Campus de São Carlos

*SÉRIES TEMPORAIS E ESTUDOS SOBRE
COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS*

GLAUCO PONTES FILHO

ORIENTADOR: PROF. TITULAR DR. JOSÉ BERNARDES FELEX

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Transportes

SÉRIES TEMPORAIS E ESTUDOS SOBRE
COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS

Glauco Pontes Filho

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Professor Titular Dr. José Bernardes Felex

São Carlos - SP

1999

Classe	TESE-EEYC
Cutt.	14543
Tombo	209/99

5/5 1053766

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P814s Pontes Filho, Glaucio
Séries temporais e estudos sobre comportamento de
pavimentos / Glaucio Pontes Filho. -- São Carlos, 1999.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. José Bernardes Felex.

1. Pavimento. 2. Avaliação. 3. Séries temporais.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **GLAUCO PONTES FILHO**

Tese defendida e aprovada em 03-05-1999
pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular **JOSE BERNARDES FELEX** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **EDSON MARTINS DE AGUIAR**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **JOSÉ ALEX SANT'ANNA**
(Universidade de Brasília - UnB)

Prof. Doutor **MARCOS ANTONIO GARCIA FERREIRA**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Prof. Doutor **JAIRO SALIM PINHEIRO DE LIMA**
(UNESP - Campus de Ilha Solteira)

Prof. Doutor **ANTÔNIO NÉLSON R. DA SILVA**
Coordenador da Área de Transportes

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

*À minha mãe,
Mércia de Araújo Pontes*

AGRADECIMENTOS

*Ao Professor Titular Dr. José Bernardes Felex, nosso orientador.
À CAPES pela bolsa que nos concedeu.*

*Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná por nos
permitir acesso aos dados de seu trabalho.*

*À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
por nos acolher.*

*Ao Professor Doutor Manoel Henrique Alba Sória que nos orientou no
mestrado.*

*Aos professores e funcionários e amigos do Departamento de
Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo.*

*Aos engenheiros Rubens Brazetti, José Pesuschi e Szabô, do
Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, pela
valiosa contribuição no fornecimento dos dados que tornaram
possível este trabalho.*

*A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a
conclusão deste trabalho.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	SOBRE ESTUDO DE COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS.....	3
2.1	DEFEITOS DE SUPERFÍCIE EM PAVIMENTOS.....	5
2.2	UM ÍNDICE PARA DESCREVER O ESTADO DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS	8
3	DOS DADOS.....	21
3.1	OS PAVIMENTOS NA RODOVIA	23
3.2	OS DADOS SOBRE DEFEITOS NA VIA PR-090.....	26
3.3	ESTIMATIVAS DE “PAVEMENT CONDITION INDEX”	29
4	USO DE SÉRIES TEMPORAIS.....	30
4.1	COMPORTAMENTO DE VALORES DE ELEMENTOS DE SÉRIES TEMPORAIS	32
4.2	REMOÇÃO DE EFEITOS DE CARACTERÍSTICAS	34
4.3	USO DE VALORES ASSUMIDOS POR SÉRIES TEMPORAIS	36
4.4	AS VARIAÇÕES ALEATÓRIAS	38
4.5	PROCESSAMENTO DE DADOS SOBRE SÉRIES TEMPORAIS	40
4.6	O PROCESSO ARIMA PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE ELEMENTOS DE SÉRIE TEMPORAL....	50
4.7	FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE ELEMENTOS DE SÉRIES TEMPORAIS.....	52
4.8	CONTROLE DE QUALIDADE SOBRE FUNÇÕES GERADAS PELO MODELO ARIMA	59
4.8.1	<i>Controle sobre a “existência” de funções para estimativa.....</i>	<i>60</i>
4.8.2	<i>Controle sobre erros de previsão por funções para estimativa.....</i>	<i>62</i>
4.9	O PROCESSAMENTO DE DADOS EM COMPUTADORES	64
5	ARIMA E COMPORTAMENTO DE PAVIMENTOS	65
5.1	A EXISTÊNCIA DAS FUNÇÕES OU RELAÇÕES ENTRE TEMPO E VALORES DE ELEMENTOS DE SÉRIES TEMPORAIS.....	66
5.2	EFICIÊNCIA DE FUNÇÕES PARA PREVISÃO DE “PAVEMENT CONDITION INDEX”	82
5.2.1	<i>Consequências da existência de funções eficientes para estimativas de “pavement condition index”</i>	<i>91</i>
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	92
7	BIBLIOGRAFIA.....	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CAMADAS CONSTITUINTES DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	1
FIGURA 2 – A RODOVIA PR-090 DURANTE A CONSTRUÇÃO.....	2
FIGURA 3 – VARIAÇÃO DE MEDIDAS PARA A SERVENTIA (ADAPTADO DE HAAS & HUDSON, 1978) ..	4
FIGURA 4 – ESCALA PARA AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DE VIAGEM POR PAVIMENTOS (ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)).....	10
FIGURA 5 – “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE REMENDOS EM PAVIMENTOS [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)].....	11
FIGURA 6 - “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE BURACOS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)]	12
FIGURA 7 - “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE DEFEITOS NA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS (APENAS UMA CURVA PARA TODAS SEVERIDADES) [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)].....	12
FIGURA 8 - “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE AFUNDAMENTO NAS TRILHAS DE RODAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)]	13
FIGURA 9 - “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE CORRUGAÇÕES EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)]	13
FIGURA 10 - “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE TRINCAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)]	14
FIGURA 11 - “PERDA DE SERVENTIA” E OCORRÊNCIA DE TRINCAS POR FADIGA EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)]	14
FIGURA 12 – VALOR CORRIGIDO POR $f(t, q)$ DE “PERDA DE SERVENTIA” [ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979)].....	19
FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE O “PAVEMENT CONDITION INDEX” E “ESTADO DE PAVIMENTO” (ADAPTADO DE SHAHIN & KOHN (1979))	20
FIGURA 14 - LOCALIZAÇÃO DA VIA QUE LIGA O TREVO DE ASSAÍ A PAU D'ALHO.....	21
FIGURA 15 – VISTA DA PR-090	22
FIGURA 16 - ESBOÇO SOBRE O RELEVO DO ESTADO DO PARANÁ (ARANOVICH, 1985).....	23
FIGURA 17 – BASES NO PAVIMENTO DA VIA QUE LIGA O TREVO DE ASSAÍ A PAU D'ALHO	24
FIGURA 18 – REVESTIMENTOS NO PAVIMENTO DA VIA QUE LIGA O TREVO DE ASSAÍ A PAU D'ALHO	25

FIGURA 19 - SARJETAS TIPO "1" E "3" CONFORME ESPECIFICADO EM DER/PR ES-D 01/91	25
FIGURA 20 - DETALHE DA DRENAGEM SUPERFICIAL NA VIA PR-090	26
FIGURA 21 - LEVANTAMENTOS DE DADOS.....	26
FIGURA 22 - COMPONENTES DA TENDÊNCIA DE VALORES DE SÉRIES TEMPORAIS (STEVENSON, 1981)	33
FIGURA 23 – DIAGRAMA TEÓRICO DO MODELO BOX & JENKINS	40
FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DAS TRANSFORMAÇÕES ATRAVÉS DE UM FILTRO LINEAR	46
FIGURA 25 - DIAGRAMA DE BLOCOS PARA REPRESENTAR O PROCESSO ARIMA.	52
FIGURA 26 – OBSERVAÇÕES E PREVISÕES DE VALORES DE ELEMENTOS DE SÉRIE TEMPORAL DE ORIGEM EM "T" E HORIZONTE EM "H"	63
FIGURA 27 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 0 E 12 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,2,0)	83
FIGURA 28 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 12 E 24 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,1).....	84
FIGURA 29 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 24 E 37+10 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,0).....	84
FIGURA 30 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 37+10 E 52 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,0).....	85
FIGURA 31 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 100 E 120 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,1).....	85
FIGURA 32 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 120 E 125 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,0).....	86
FIGURA 33 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 125 E 135 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,0).....	86
FIGURA 34 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 147 E 150 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,2,0).....	87
FIGURA 35 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 175 E 192 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,1).....	87
FIGURA 36 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 192 E 200 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,1).....	88
FIGURA 37 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE "PAVEMENT CONDITION INDEX" ENTRE ESTACAS 604=3 E 12 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,0).....	88

