

7ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP

JUNHO DE 1996

**SIGMA: Um Sistema Especialista para Auxílio na Manutenção de
Pavimentos Urbanos**

Autores:

Régis Martins Rodrigues⁽¹⁾

Fernando Pugliero Gonçalves⁽²⁾

(1) Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Professor Adjunto

(2) Mestrando, ITA.

Resumo

A definição da medida de manutenção mais eficaz, em termos econômicos, a ser aplicada em uma dada situação é uma tarefa complexa, uma vez que exige a elaboração de um diagnóstico correto para os problemas e para o desempenho que o pavimento existente vem apresentando, bem como requer a análise das conseqüências de um grande número de alternativas aplicáveis. A fim de auxiliar os projetistas nessa definição, foi desenvolvido o sistema especialista SIGMA, o qual é descrito neste artigo, onde se ilustra sua aplicabilidade e se discute alguns de seus principais recursos.

1 - Introdução

A Inteligência Artificial é um ramo da Ciência da Computação que procura desenvolver técnicas que façam com que os computadores executem algumas das tarefas que são próprias da inteligência humana. Programas de computador que utilizam técnicas de Inteligência Artificial para auxiliar na resolução de problemas práticos complexos, que envolvem conhecimento teórico e empírico, procedimentos heurísticos e tomada de decisão são chamados de Sistemas Especialistas (SE).

O objetivo de um SE é capturar o componente sistemático da resolução de um problema por um ou mais especialistas. As vantagens principais de se desenvolver um SE são (Refs. [1] e [10]) :

1. O conhecimento é formalizado e clarificado, tornando-se mais explícito, acessível e expansível. Sua modularidade permite o contínuo aperfeiçoamento da base de conhecimento;
2. Um SE pode explicar seu comportamento para o usuário;
3. Um SE não toma decisões irracionais ou tendenciosas, mas usa um procedimento sistemático para encontrar a solução de um problema;

4. É possível combinar-se o conhecimento de muitos especialistas em uma base de conhecimento comum, a qual pode ser estudada quanto a sua consistência e quanto à confiabilidade de suas prescrições;
5. Problemas complexos, que requerem um elevado grau de experiência, proveniente de diversos especialistas em uma determinada área, podem ser resolvidos por não especialistas.

Este último aspecto adquire especial relevância no contexto da manutenção de pavimentos urbanos, onde é comum não haver a disponibilidade de especialistas capazes de levar à obtenção das soluções economicamente mais eficazes. O resultado disso é o procedimento usual de se adotar umas poucas soluções padronizadas, para as condições mais díspares entre si, e cuja relação custo-benefício tende a ser desconhecida ou claramente desfavorável.

Poucos SE's verdadeiros existem hoje, no sentido de sistemas cujo desempenho seja muito próximo do de um especialista humano. A tecnologia dos SE's se encontra na sua infância, de modo que um nome mais apropriado para eles seria "sistemas baseados em conhecimento" ou "auxiliares inteligentes" (Ref. [1]).

A tarefa de um SE no caso da manutenção de pavimentos é direcionar a seleção das medidas a serem aplicadas, de forma a que sejam evitadas as que levem a uma eficácia econômica desfavorável ou inferior. Além disso, o sistema deve ser capaz de prever quantitativamente as conseqüências econômicas e funcionais da adoção de todas as alternativas que forem aplicáveis ao problema, deixando ao usuário a tarefa de tomar as decisões finais. Este tipo de utilização para um SE é análogo ao que vem sendo dado para os SE's em projetos estruturais, onde se procura aumentar a eficiência do projetista, ao mesmo tempo em que o seu trabalho é tornado mais valioso, por agregar uma base de conhecimento (especificações, parâmetros) e recursos de interação cujo uso por meio de programas convencionais é trabalhoso, sendo muitas vezes proibitivo, em face de restrições de custo e de cronograma. Nestes casos, os SE's devem servir, portanto, como sistemas interativos inteligentes para a resolução de problemas, e como sistemas conselheiros que

aumentem as capacidades do usuário. As Refs. [4] a [8] descrevem aplicações de SE's dentro de Sistemas de Gerência de Pavimentos.

