, mostram também os mesmos resultados, mas quando realizado o procedimento de relaxação linear.

Quando se faz a relaxação linear, a solução obtida não é a ótima, mas pode estar muito próxima, sendo executada em tempo menor. Para identificarmos a qualidade dessas soluções, comparamos o quão distante essas soluções estão da ótima. Esses resultados se encontram na última coluna, *DRL*, simplesmente realizando a diferença entre as duas soluções, obtendo a porcentagem em relação à solução inteira.

Percebe-se que o modelo consegue encontrar em menos de 20 minutos a solução ótima das maiores instâncias, comprovando assim a qualidade do modelo desenvolvido. Também deve-se destacar que a relaxação linear encontra soluções muito próximas do ótimo, em tempo consideravelmente menor. Por exemplo, na maior instância, a relaxação linear provê uma solução 0,33% distante do ótimo, mas em apenas pouco mais de 2 minutos, ou seja, uma diferença de 18 minutos do procedimento que obtém a solução ótima.

Sendo assim, comprovada a eficiência do modelo, deseja-se aplicar a mesma metodologia para dados reais, realizando um estudo de caso. Pretende-se analisar todas as rodovias federais brasileiras (BRs), verificando se o modelo é capaz de suportar um número maior de segmentos. Caso não seja possível, um estudo sobre cada estado brasileiro deve ser realizado.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bosurgi, G. e Trifirò, F. (2006) A Genetic Algorithm Approach for Pavement Maintenance Program Optimization Using Safety Evaluation Data. *International Journal of Pavements*, v. 5, n. 1-2-3, p. 164-174.
- Bradley, S. P.; Hax, A. C. e Magnanti, T. L. (1977) *Applied Mathematical Programming* (1ª ed.). Addison-Wesley, Boston, EUA.
- Bryce, J. M.; Flintsch, G. e Hall, R. P. (2014) A Multi Criteria Decision Analysis Technique for Including Environmental Impacts in Sustainable Infrastructure Management Business Practices. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 32, p. 435-445.
- Cancian, G. A. (2016) *Heuristic Based Optimisation of Pavement Management Scheduling*. Griffith University, Austrália.
- Chan, W. T.; Fwa, T. F. e Tan, C. Y. (1994) Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. I: Formulation. *Journal of Transportation Engineering*, v. 120, n. 5, p. 693-709.
- Chen, X.; Claros, G. e Hudson, R. (1992) Mixed-Integer Programming Model for AASHTO Flexible Pavement Design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1344, p. 139-147.
- CNT (2017) *Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial*. Confederação Nacional do Transporte, Brasília, DF.
- Elhadidy, A. A.; Elbeltagi, E. E. e Ammar, M. A. (2015) Optimum Analysis of Pavement Maintenance Using Multi-Objective Genetic Algorithms. *HBRC Journal, Housing and Building National Research Center*, v. 11, n. 1, p. 107-113.
- Feighan, K. J.; Shahin, M. Y.; Sinha, K. C. e White, T. D. (1988) Application of Dynamic Programming and Other Mathematical Techniques to Pavement Management Systems. *Transportation Research Record*, n. 1200, p. 90-98.
- Feighan, K. J.; Shahin, M. Y.; Sinha, K. C. e White, T. D. (1989) A sensitivity analysis of the application of dynamic programming to pavement management systems. *Transportation Research Record*, n. 1215, p. 101-114.
- Fwa, T. F.; Chan, W. T. e Tan, C. Y. (1996) Genetic-Algorithm Programming of Road Maintenance and Rehabilitation. *Journal of Transportation Engineering*, v. 122, n. 3, p. 246-253.
- Fwa, T. F.; Tan, C. Y. e Chan, W. T. (1994) Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. II: Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, v. 120, n. 5, p. 710-722.
- Golabi, K.; Kulkarni, R. B. e Way, G. B. (1982) A Statewide Pavement Management System. *Interfaces*, v. 12, n. 6, p. 5-21.
- Grivas, D. A.; Ravirala, V. e Schultz, B. C. (1993) State Increment Optimization Methodology for Network-Level Pavement Management. *Transportation Research Record*, n. 1397, p. 25-33.
- Herabat, P. e Tangphaisankun, A. (2005) Multi-Objective Optimization Model using Constraint-Based Genetic Algorithms for Thailand Pavement Management. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, v. 6, p. 1137-1152.
- Khiavi, A. K. e Mohammadi, H. (2018) Multiobjective Optimization in Pavement Management System Using NSGA-II Method. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, v. 144, n. 2.
- Li, N.; Haas, R. e Huot, M. (1998) Integer Programming of Maintenance and Rehabilitation Treatments for Pavement Networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1629, n. 98, p. 242-248.
- Mathew, B. S. e Isaac, K. P. (2014) Optimisation of Maintenance Strategy for Rural Road Network Using Genetic Algorithm. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 15, n. 4, p. 352-360.
- Mbwana, J. e Turnquist, M. (1996) Optimization Modeling for Enhanced Network-Level Pavement Management System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1524, p. 76-85.
- Meneses, S. C. N. (2013) *Multi-Objective Decision-Aid Tool for Pavement Management*. Universidade de Coimbra, Portugal.
- Santos, J.; Ferreira, A. e Flintsch, G. (2019) An Adaptive Hybrid Genetic Algorithm for Pavement Management. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, n. 3, p. 266-286.

- Tack, J. e Chou, E. J. (2002) Multiyear Pavement Repair Scheduling Optimization by Preconstrained Genetic Algorithm. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1816, n. 02, p. 3–8.
- Wang, K. C. P.; Zaniewski, J.; Way, G. e Delton, J. (1993) Revisions to Arizona Department of Transportation Pavement Management System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1397, p. 68–76.
- Yoo, J. (2004) *Multi-period Optimization of Pavement Management Systems*. Texas A&M University, EUA.

---

Matheus Gomes Correia (matheus.correia@alu.ufc.br)

Ernesto Ferreira Nobre Júnior (nobre@ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici – Bloco 703 – Fortaleza, CE, Brasil

Tibérius de Oliveira e Bonates (tb@ufc.br)

Departamento de Estatística e Matemática Aplicada, Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici – Bloco 910 – Fortaleza, CE, Brasil