FIGURA 38 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” ENTRE ESTACAS 60 E 116 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (2,0,0).....	89
FIGURA 39 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” ENTRE ESTACAS 141 E 152 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,1,1).....	89
FIGURA 40 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” ENTRE ESTACAS 167 E 250 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,2,0).....	90
FIGURA 41 – MELHOR FUNÇÃO PARA ESTIMATIVA DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” ENTRE ESTACAS 250 E 280 DA PR-090, FUNÇÃO TIPO (1,2,0).....	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DESCRIÇÃO DE DEFEITOS NA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS (SHRP, 1993).....	7
TABELA 2 – COEFICIENTES CARACTERÍSTICOS DE “FUNÇÕES LOGÍSTICAS” PARA ESTIMATIVA DE “PERDAS DE SERVIENTIA EM FUNÇÃO DE DENSIDADE DE TIPOS DE DEFEITOS”.....	16
TABELA 3 – COEFICIENTES DE POLINÔMIOS PARA ESTIMATIVA DE “PERDAS DE SERVIENTIA” EM FUNÇÃO DE DENSIDADE DE TIPOS DE DEFEITOS	17
TABELA 4 – COEFICIENTES DE POLINÔMIOS PARA ESTIMATIVA DE “PERDAS DE SERVIENTIA” EM FUNÇÃO DE DENSIDADE DE TIPOS DE DEFEITOS	19
TABELA 5 – TIPO E VOLUME DE OCORRÊNCIAS DE DEFEITOS NA VIA QUE LIGA O TREVO DE ASSAÍ A PAU D’ALHO (PARTE 1).....	27
TABELA 6 – TIPO E VOLUME DE OCORRÊNCIAS DE DEFEITOS NA VIA QUE LIGA O TREVO DE ASSAÍ A PAU D’ALHO (PARTE 2).....	28
TABELA 7 – ESTIMATIVA DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” PARA AS OBSERVAÇÕES SOBRE A VIA QUE LIGA O TREVO DE ASSAÍ A PAU D’ALHO	29
TABELA 8- RESUMO DO COMPORTAMENTO DAS FUNÇÕES PARA AUTOCORRELAÇÃO PARA UM PROCESSO ARIMA DE ORDEM (p, d, q) [BOX & JENKINS (1976)]	55
TABELA 9 - ESTIMATIVA DE ERROS PADRÕES DAS MÉDIAS DOS $\hat{w}_t$, QUANDO $w_t = \nabla^d z_t$, E z_t É FUNÇÃO QUE REPRESENTA UM MODELO ARIMA	58
TABELA 10 – TIPOS DE FUNÇÃO PARA ORIENTAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE DADOS NA OBTENÇÃO DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE ELEMENTOS DE SÉRIES TEMPORAIS.....	61
TABELA 11 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 0 A 12	67
TABELA 12- EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 12 A 24	68
TABELA 13 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 24 A 37+10	69
TABELA 14 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 37+10 A 52	70
TABELA 15 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 100 A 120.....	71

TABELA 16 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 120 A 125.....	72
TABELA 17 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 125 A 135.....	73
TABELA 18 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 147 A 150.....	74
TABELA 19 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 175 A 192.....	75
TABELA 20 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 192 A 200.....	76
TABELA 21 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 604=3 A 12	77
TABELA 22 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 60 A 116.....	78
TABELA 23 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 141 A 152.....	79
TABELA 24 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 167 A 250.....	80
TABELA 25 - EXISTÊNCIA DE FUNÇÕES PARA ESTIMATIVA DE VALORES DE “PAVEMENT CONDITION INDEX” NA VIA PR-090, SEGMENTO ENTRE AS ESTACAS 250 A 280	81
TABELA 26 – ERROS MÉDIOS QUADRÁTICOS NA PREVISÃO DE “PAVEMENT CONDITION INDEX”	82
TABELA 27 – LISTAGEM DE FIGURAS DE REFERÊNCIA À FUNÇÕES MAIS EFICIENTES PARA ESTIMATIVAS DE “PAVEMENT CONDITION INDEX NA VIA PR-090	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>DNER</i>	<i>Departamento Nacional de Estradas de Rodagem</i>
<i>DER/PR</i>	<i>Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná</i>
<i>DER/SP</i>	<i>Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo</i>
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>IGI</i>	<i>Índice de Gravidade Individual</i>
<i>IGG</i>	<i>Índice de Gravidade Global</i>
<i>PCI</i>	<i>Pavement Condition Index</i>
<i>ES-D</i>	<i>Especificação de Serviço - Drenagem</i>
<i>ES-P</i>	<i>Especificação de Serviço - Pavimentação</i>
<i>AASHO</i>	<i>American Association of State Highway Officials</i>
<i>NCHRP</i>	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
<i>TRB</i>	<i>Transportation Research Board</i>
<i>HRB</i>	<i>Highway Research Board</i>
<i>SHRP</i>	<i>Strategic Highway Research Program</i>
<i>CERL</i>	<i>U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory</i>
<i>EMBRAPA</i>	<i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i>
<i>EQMP</i>	<i>Erro quadrático médio de previsão</i>
<i>ARIMA</i>	<i>Autoregressive integrated moving average</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$	Conjunto de variáveis independentes
α	Fator de regularização
$\{a_t, a_{t-1}, a_{t-2}, \dots\}$	Ruído branco
β_i	Vetor de controle com i elementos, para auto-regressão
B	Operador para indicar troca para o elemento anterior da série temporal, tal que: $Bz_t = Bz_{t-1}$, ou $B^m z_t = Bz_{t-m}$
C	Valores de variações cíclicas de valores assumidos por elementos pertencentes a séries temporais
$\text{cov}[\dots]$	Estimativa da covariância
δ	Incremento muito pequeno
d	d -ésima diferença no processo de variação de valores
D	Próximo valor de elemento da série
D_i	Demanda da região R_i
d_i	Distância
ε	Erro máximo de estimativa
$E[z_t]$ $E[\cdot]$	Esperança matemática
Es_i	Curva de excesso de oferta ou exportação da região i
$\phi^{-1}(B)$	Função de transferência
$\alpha(B)$	Operador para estudo da auto-regressão
F	Um dos padrões de estimativas para estudos dos w , chamados padrões F de valores iniciais das séries w , que podem ser usados para geração de modelos de estimativa de valores e resíduos.
$F = B^{-1}$	Operador para indicar troca para o elemento posterior da série temporal, tal que: $Fz_t = Fz_{t+1}$, ou $F^m z_t = Fz_{t+m}$
Γ_n	Matriz de covariância associada ao processo observado n vezes
$G_1^{-1}, G_2^{-1}, \dots, G_p^{-1}$	Raízes da equação característica $\phi(B) = 0$
$\sim$	Estimativa de autocovariâncias e autocorrelações de um conjunto de observações sobre uma série temporal efetuada em função de estimadores definidos para o k -ésimo conjunto de intervalos
γ_k	Função de geração de autocovariâncias
$\gamma(B)$	Autocovariância correspondente ao número de intervalos de tempo entre k observações
λ_k	
H_j^{-1}	Raízes de $\pi(B)$
I	Valores de variações aleatórios ou irregulares de valores assumidos por elementos pertencentes a séries temporais
$\varphi(B)$	Operador estacionário para auto-regressão
$L(\xi z)$	Função de verossimilhança,