2 - Descrição do Sistema

O SIGMA (Sistema Cognitivo para Manutenção de Pavimentos Urbanos) auxilia o usuário na seleção das medidas de manutenção mais apropriadas para uma determinada via. Para tanto, as conseqüências econômicas e funcionais de cada alternativa são avaliadas, a ponto de se poder encontrar a utilização mais eficaz para os recursos. Constitui-se, portanto, em um Sistema de Gerência de Pavimentos em nível de projeto. Sua operação se dá de acordo com as seguintes etapas (Figura 1):

1. Entrada de dados, por meio de perguntas apresentadas na tela do computador e que variam em função das respostas que vão sendo dadas pelo usuário. Neste módulo, são inseridas informações gerais da via considerada, parâmetros requeridos pelas análises a serem efetuadas, custos unitários das alternativas de manutenção e elementos necessários ao cálculo dos custos operacionais dos veículos (Figura 2);
2. Elaboração de um diagnóstico para as deficiências e para o desempenho apresentado pelo pavimento;
3. Determinação das necessidades atuais de manutenção do pavimento, a partir de árvores de decisão;
4. Definição das medidas que podem ser consideradas aplicáveis, sendo que elas são classificadas em “**recomendáveis**” (quando corrigem todas as deficiências funcionais e estruturais), “**aceitáveis**” (quando corrigem as deficiências funcionais e atuam na direção de combater os mecanismos de degradação estrutural predominantes) ou “**paliativas**” (quando apenas corrigem as deficiências funcionais);

5. Dimensionamento de espessuras para as medidas consideradas aplicáveis, de modo a atender a uma vida de serviço mínima especificada pelo usuário e a restrições geométricas, como a máxima elevação de cota admissível;
6. Análise de conseqüências de alternativas propostas pelo usuário, em termos de parâmetros econômicos (custo no ciclo de vida, custo anual uniforme equivalente de manutenção e relação benefício-custo, considerando os custos operacionais dos veículos) e de parâmetros funcionais (vida de serviço, índice de serventia, degradação superficial e irregularidade longitudinal). Um dos modelos de previsão de desempenho utilizados pelo sistema foi desenvolvido com base no desempenho de restaurações efetuadas pela Prefeitura do Município de São Paulo (Ref. [3]). Outros modelos utilizados basearam-se nos modelos do HDM - III (Ref. [9]).

A Figura 3 mostra o conteúdo desses últimos componentes. A Figura 4 apresenta a última etapa do processo, onde as soluções obtidas para os diversos subtrechos homogêneos que compõem uma via são analisados de forma simultânea, de modo a se gerar alternativas que compatibilizem as soluções entre si.

O diagnóstico que é elaborado de forma automática pelo programa a partir dos dados fornecidos pelo usuário é a chave para todo o processo subsequente. A elaboração do diagnóstico segue as seguintes etapas:

1. Avaliação qualitativa do potencial para ocorrência de reflexão de trincas em uma camada asfáltica que seja eventualmente aplicada como recapeamento;
2. Avaliação da necessidade ou não de que a restauração seja efetuada por meio de um Sistema Anti-Reflexão de Trincas;
3. Detecção de necessidade de reforço estrutural do pavimento existente, em função do tráfego atuante e da estrutura do pavimento;
4. Avaliação da necessidade ou não de correção de atrito;

5. Verificação da necessidade de impermeabilização superficial, devido ao trincamento existente;
6. Avaliação da necessidade de regularização superficial devido às deformações plásticas;
7. Detecção de deficiências construtivas ou de drenagem, a partir de síntese de todos os dados fornecidos e das conclusões parciais obtidas nas etapas anteriores.

O sistema SIGMA auxilia o usuário no estabelecimento de medidas de conservação e restauração aplicáveis aos seguintes tipos de estruturas de pavimentos:

- Flexível em Concreto Asfáltico;
- Flexível em Tratamento Superficial;
- Semi-rígido;
- Paralelepípedos;
- Concreto Asfáltico sobre Paralelepípedos;
- Rígido Recapeado com CBUQ.