λ	Peso durante a regularização de uma série temporal
Lb	Lucro bruto da empresa
L_t	Função linear, dos valores dos elementos z_t ,
μ	Parâmetro que define o "nível" do processo estocástico
Mc_i	Margem de contribuição do equipamento. i
MM	Média móvel
$\nabla^{-1}z_t = Sz_t$	Operador inverso de ∇z_t
∇z_t	Operador para diferenças em ordem inversa, $\nabla z_t = z_t - z_{t-1} = (1-B)z_t$
n	Número de observações
$\pi(B)$	Inversa de $\Psi(B)$ ou seja $\pi(B) = \Psi^{-1}(B)$
$p(z \xi)$	Probabilidade de ocorrência de medidas ou contagens dependente de fatores desconhecidos ξ
p	Número diferente de n
$p(z)$	Distribuição de probabilidade dos valores de elementos da série z_t
P_i	Preço do produto na região i
P_n	Matriz de autocorrelação associada ao processo observado n vezes
$\phi(B)$	Operador para transformação em médias móveis, função de transferência
q	Um número finito
Q_i	Quantidade produzida pelo equipamento i
ρ^k	Autocorrelação correspondente ao número de intervalos de tempo entre k observações
r_k	Estimador de ρ_k
σ_z^2	Variância de z
S	Valores de variações sazonais de valores assumidos por elementos pertencentes a séries temporais
S^d	Função de transferência
t	Teste t de Student
t	Ordem sequencial dos elementos da série temporal
T	Valores de variações de tendência secular de valores assumidos por elementos pertencentes a séries temporais
$t_1, t_2, \dots, t_n$	Tempos associados aos valores de elementos de série temporal
$\text{var}[\dots]$	Estimativa da variância
V_m	Volume médio produzido pela empresa ou esperado
V_s	Valor regularizado
V_{s-1}	Valor regularizado anterior
w	Serie w das diferenças $w_1, w_2, \dots, w_n$
$\chi^2_\varepsilon(k)$	O correspondente χ^2 para ε e k ,
ξ	Valores desconhecidos
$\Psi(B)$	Operador linear que transforma a_t em z_t , chamado de função de transferência do filtro linear, série geradora dos pesos Ψ
$Y(t)$	Função que expressa valores assumidos por elementos pertencentes a séries temporais
z_{t-j}	Valor do elemento da série, de ordem $t-j$, a ser regularizado
$z_t, z_{t-1}, z_{t-2}, \dots$	Desvios em relação a μ

$\bar{z}_t$	Resíduos de z_t
$\bar{z}_{t-1}(\lambda)$	Valor regularizado de ordem $t-1$
$\hat{z}$	Estimador de z
z_t	Estimativas de observações de valores de elementos da série temporal correspondentes ao tempo t depois de t
$z_{t+1}, z_{t+2}, \dots, z_{t+n}$	Elementos da série
$z_{t-1}, z_{t-2}, \dots, z_{t-n}$	Estimativas de observações de valores de elementos da série temporal em tempos posteriores a t
T_i	Estimativas de observações de valores de elementos da série temporal em tempos anteriores a t
S_j	tipo de defeito i (trinca, remendo etc.) em pavimento
D_{ij}	nível de severidade j para dado tipo de defeito
$A, B_1, B_2, \dots, B_{n-1}, B_{n-2}$	densidade, ou seja a área de ocorrência do tipo de defeito i com severidade j pelo total de área observada
A_1, A_2, x_0, p	coeficientes da função polinomial;
$a(\) = a(T_i, S_j, D_{ij})$	coeficientes característicos de função logística
i	perda de capacidade para servir ao tráfego, cujas variáveis independentes são o tipo (T_i), nível de severidade (S_i) e densidade (D_{ij}) de defeitos
j	índice associado aos tipos de defeitos
p	índice associado aos níveis de severidade de defeitos
m_i	número de tipos de defeitos
$f(t, q)$	nível de severidade para o i -ésimo tipo de defeito
$\hat{z}_{t-h}(h)$	uma função de "perda de serventia" e número de "perdas de serventia" menores que cinco
h	estimativa, através da "função para estimativa", de valor para o elemento que esteja na posição da observação definida por um índice entre $(m+1)$ e N ;
N	o número de intervalos de tempo após a última observação;
M	é o número de observações;
	é um número de últimos valores observados para elementos da série temporal sob análise

RESUMO

PONTES FILHO, G. (1999). *Séries temporais e estudos sobre comportamento de pavimentos*. São Carlos, 1999, 113p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esse trabalho relata e discute resultados obtidos em uma tentativa para mostrar que séries temporais podem ser úteis e eficientes para identificar informações sobre características de comportamento de pavimento ao longo do tempo em que é submetido às solicitações de cargas provenientes de tráfego de eixos de veículos. Os dados e informações utilizadas foram obtidas por observações sobre o comportamento de um trecho experimental de via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho, no nordeste do estado do Paraná. Os dados foram manuseados em computador através do método para busca de funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais "Autoregressive Integrated Moving Average" para obter informações sobre o comportamento de índice para expressar o "estado de pavimento".

Palavras-chave: pavimento, avaliação, séries temporais

ABSTRACT

PONTES FILHO, G. (1999). *Contribution to Pavement Performance Modelling*. São Carlos, 1999, 113p. Doctor Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The results obtained on trying to show that time series should be useful and efficient in identifying information on the behavior of pavements submitted to vehicle axle load traffic were reported and discussed. The data and inputs used were obtained from observing the experimental road segment Assai to Pau D'Alho in Northeast of Parana State (Brazil). The data were processed in computers using the "Autoregressive Integrated Moving Average" method to search for estimating values functions for components of time series and obtain information on a pavement performance index.

Keywords: pavement, evaluation, time series

1 Introdução

Pavimento é o revestimento do solo natural com cimento, pedras, mosaicos, asfalto, etc., para trânsito de pedestres ou de veículos. Pode também ser definido como um conjunto de camadas superpostas à terraplanagem de uma via. As *camadas de pavimento* são construídas com materiais escolhidos e execução controlada. *Subleito* é o terreno que serve de fundação a um pavimento.

O *pavimento flexível* é uma classe específica de pavimentos compostos por camadas relativamente esbeltas construídas sobre o subleito compactado de vias, com materiais granulares e ligante. Dentre os ligantes destaca-se o asfalto derivado de petróleo. O termo *pavimento* designará o *pavimento flexível de rodovias*. A Figura 1 ilustra a nomenclatura sobre camadas em pavimentos flexíveis.

Figura 1 – Camadas constituintes de pavimentos flexíveis

Série temporal é um conjunto de observações de valores de uma ou mais variáveis em instantes distintos e sucessivos de tempo.

O presente trabalho relata e discute resultados obtidos em uma tentativa para mostrar que séries temporais podem ser úteis e eficientes para identificar informações sobre características de comportamento de pavimento ao longo do tempo em que é submetido às solicitações de cargas provenientes de tráfego de eixos de veículos.

Os dados e informações utilizadas foram obtidas por observações sobre o comportamento de um trecho experimental de rodovia na via que liga Assaí a Pau D'Alho, no nordeste do estado do Paraná, no que se refere aos defeitos da superfície dos pavimentos. O segmento estudado (PR-090) tem 18.480 metros de comprimento e foi usado pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná para treinamento de recursos humanos em controle de execução de obras e observação sobre pavimentos. O período de observação foi do ano 1990 ao ano de 1992, num total de 26 meses. A Figura 2 é uma vista da via durante a construção.

Figura 2 – A rodovia PR-090 durante a construção

2 Sobre estudo de comportamento de pavimentos

Dentre as *funções de pavimento* destacam-se:

- a) suportar e transmitir às camadas componentes ou ao subleito os esforços estáticos e dinâmicos provocados por cargas de veículos;
- b) fornecer a superfície para tráfego de veículos, com conforto e segurança, do ponto de vista dos que usam as vias.

Ao longo da vida útil, componentes de camadas de pavimento são solicitados por cargas estáticas e dinâmicas aplicadas pelos veículos e ações destrutivas de agentes climatológicos. O pavimento é estrutura que perde a capacidade para suportar cargas, mesmo quando corretamente projetado e construído.

Estudos sobre “suporte e transmissão de cargas” não são objetos desse trabalho. O objetivo é “analisar a capacidade de pavimento fornecer a superfície para tráfego de veículos”. Resultados de estudos desse tipo podem ser úteis para os que vão escolher tipo e prioridade de investimentos sobre vias ou obter relações entre estrutura de pavimentos e informações sobre uso de pavimento para tráfego.

Para obter “informações sobre” ou orientar decisões durante seleção e definição de custos para construção ou restauração de pavimentos, prever a evolução de deterioração ou identificar “o quando” é necessário executar serviços para manutenção podem ser usados resultados de análise empírica sobre conjuntos de medidas sobre variáveis que condicionam o comportamento da superfície de pavimentos, do ponto de vista de usuários, e relações à física de funcionamento da estrutura de pavimentos.

Serventia de pavimento, é a “capacidade de um segmento de pavimento servir ao tráfego de automóveis, caminhões e ônibus que por ali trafeguem”. (CAREY & IRICK, 1960). Esta definição é válida para um instante.

O arcabouço teórico que resultou de estudos sobre o comportamento de pavimentos da Pista Experimental da AASHO, exposto por CAREY & IRICK (1960) e AASHO (1962), introduziu na tecnologia a estimativa de índices para “medir” a serventia de pavimentos. De um lado, observadores treinados atribuíam notas à viagem pela superfície de pavimento, de outro observaram-se as distribuições de ocorrência de tipos de defeitos na superfície para tráfego de veículos. A análise de regressão passou a ser instrumento para estudo de relações entre “ocorrências de defeitos” e notas que usuário de pavimento atribuiriam a conforto de viagem.

A Figura 3 ilustra a forma de gráficos cartesianos usados para mostrar o comportamento de medidas sobre a variável “serventia” em função do “tempo decorrido após a colocação do pavimento em uso” ou “volume de solicitações por cargas aplicadas por eixos de veículos”.

Figura 3 – Variação de medidas para a serventia
(adaptado de HAAS & HUDSON, 1978)

Curvas do tipo mostrado na Figura 3 são, no jargão de técnicos, ditas “curvas de desempenho de pavimentos”. Mas, “*desempenho de pavimento*” é com rigor a “tendência da habilidade de pavimento servir ao tráfego em função do número de repetições de aplicações de cargas equivalentes ao eixo padrão para dimensionamento” (AASHO, 1962, p. 292 e 293).

Gerência de pavimentos é “um conjunto de conceitos, métodos e processos para orientar ações para planejar, projetar, construir, manter, avaliar e pesquisar sobre pavimentos. O objetivo principal é manusear ou discutir conseqüências de informações e uso de critérios para decisões que dirijam a produção de programas para construção, manutenção e reabilitação de pavimentos com máximo retorno de recursos aplicados sobre esses componentes de rodovias” (HAAS *et al.* 1994). O conjunto aqui definido é dito, no jargão de técnicos, “sistemas de gerência de pavimentos”.

Em substituição a arcabouços completos para “gerência de pavimentos”, engenheiros e administradores de rodovias têm lançado mão de simples orientações a decisões para planejar, projetar, construir e restaurar pavimentos obtidas através de uso de expressões numéricas, os “modelos de previsão de desempenho de pavimentos”. Essa prática pode não ser confiável porque estudos sobre comportamento de pavimentos devem ser específicos para cada ambiente, usuários e tipo de estrutura.

Para exemplos e detalhes sobre métodos e processos que participam do conjunto de maneiras usadas para obter expressões para a serventia de pavimentos pode-se consultar: AASHO (1962), AFIESIMAMA & GARCIA-DIAZ (1988), ARCHONDO-CALLAO (1992), BUTT *et al.* (1987), COLLURA *et al.* (1993); GARCIA-DIAZ & RIGGINS (1984), GEIPOT (1976, 1982), GOPINATH *et al.* (1994); HODGES *et al.* (1975), KARAN *et al.* (1988); LEE & DARTER (1994), LEE *et al.* (1993), MAJIDZADEH *et al.* (1990), NCHRP (1981), O'BRIEN *et al.* (1983), QUEIROZ (1984), RAUHUT *et al.* (1983), RAUHUT *et al.* (1984), SHAHIN *et al.* (1987), SMITH *et al.* (1993), WAY & EISENBERG (1988), WAY *et al.* (1982),

2.1 Defeitos de superfície em pavimentos

Defeitos da superfície de pavimentos são desarranjos que contribuem para diminuir conforto ou segurança de viagens ou dificultar o tráfego de veículos. A classificação de defeitos pode ser (SHRP, 1993): *trincas, remendos, buracos, deformações, variações de forma da superfície, e outros.*

Para manter e recuperar pavimentos, é necessário identificar, classificar e medir a área de pavimento com defeito para obter as distribuições de ocorrências de defeitos na superfície de pavimentos e analisar o volume de dificuldade que o tipo de defeito impõe ao tráfego de veículos.

Para análise de volume de ocorrências e classificação de defeitos a inspeção pode ser sobre todo trecho de rodovia observado ou amostra. *Inspeção total* sobre trecho de pavimento de grandes comprimentos requer esforço, tempo e consomem recursos. Mas, também a rodovia pode ser dividida em segmentos chamados *amostras unitárias*. E, amostras exigem controle que garanta a confiabilidade em resultados.

Defeitos em superfície de pavimentos podem ser classificados, e os resultados processados, conforme propostas de diversos órgãos que operam rodovias. Em nada se contribui ao dizer que dado órgão A, ou B, ou X classifica dessa ou de outra maneira – é necessário relacioná-los com o comportamento de pavimentos e adequar as conclusões às necessidades de trabalho para manter e reparar pavimento.

O manual *DISTRESS IDENTIFICATION FOR THE LONG-TERM PAVEMENT PERFORMANCE PROJECT* (SHRP, 1993) - produto de investimento que o Governo dos Estados Unidos colocou à disposição do meio técnico – é o mais atualizado entre os conjuntos de informações para orientação de classificação e análise de defeitos em pavimentos a que se tem acesso. Na Tabela 1 estão identificados e classificados os principais defeitos de superfície em pavimentos flexíveis.