Figura 1 - Estrutura Geral do SIGMA

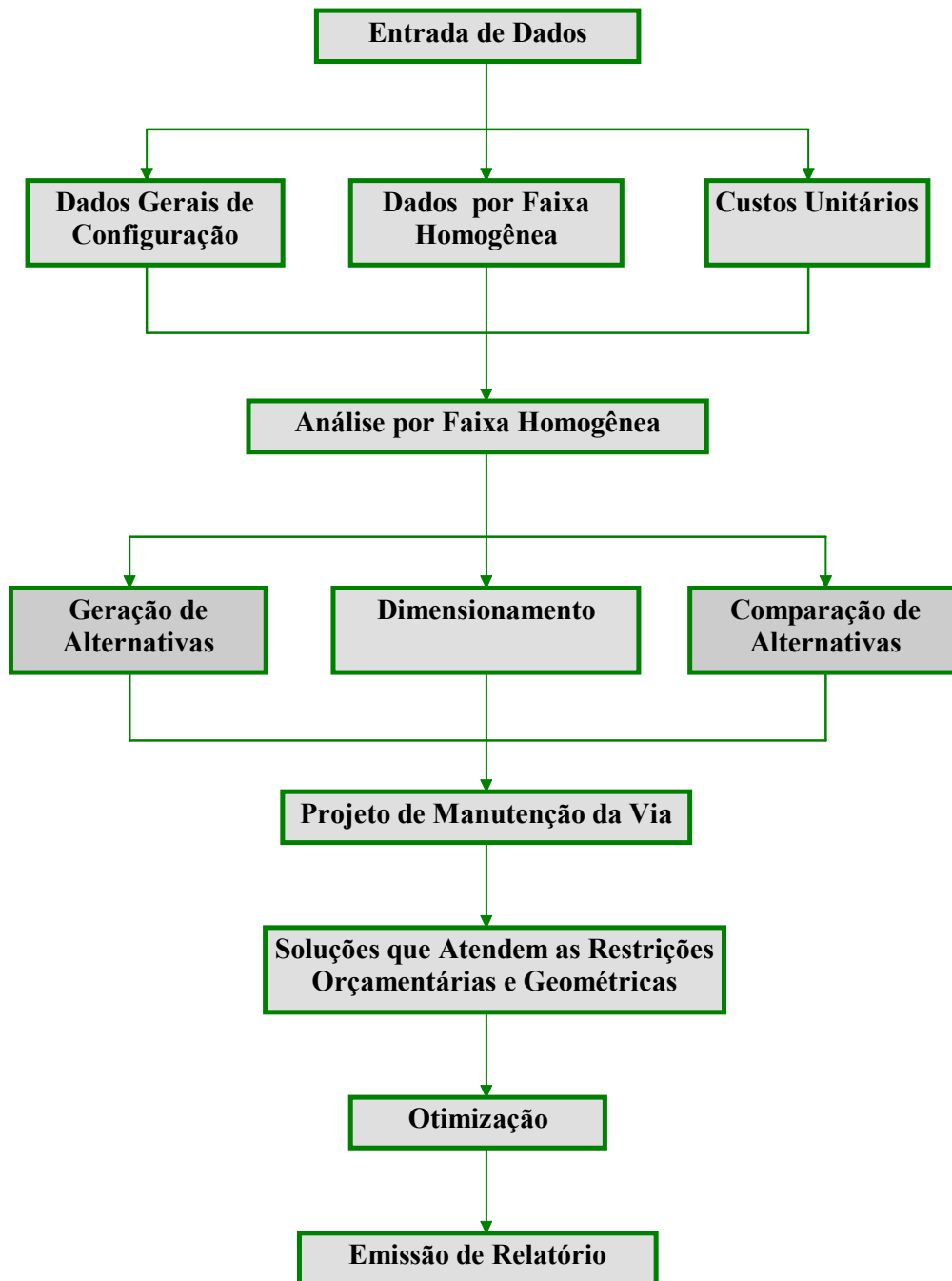


Figura 2 - Entrada de Dados

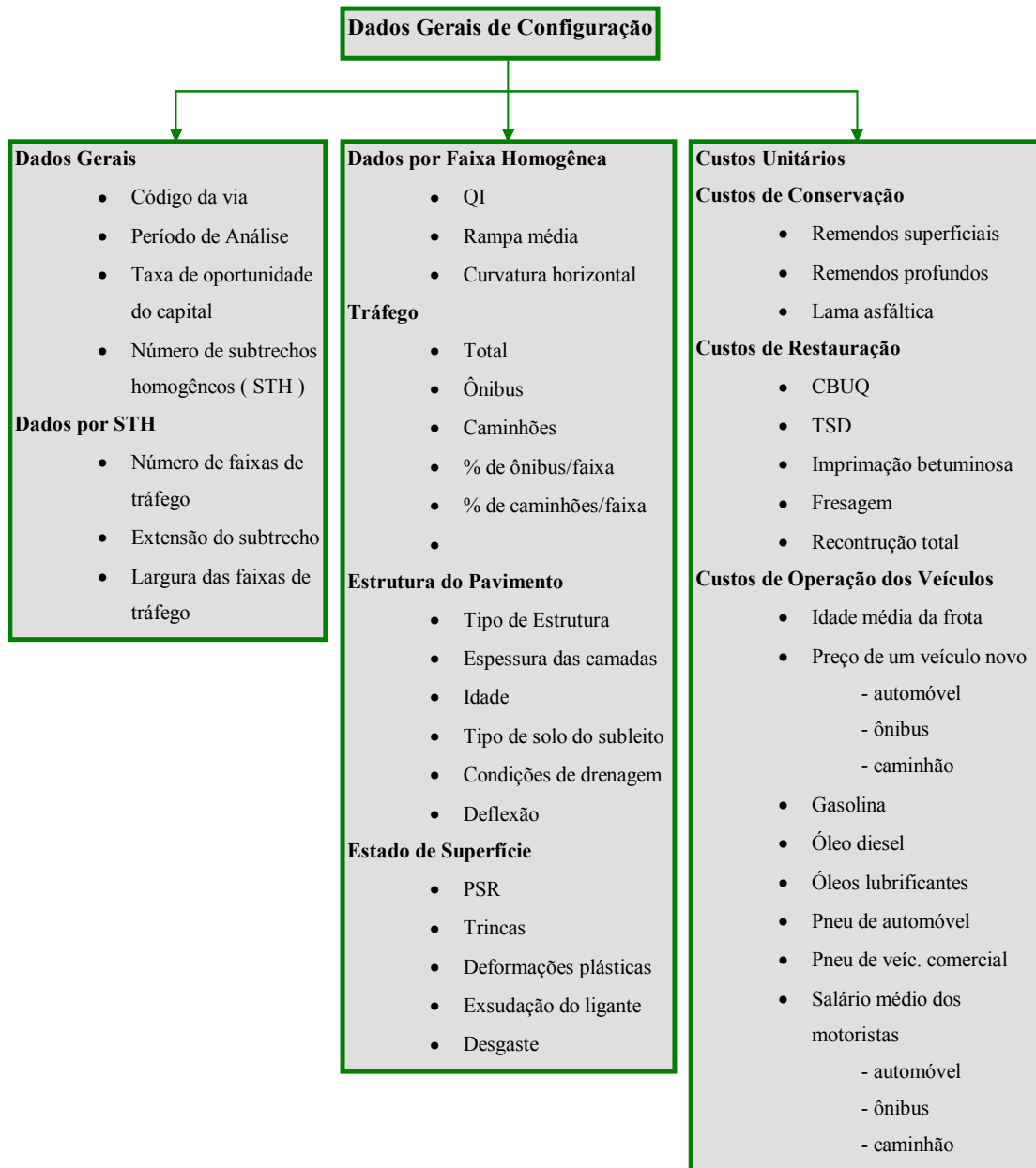