Tabela 1 – Descrição de defeitos na superfície de pavimentos flexíveis (SHRP, 1993)

DEFORMAÇÕES DA SUPERFÍCIE		REMENDOS e BURACOS	
Afundamento nas trilhas das rodas	Depressão longitudinal do pavimento nas trilhas das rodas.	Remendos	Parcela do pavimento maior que 0,10 m ² que foi removida e recolocada, ou material adicionado.
Corruções	Deslocamento longitudinal de materiais da superfície de pavimentos. Pode ser associado a deslocamentos verticais.	Buracos	Cavidades no pavimento.
NA SUPERFÍCIE		TRINCAS	
Desgaste	O descolamento da camada superficial em pavimentos construídos com misturas a quente de alta qualidade. Provoca o deslocamento de partículas de agregados e perda de betume.	Por fadiga	Causadas por redução da resistência do revestimento. São uma série de trincas interligadas – produzem polígonos com número de lados variáveis, peças com ângulos agudos, em geral menores que 30cm no seu maior lado. A aparência é de "tela de galinheiro", ou "pele de jacaré".
Polimento de agregados	O betume do revestimento superficial desaparece e o agregado graúdo fica visível a olho nu.	Em blocos	Trincas interligadas, formando peças aproximadamente retangulares, com dimensões entre 0,1 a 10m ² . Os lados variam de 30cm a 3m.
Exsudação	Excesso de betume na superfície de pavimento. A superfície se torna espelhada e pegajosa. O processo é irreversível. O betume se acumula na superfície.	De bordas	Trincas de abertura crescente ou pouco contínuas que interceptam a borda do pavimento e iniciam-se em aproximados 60cm da borda adjacente ao acostamento de vias com acostamentos não pavimentados.
OUTROS			
Degraus entre acostamento e faixa de tráfego	Desníveis entre a superfície de tráfego e o acostamento.	Longitudinais	Trincas predominantemente paralelas ao eixo do pavimento.
Bombeamento e exsudação de água	Percolação ou ejeção de água para superfície através de trincas. Em alguns casos detectável através de visualização de depósitos de material fino na superfície.	De reflexão	Trincas características de recapeamento de pavimentos de concreto com pavimentos betuminosos, nas juntas.
		Transversais	Trincas de direções predominantes perpendiculares ao eixo da via e que não coincidem com juntas de pavimento de concreto.

O volume de dificuldade que um defeito impõe ao tráfego é, em português, nomeado *severidade de defeito*, ou simplesmente *severidade*. A severidade é classificável em *não aplicável*, *baixa*, *média* e *alta* (SHAHIN & KOHN, 1979).

Severidade, como conceito, é uma “medida” da dificuldade que o defeito impõe ao tráfego – mas, na prática é classificada em função de limites e variáveis mensuráveis em observações em campo.

Por exemplo: a largura ou o comprimento de trincas podem ser variáveis usadas para classificar a severidade desse tipo de defeito. Os procedimentos para cadastro e medida de áreas de ocorrência de defeitos estão relatados, tipo a tipo de defeito, em SHRP (1993).

2.2 Um índice para descrever o estado da superfície de pavimentos

Estado da superfície de pavimento é um termo usado para representar a “capacidade de pavimento prestar bons serviços ao tráfego de veículos”. Por abuso de linguagem, o jargão *condição* tem sido utilizado para substituir o termo “estado” [MELO, 1998].

Diz a *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS* que “índices” podem ser usados como parte de processos para fornecer informações que sirvam para classificar “estado de superfície de pavimentos” para servir ao tráfego de veículos. Tipo, volume de ocorrências de defeitos e severidade podem ser variáveis usadas para definir tais índices. E, índices podem ser úteis para:

- a) descrever a deterioração de segmentos de rodovia;
- b) contribuir para avaliar e prever impactos de atividades para manutenção e reabilitação;
- c) contribuir para a análise de comportamento de pavimentos em segmentos de rodovias;
- d) orientar a fixação de prioridades para manutenção e reabilitação.

O uso de índices para descrever o estado de pavimentos tem suas vantagens. Porém há limitações na orientação de atividades de gerência de pavimentos através de índices (MELO, 1998):

- a) o valor de índice "de per si" não reflete a deterioração de pavimento;
- b) atividades para manter ou reabilitar podem ser diferentes para dois ou mais trechos de pavimentos com mesmo valor de índice;
- c) para diferentes pavimentos, recém-construídos ou reabilitados, índices podem ser numericamente iguais;
- d) os índices não indicam tipos de atividades para manter e reabilitar;
- e) decisões sobre reabilitação fundamentadas apenas em índices para classificação de defeitos poderão não contribuir para controle de distribuição futura do estado de deterioração de pavimentos.

Para avaliação de superfície de pavimentos flexíveis ou rígidos, SHAHIN & KOHN (1979), relatam que o *U. S. ARMY CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LABORATORY (CERL)* propôs um índice, o "pavement condition index" (*PCI*). Isso foi feito em função de resultados de estudos sobre dados obtidos em inspeções sobre pavimentos de aeroportos e depois generalizado. Esse é um índice composto em função de estudos de relações entre distribuições de ocorrência de tipos de defeitos e observações para classificar estado de pavimentos.

O "pavement condition index" (*PCI*) de SHAHIN & KOHN (1979) foi adotado nesse trabalho para classificar "estado de pavimentos". MELO (1998) processou resultados de observação e análise sobre pavimentos para estudo de consequências de uso de índices que tentem explicar relações a notas atribuídas por observadores treinados e concluiu que após a padronização à escala de notas proposta por CAREY & IRICK (1960), o "*pavement condition index*" pode servir para separar em classes "de estado" segmentos de pavimento analisados.

O arcabouço associado ao "pavement condition index" visa colocar disponíveis processos para:

- a) avaliar a integridade estrutural e o “estado” de superfície de pavimento ;
- b) identificar necessidades e prioridades de atividades para manutenção e reabilitação por comparação entre segmentos de pavimentos;
- c) estimar índice para descrever comportamento de pavimentos em função dos dados acumulados durante um dado intervalo de tempo.

A avaliação de serventia de pavimentos de CAREY & IRICK (1960) usou notas atribuídas à viagem fornecidas por usuários de rodovias treinados e uma escala de notas que variou entre zero e cinco. SHAHIN & KOHN (1979) relatam que o CERL adotou o mesmo processo, porém com um intervalo de conceitos que variou de zero a cem. A Figura 4 ilustra a escala adotada e suas relações com a qualidade de viagem por pavimento conforme declarada por observadores treinados segundo SHAHIN & KOHN (1979).

Figura 4 – Escala para avaliação de qualidade de viagem por pavimentos (adaptado de SHAHIN & KOHN (1979))

Perda de serventia de pavimento é a redução de conforto de viagem estimada através de notas atribuídas para qualidade de viagens por rodovia.

Adotam-se as notações: “ T_i ” for a notação usada para denotar o “tipo de defeito i ” (trinca, remendo etc.- tab. 1) em pavimento”, “ S_j ” denotar o “nível de severidade j para dado tipo de defeito (estimada em função de variáveis como largura de trinca, grau de deterioração de remendo, etc.)”, e “ D_{ij} ” denotar a “densidade” ou seja a “área de ocorrência do tipo de defeito “ i ” com severidade j pelo total de área observada”.

Para estimativa de “pavement condition index” o procedimento é :

- a) descrever tipos, contar e medir características para estimativa de distribuições de ocorrências de tipos de defeitos em pavimento;
- b) avaliar a severidade associada a cada tipo de defeito em pavimento;

- c) estimar “valores de perda de serventia para cada tipo de defeito”. A notação usual para a “perda de serventia” é $a() = a(T_i, S_j, D_{ij})$.

As informações obtidas seriam objeto de estudo e análise para identificar relações entre tipo, densidade, volume de defeitos, severidade e perda de serventia em pavimentos.

A rigor isso deveria ser efetuado a cada caso. Para pavimentos flexíveis, SHAHIN & KOHN (1979) sugerem o uso de dados publicados às páginas 38 a 56 de seu artigo, onde as informações estão sintetizadas em curvas contidas em nomogramas úteis para quantificar relações numéricas entre perda de serventia, tipo de defeito e severidade para os principais tipos de classes de defeitos em pavimentos. As Figura 5 a 11 lustram a reprodução de conteúdo de nomogramas expostos por SHAHIN & KOHN (1979).

Figura 5 – “Perda de serventia” e ocorrência de remendos em pavimentos [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Figura 6 - "Perda de serventia" e ocorrência de buracos em pavimentos flexíveis [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Figura 7 - "Perda de serventia" e ocorrência de defeitos na superfície de pavimentos flexíveis (apenas uma curva para todas severidades) [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Figura 8 - "Perda de serventia" e ocorrência de afundamento nas trilhas de rodas em pavimentos flexíveis [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Figura 9 - "Perda de serventia" e ocorrência de corrugações em pavimentos flexíveis [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Figura 10 - "Perda de serventia" e ocorrência de trincas longitudinais e transversais em pavimentos flexíveis [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Figura 11 - "Perda de serventia" e ocorrência de trincas por fadiga em pavimentos flexíveis [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

Considerando que o manuseio dos nomogramas expostos nas Figura 5 a Figura 11 poderia ser árduo, optamos por operar um processo para a obtenção de funções para estimativa da “perda de serventia” em função da densidade de tipos de defeito e severidade que pode ser resumido em:

- a) converter a “imagem de nomogramas” em “imagens digitais arquivadas em computador”;
- b) usar o programa para computador DIGITIZER 3.3 [MITCHELL (1997)] para obter uma tabela de pares de pontos correspondentes aos valores dependente e independente em cada caso;
- c) essas tabelas foram transferidas para processamento pelo programa de computador ORIGIN 5.0 [MICROCAL (1997)] e estimativa de coeficientes de “funções para estimativa”;

Admitiu-se que as funções expostas nos nomogramas para estimativa de “perda de serventia” pudessem ser aproximadas por funções polinomiais ou logísticas, pois a forma dos gráficos representa fielmente essas funções. Os tipos de funções adotadas foram:

- c.1. um polinômio para expressar a relação entre densidade de defeitos e a “perda de serventia” cuja expressão geral é

$$y = A + B_1 \log(x) + B_2 \log^2(x) + \dots + B_{n-1} \log^{n-1}(x) + B_n \log^n(x) \quad (1)$$

Onde:

x = densidade de dado tipo de defeito, em porcentagem;

y = “perda de serventia”;

$A, B_1, B_2, \dots, B_{n-1}, B_n$ = coeficientes da função polinomial;

n = grau do polinômio.

c.2. para os defeitos cuja curva no nomograma tivesse forma que se aproximasse do "S" a "função logística" cuja expressão é:

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} - A_2 \quad (2)$$

Onde: x = densidade de dado tipo de defeito, em porcentagem;

y = "perda de serventia";

A_1, A_2, x_0, p = coeficientes característicos de função logística.

As Tabela 2 a 7 contêm os coeficientes das funções estimadas.

Tabela 2 – Coeficientes característicos de "funções logísticas" para estimativa de "perdas de serventia em função de densidade de tipos de defeitos"

Tipo de defeito	Severidade	A_1	A_2	x_0	p
Remendos	Alta	5,6149	113,4817	15,5964	0,7565
	Alta	12,69995	79,04561	11,42361	1,20129
Corrugações	Média	7,90131	61,20779	12,43421	1,59917
	Baixa	3,79714	49,64884	17,07055	1,59829

Tabela 3 – Coeficientes de polinômios para estimativa de “perdas de serventia” em função de densidade de tipos de defeitos

Tipo de defeito	Severidade	A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Remendos	Média	9,69027	12,32362	7,16701	1,45189	0	0
	Baixa	2,27347	6,175	6,95519	1,93444	-1,12555	0
Buracos	Alta	54,85212	46,55624	9,96045	-2,16369	0	0
	Média	34,07686	44,23451	14,14062	-1,95588	0	0
	Baixa	21,44472	29,92533	8,72418	-2,02137	0	0
Defeitos na superfície	Alta	-1,84880	7,91573	-7,69308	4,58010	0	0
Afundamento nas trilhas de roda	Alta	26,65695	23,03588	9,72507	4,1181	-3,43832	0
	Média	17,70825	19,86467	7,88984	0,33129	-1,53916	0
	Baixa	7,79462	13,60783	7,63059	0,01263	-0,94261	0
Trincas longitudinais e transversais	Alta	17,99956	22,48007	14,85568	11,75306	-0,10725	-4,94631
	Média	8,53286	15,71342	6,18553	0	0	0
	Baixa	1,97101	7,94582	5,89828	0,68383	0	0
Trincas por fadiga	Alta	30,12607	30,29378	5,71413	-5,93488	1,53484	0
	Média	21,12052	21,11154	5,48472	-1,10414	0	0
	Baixa	11,05821	15,41651	7,08043	-1,11842	0	0

- d) SHAHIN & KOHN (1979) sugerem para estimativa do “pavement condition index” (PCI):

$$PCI \cong 100 - \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} a(T_i, S_i, D_{ij}) \cdot f(t, q) \quad (3)$$

Onde:

$a(T_i, S_j, D_{ij})$: perda de capacidade para servir ao tráfego, cujas variáveis independentes são o tipo (T_i), nível de severidade (S_j) e densidade (D_{ij}) de defeitos;

i : índice associado aos tipos de defeitos;

j : índice associado aos níveis de severidade de defeitos;

p : número de tipos de defeitos;

m_i : nível de severidade para o i -ésimo tipo de defeito;

$f(t, q)$: uma função de “perda de serventia” e número de “perdas de serventia” maiores que cinco (SHAHIN & KOHN, 1979).

e) estimar a participação de tipos de valor individual para “perda de serventia” no total de “perda de serventia” de pavimento, ou seja, a sensação de “perda de conforto e segurança em viagens atribuídas aos tipos e densidade de defeitos pelos usuários de pavimento”. A rigor isso deveria ser feito para cada tipo de motorista e local onde se estudassem os pavimentos. Entretanto, SHAHIN & KOHN (1979):

e.1. Dizem que as perdas de serventia $a(T_i, S_j, D_{ij})$ menores do que 5 (cinco) [$a(T_i, S_j, D_{ij}) < 5$] devem participar da soma dos valores de perda de serventia com seu valor real, ou seja $f(t, q) = 1$;

e.2. recomendam o uso de dados contidos à página 57 de seu artigo, um nomograma para orientar a correção de perdas de serventia individuais [$f(t, q)$] em função do número de tipos de defeitos nos pavimentos observados quando a “perda de serventia” for maior ou igual a cinco [$a(T_i, S_j, D_{ij}) \geq 5$].

A Figura 12 ilustra a reprodução de nomograma exposto por SHAHIN & KOHN (1979) para sintetizar as informações sobre a ação valor individual de correção $f(t, q)$ para valores de “perda de serventia de defeito maiores, ou iguais, a cinco [$a(T_i, S_j, D_{ij}) \geq 5$]”.

Figura 12 – Valor corrigido por $f(t, q)$ de “perda de serventia” [adaptado de SHAHIN & KOHN (1979)]

A estimativa de “perda de serventia corrigida” para valores individuais maiores que cinco pode ser efetuada também com uso de aproximação através de polinômios, similar ao exposto anteriormente, para facilitar cálculos e manuseio.