Figura 3 - Análise por Faixa Homogênea

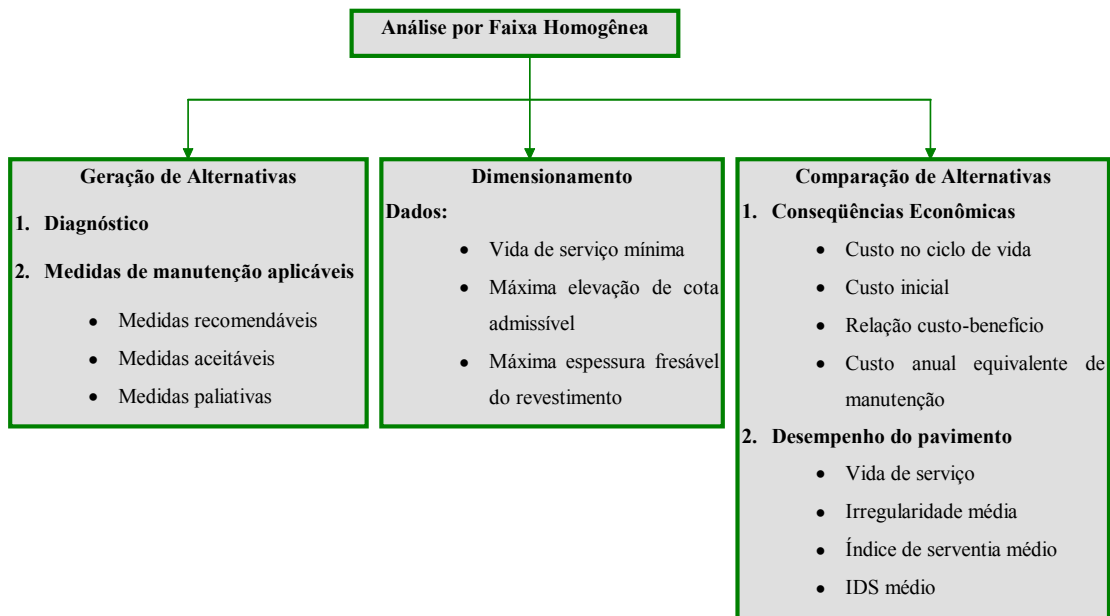
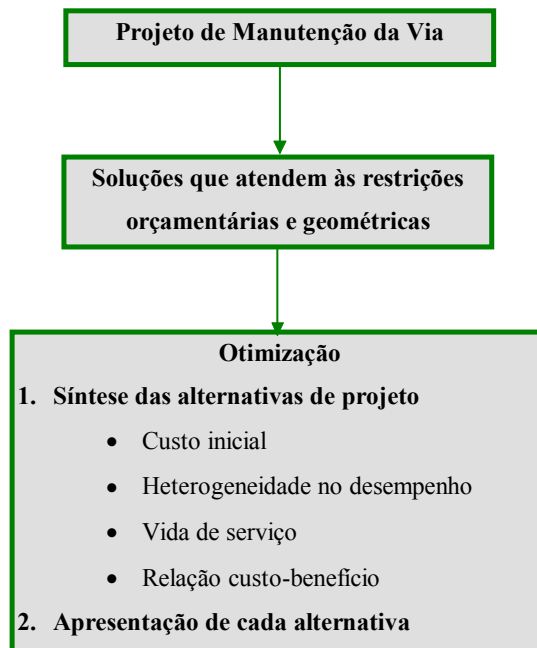


Figura 4 - Projeto de Manutenção da Via



A Tabela 1 mostra as categorias de medidas de restauração que podem ser consideradas para o caso de um pavimento asfáltico.

Tabela 1 - Tipos de Medida de Manutenção

CÓDIGO	DESCRIÇÃO
RS(H_R)	recapeamento simples em CBUQ, na espessura H _R
FR(h_c)+RC(H_R)	fresagem do revestimento existente na espessura h _c , seguida de recapeamento na espessura H _R
CI+RC(H_R)	colocação de camada intermediária especial contra reflexão de trincas, seguida de recapeamento (“Sistema Anti-Reflexão de Trincas”)
FR(h_c)+CI+RC(H_R)	combinação das duas medidas anteriores
MF+RC(H_R)	espalhamento, com patrol, de 3 cm de Massa Fina de CBUQ ($\phi_{\text{máx}} = 3/8''$ e 12 % de vazios) para selagem de trincas severas (espessura final compactada = 2 cm), seguido de recapeamento em CBUQ
RRV(h₁)	remoção e reconstrução completa do revestimento, em nova espessura h ₁ , a ser dimensionada
RECL(h)+RC(H_R)	reciclagem a frio de uma espessura h do pavimento existente, seguida de recapeamento em CBUQ;
RECL(h)+TSD	reciclagem de uma espessura h do pavimento existente, seguida de aplicação de revestimento em TSD
RRP	remoção e reconstrução parcial do pavimento, abrangendo as camadas de revestimento e base
RRT	remoção total do pavimento, até o nível do subleito, e reconstrução com um pavimento novo, dimensionado para o período de projeto

3 - Exemplo de Aplicação

Seja o caso de uma via com as seguintes condições:

- Pavimento flexível, com revestimento em CBUQ (8 cm) e idade de 15 anos;
- Tráfego atuante: VDM = 1200 veículos por dia por faixa, com 400 ônibus e 200 caminhões;
- Estado de superfície: PSR = 2,5 e defeitos descritos por: CR2A, O2A, D3A;
- Máxima elevação de cota admissível = 4 cm.

A Tabela 2 mostra as alternativas de restauração geradas pelo sistema, juntamente com os parâmetros requeridos para uma análise econômica e a condição média do pavimento durante um período de análise de 5 anos. Considerando-se o parâmetro que

mede a eficiência econômica das intervenções de restauração (o Custo Anual Uniforme Equivalente de Manutenção, CAUEM, definido pela razão entre o custo inicial e a vida de serviço da alternativa), tem-se que a solução ótima é a medida: $FR(4)+CI+RC(3)$. Em termos de soluções convencionais, a solução ótima passa a ser: $FR(4)+RC(8)$. Minimizando-se o custo inicial, tem-se que se pode adotar a alternativa: $FR(3)+RC(3,5)$, desde que uma vida de serviço de apenas 4 anos seja aceitável.

4 - Comentários Finais

O sistema vem sendo aplicado em casos práticos e revela ser útil e de utilização simples. Uma pesquisa, patrocinada pela FAPESP, se encontra em andamento com o objetivo de aperfeiçoar todo o processo, bem como definir melhor o escopo dos problemas onde sistemas dessa natureza possam ser eficazes.

Referências Bibliográficas

- [1] ADELI, H. - Expert Systems in Construction and Structural Engineering. Chapman and Hall, London, 1988.

- [2] HALL, K.T.; CONNOR, J.M.; DARTER, M.I. & CARPENTER, S.H. - “Development of an Expert System for Concrete Pavement Evaluation and Rehabilitation”. Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Volume 2, pp. 2289 - 2350, Toronto, 1987.

- [3] AZEVEDO, O.F. & RODRIGUES, R.M. - “O Desempenho de Restaurações com Fresagem e Recapeamento em Vias Urbanas”. 6-ª Reunião de Pavimentação Urbana - Santos, Abril de 1995, pp. 367 - 388.

- [4] HENDRICKSON, C.T. & JANSON, B.N. - “Expert Systems and Pavement Management”. Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Volume 2, pp. 2255 - 2266, Toronto, 1987.