A Tabela 3 resume os coeficientes de polinômios para estimativa de valores de “perda de serventia corrigida” em função de “soma de perdas de serventia individuais” obtidos.

Tabela 4 – Coeficientes de polinômios para estimativa de “perdas de serventia” em função de densidade de tipos de defeitos

<i>Quantidade de tipos de defeitos</i>	<i>A</i>	<i>B₁</i>	<i>B₂</i>	<i>B₃</i>
1	0	1	0	0
2	-1,10133	0,77569	-6,88659E-05	-6,13736E-06
3	-4,14545	0,7417	-0,000356426	-3,56126E-06
4	-7,55378	0,67183	0,000266415	-5,02526E-06
5	-6,38377	0,56686	0,00072614	-5,39148E-06
6	-5,40241	0,46147	0,00157	-7,70853E-06
7	47,14254	-0,48974	0,00716	-1,92671E-05

Após a estimativa do *PCI* para amostras unitárias, a média do índice para dada via observada é nomeado *valor do PCI para o pavimento avaliado*:

$$\overline{PCI} \cong \frac{\sum_{i=1}^n PCI_i}{n} \quad (4)$$

Estimado o valor do “pavement condition index”, o “estado de pavimento para servir ao tráfego” é obtido comparando o valor obtido a uma escala publicada em SHAHIN & KOHN (1979). A Figura 13 ilustra o exposto por SHAHIN & KOHN (1979).

Figura 13 – Relação entre o “pavement condition index” e “estado de pavimento” (adaptado de SHAHIN & KOHN (1979))

3 Dos dados

Na rodovia que liga Assaí, município agrícola do norte do estado do Paraná, a Pau D'Alho, passando por Figueira e Cebolão o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná, investiu em uma experiência inovadora: mais de dez soluções de pavimentação alternativa foram construídas, testadas e comparadas nos 18,5 quilômetros daquela via.

A Figura 14 ilustra a localização do segmento de rodovia que deu origem aos dados usados no presente trabalho. A Figura 15 ilustra uma vista do trecho estudado.

Figura 14 - Localização da via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho

Figura 15 – Vista da via que liga Assai a Pau D'Alho

Ao mesmo tempo que homens e máquinas trabalharam na construção do trecho, o Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná treinou engenheiros e técnicos e incentivou a busca de novas técnicas para a construção de pavimentos.

Dentre os testes e programas de pesquisa ali realizados destacam-se:

- a) Estudos sobre estabilidade de solos argilosos vermelhos lateríticos;
- b) Comparação entre bases construídas com brita graduada e macadame hidráulico;
- c) Estudos sobre revestimentos usinados a frio com misturas densas;
- d) Viabilidade do uso de tubo de PVC em substituição aos tubos de concreto ou cerâmicos na construção de drenos.

Para ilustrar, a Figura 16 expõe um esboço sobre o relevo do Paraná. A rodovia estudada situa-se em região de relevo suavemente ondulado (declives de 3 a 8%) a ondulado (8 a 20%), com elevações levemente arredondadas e declives de pouco inclinados a inclinados (EMBRAPA,

1984). A altitude varia normalmente entre 360 e 550m acima do nível do mar.

Figura 16 - Esboço sobre o relevo do estado do Paraná (ARANOVICH, 1985)

3.1 Os pavimentos na rodovia

Os pavimentos estudados foram construídos sobre o leito original de estrada vicinal existente. A declividade transversal da seção de pavimento foi 4%.

A Figura 17 ilustra os tipos de bases para pavimento usadas na via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho e sua distribuição ao longo dessa rodovia. São também detalhados os teores de eventuais misturas de materiais usadas naquela via. São sete os tipos de bases para pavimento utilizados. Em alguns segmentos testaram-se as conseqüências de uso de reforços de solo cal nas laterais do pavimento.

A Figura 18 ilustra os tipos de revestimento para pavimento usados na via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho e sua distribuição ao longo dessa rodovia. *Mas cumpre ressaltar que as informações usadas nesse trabalho, ou seja, dados de observação sobre segmentos de via usados para testes,*

se ativeram aos trechos cujo revestimento é constituído de "tratamento superficial triplo".

Figura 17 – Bases no pavimento da via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho

Figura 18 – Revestimentos no pavimento da via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho

A obras de proteção para evitar erosão superficial nas laterais da via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho restringiram-se ao uso de sarjetas, dos tipos ilustrados na Figura 19, em segmentos com declives longos ou acentuados, desembocando em bacias de amortecimento.

Figura 19 - Sarjetas tipo "1" e "3" conforme especificado em DER/PR ES-D 01/91

Figura 20 - Detalhe da drenagem superficial na via Assai a Pau D'Alho

As obras para fazer a água transpor o eixo da via que liga Assai a Pau D'Alho consistiram-se em bueiros circulares. Usaram-se tubos de concreto armado apoiados em lastro de pedra britada com espessura de 10 cm.

3.2 Os dados sobre defeitos na via Assai a Pau D'Alho

Os dados e informações foram levantados por equipes do Departamento de Estradas em agosto de 1990, junho de 1991, outubro de 1991 e fevereiro de 1992. A Figura 21 ilustra as relações entre o tempo de vida do pavimento da via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho e as datas de observação do estado da superfície de pavimento.

Figura 21 - Levantamentos de dados

As informações sobre tipo e volume de ocorrências de defeitos no pavimento da via observada estão resumidos nas Tabela 5 e Tabela 6. O levantamento de dados foi efetuado em toda a extensão dos pavimentos.

Tabela 5 – Tipo e volume de ocorrências de defeitos na via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho (parte 1)

Seg mento	Observação	Trincas longitudinais e transversais (m)	Remendos (m ²)	Defeitos na superfície de pavimentos (m ²)	Buracos (unidades)	Trincas por fadiga (m ²)	Corrugações (m ²)	Afundamento nas trilhas de roda (m ²)
Entre as estacas 0 e 12	Agosto 90							2,16
	Junho 91	37,2	0,36	6,77				3,87
	Outubro 91	28,27	0,36	6,77	4			4,41
	Fevereiro 92	28,27	0,36	6,77	6			4,41
Entre as estacas 12 e 24	Agosto 90	4,2						2,2
	Junho 91	5,6	0,16					2,51
	Outubro 91	16,7	8,37					3,86
	Fevereiro 92	16,7	8,37					4,27
Entre as estacas 24 e 37+10	Agosto 90							2,84
	Junho 91	3,94	1,6					2,84
	Outubro 91	7,73	2,97					3,66
	Fevereiro 92	7,73	4,46					3,97
Entre as estacas 37+10 e 52	Agosto 90	2,3						1,1
	Junho 91	87					102,5	3,2
	Outubro 91	154,3	3,62	10	2	285	35,4	8,45
	Fevereiro 92	154,3	7,83	11,04	6	285	35,4	8,45
Entre as estacas 100 e 120	Agosto 90	2,4			1			2,48
	Junho 91	68,9			5		25,5	2,48
	Outubro 91	66,5	0,24		5		25	7,09
	Fevereiro 92	42,6	0,18		6		52,6	5,93
Entre as estacas 120 e 125	Agosto 90	11,6						1,24
	Junho 91	73						
	Outubro 91	73			2			6,1
	Fevereiro 92	105,4			3			6,1
Entre as estacas 125 e 135	Agosto 90	62					16,08	4,5
	Junho 91	240						
	Outubro 91	244	0,12					14,88
	Fevereiro 92	244,5	1,02		2			6,2
Entre as estacas 147 e 150	Agosto 90							1,26
	Junho 91							2,23
	Outubro 91							3,71
	Fevereiro 92							5,95