- [5] RITCHIE, S.G. - "Applications of Expert Systems for Managing Pavements". Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Volume 2, pp. 2277 - 2288, Toronto, 1987.
- [6] HAJEK, J.J.; CHING, G.J.; HAAS, R.C.G. & PHANG, W.A. - "ROSE: A Knowledge - Based Expert System for Routing and Sealing". Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Volume 2, pp. 2301 - 2314, Toronto, 1987.
- [7] HAAS, C. & SHEN, H. - "PRESERVER: A Knowledge Based Pavement Maintenance Consulting Programme". Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Volume 2, pp. 2327 - 2338, Toronto, 1987.
- [8] MONISMITH C.L.; FINN F.N.; EPPS J.A. & KERMIT M. - "Survey of Applications of Systems for Managing Pavements in Local Governments". Second North American Conference on Managing Pavements. Proceedings, Volume 1, pp. 1.55 - 1.86, Toronto, 1987.
- [9] PATERSON, W.D.O. - Road Deterioration and Maintenance Effects - Models for Planning and Management. Johns Hopkins and The World Bank, Washington, D.C., 1987.
- [10] WEISS, S.M. & KULIKOWSKI, C.A. - A Practical Guide to Designing Expert Systems. Rowman & Allanheld Publishers, New Jersey, 1984.

Tabela 2 - Alternativas de Restauração Geradas

Alternativa	Custo	CAUEM	V_s (anos)	PSR_{med}	QI_{med}	IGG_{med}
FR(3)+RC(3,5)	74900	18557	4,0	3,27	50,8	47,0
FR(3)+RC(4)	79100	17733	4,5	3,42	46,6	39,2
FR(4)+RC(4)	79100	17369	4,6	3,44	45,6	37,7
FR(3)+RC(5)	87500	16140	5,4	3,67	39,8	27,2
FR(4)+RC(5)	87500	16086	5,4	3,67	39,5	27,0
FR(4)+CI+RC(3)	87500	10771	8,1	4,05	31,7	12,5
FR(3)+RC(6)	95900	14699	6,5	3,87	34,9	19,0
FR(4)+RC(6)	95900	14829	6,5	3,86	34,8	19,4
FR(3)+CI+RC(4)	95900	13025	7,4	3,97	32,7	15,1
FR(4)+CI+RC(4)	95900	12033	8,0	4,03	31,3	13,0
FR(3)+CI+RC(5)	104300	13537	7,7	4,01	31,5	13,9
FR(4)+CI+RC(5)	104300	12706	8,2	4,06	30,5	12,3
FR(3)+CI+RC(6)	112700	13789	8,2	4,05	30,3	12,4
FR(4)+CI+RC(6)	112700	13079	8,6	4,09	29,5	11,3
FR(3)+RC(7)	114800	14764	7,8	4,02	31,4	13,6
FR(4)+RC(7)	114800	15033	7,6	4,00	31,5	14,1
FR(5)+RC(5)	122500	23275	5,3	3,63	40,2	28,7
FR(5)+CI+RC(3)	122500	14452	8,5	4,08	31,0	11,6
FR(4)+RC(8)	123200	13752	9,0	4,11	29,0	10,5
FR(5)+RC(6)	130900	21041	6,2	3,82	35,5	20,9
FR(6)+RC(6)	130900	22787	5,7	3,73	37,2	24,3
FR(5)+CI+RC(4)	130900	15909	8,2	4,06	30,8	12,3
FR(6)+CI+RC(4)	130900	16424	8,0	4,03	31,1	13,0
FR(5)+CI+RC(5)	139300	16542	8,4	4,07	30,0	11,7
FR(6)+CI+RC(5)	139300	16969	8,2	4,06	30,2	12,3
FR(5)+CI+RC(6)	147700	16781	8,8	4,10	29,1	10,9
FR(6)+CI+RC(6)	147700	17141	8,6	4,09	29,3	11,3
FR(5)+RC(7)	149800	20486	7,3	3,97	32,0	15,3
FR(6)+RC(7)	149800	22152	6,8	3,90	33,3	17,8
FR(5)+RC(8)	158200	18515	8,5	4,08	29,5	11,4
FR(6)+RC(8)	158200	20007	7,9	4,03	30,4	13,2