Tabela 6 – Tipo e volume de ocorrências de defeitos na via que liga o trevo de Assaí a Pau D'Alho (parte 2)

Seg mento	Observação	Trincas longitudinais e transversais (m)	Remendos (m²)	Defeitos na superfície de pavimentos (m²)	Buracos (unidades)	Trincas por fadiga (m²)	Corrugações (m²)	Afundamento nas trilhas de roda (m²)
Entre as estacas 175 e 192	Agosto 90							2,31
	Junho 91	296,24						
	Outubro 91	276,38			2		4,22	
	Fevereiro 92	299,9			4		40,5	4,09
Entre as estacas 192 e 200	Agosto 90							1,98
	Junho 91				2			1,98
	Outubro 91	6			2			3,27
	Fevereiro 92	6,4			2			4,02
Entre as estacas 604=3 e 12	Agosto 90							5,04
	Junho 91					63		5,04
	Outubro 91	5,67	0,16			84		5,57
	Fevereiro 92	3,5	0,2			90		5,93
Entre as estacas 60 e 116	Agosto 90							5,45
	Junho 91	1224,8			1		117,2	
	Outubro 91	1267,1			2		122,0	5,25
	Fevereiro 92	1367,8			2		122,0	6,11
Entre as estacas 141 e 152	Agosto 90							3,92
	Junho 91	17						
	Outubro 91	28						7,01
	Fevereiro 92	37						14,0
Entre as estacas 167 e 250	Agosto 90	42						3,89
	Junho 91	318,19			4		140	
	Outubro 91	348,6			12			4,54
	Fevereiro 92	505,7			12			4,52
Entre as estacas 250 e 280	Agosto 90							3,7
	Junho 91	182					84	
	Outubro 91	124,96			10		21	3,27
	Fevereiro 92	116,24			10		37,5	3,84

3.3 Estimativas de “pavement condition index”

Os dados obtidos (Tabela 5 e Tabela 6) foram utilizados para estimativas de “pavement condition index” conforme exposto no item 2.2 (d). A Tabela 7 contém um resumo das estimativas obtidas.

Tabela 7 – Estimativa de “pavement condition index” para as observações sobre a via que liga o trevo de Assaí a Pau D’Alho

Segmento	Observações				
	Janeiro 90	Agosto 90	Junho 91	Outubro 91	Fevereiro 92
Estaca 0 a 12	100	90	68	64	60
Estaca 12 a 24	100	88	86	71	70
Estaca 24 a 37+10	100	99	97	83	80
Estaca 37+10 a 52	100	97	77	50	41
Estaca 100 a 120	100	93	75	66	60
Estaca 120 a 125	100	72	67	51	45
Estaca 125 a 135	100	71	61	49	47
Estaca 147 a 150	100	83	77	73	68
Estaca 175 a 192	100	93	65	57	47
Estaca 192 a 200	100	88	72	69	67
Estaca 604=3 a 12	100	97	72	67	67
Estaca 60 a 116	100	100	76	76	75
Estaca 141 a 152	100	91	90	80	75
Estaca 167 a 250	100	97	75	73	70
Estaca 250 a 280	100	100	85	75	75

4 Uso de séries temporais

Como já visto anteriormente, *série temporal* é um conjunto de medidas ou contagens sobre valores de uma dada variável (observações) ordenado em relação ao tempo.

Neste capítulo resumem-se os principais conceitos usados para análise sobre os valores assumidos por elementos de séries temporais manuseando dados com rotinas escolhidas dentre os processos para caracterização de comportamento dessas medidas. A base bibliográfica do que aqui se exporá foi obtida em BOX & JENKINS, 1976 e sintetizada por SANT'ANNA (1997).

O intervalo entre observações iguais a um ano é o mais comum para medidas ou contagens sobre variáveis que expressem processos naturais, comerciais, e assemelhados. Mas, quaisquer outros intervalos podem ser usados para a análise sobre valores de elementos de séries temporais.

O termo *controle* será usado para designar as ações de previsão do comportamento de valores de elementos de uma série temporal - *variações de valores de elementos pertencentes à série*. As expressões "*processo de alteração de valores*", ou às vezes, "*processo*" serão aqui usadas para designar fatos e ações que condicionam a alteração de valores de elementos de série temporal.

A análise de variações no tempo de "valores de elementos pertencentes às séries temporais" é uma ciência com componentes de arte. Isso porque a eficiência de uso de resultados pode exigir a aplicação de componentes de habilidade, senso e experiência de analistas. Exigem-se cautela, cultura e treinamento no uso de métodos e processos para o tratamento de dados obtidos nas observações efetuadas.

Os estudos sobre valores de elementos de séries temporais de forma alguma estão esgotados em termos de desenvolvimento científico e técnico. Há necessidade de esforços constantes na busca de aprimoramento de técnicas para expandir o volume de informações sobre o assunto.

"Aleatório" é o vocábulo usado para expressar "dependente de fatores incertos, sujeitos ao acaso, fortuitos, acidental". A análise de comportamento de valores assumidos por medidas ou contagens sobre uma variável ordenados em relação à sua ocorrência no tempo pode ter dentre seus objetivos o de verificar se há algum padrão não-aleatório (ou seja, "*independente de fatores sujeitos ao acaso*") associado à ocorrência de valores de elementos pertencentes à série, e outras características úteis para orientar previsões ou estimativas de valores associáveis a novos elementos dessa mesma série. Ou ainda, identificar motivos que poderiam fazer com que um conjunto de valores ordenado no tempo assuma determinada característica de variação em valores de elementos que a ele pertençam.

A estimativa de valores de medidas sobre uma variável através de funções matemáticas para tentar descrever o comportamento de valores de variáveis que representam resultados de medidas sobre variáveis que interferem em processos físicos ou assemelhados é conhecida como *modelo matemático ou estatístico*.

Em particular, se as observações forem um conjunto ordenado em relação ao tempo, pode ser possível derivar modelos matemáticos em função de leis físicas para estimar valores de medida sobre alguma variável dependente de maneira quase exata. Se a estimativa for exata o processo é dito *determinístico*.

Poucos são os processos determinísticos. Todavia, pode ser possível derivar um modelo matemático ou estatístico que pode ser usado para verificar probabilidade de ocorrência de valor futuro para elemento de série de dados, um valor que estaria contido entre dois limites especificados - o processo então é chamado *probabilístico*, ou *estocástico*.

Modelos para estimativa de valores, usualmente dependentes de modelos matemáticos ou estatísticos são parte fundamental de processos para descrever, através de índices ou outras expressões para a serventia, o estado de pavimento do ponto de vista de conforto e segurança ao tráfego (como sentido pela média de usuários de via). Mas, *direta ou indiretamente, é o arcabouço proposto por CAREY & IRICK (1960) a base de métodos para estimar "índices para classificar o serviço oferecido pelo pavimento às viagens de veículos"*.

Se, os valores em uma série de dados forem obtidos por N observações, $\{z_1, z_2, \dots, z_N\}$, sobre uma população de tamanho infinito, as medidas ou contagens no tempo associadas aos elementos z_i podem ter sido geradas por um processo estocástico, ou seja regido por leis estatísticas e de probabilidades. Os valores de elementos de série temporal são produtos de ações de variáveis cujos efeitos são os de processo estocástico.

Ao assumir que valores de elementos de uma série de dados "não são consequência" de um processo determinístico, assume-se também que "não é possível estimar o valor do próximo elemento da série com exatidão". Isso se deve ao fato de que não é possível delimitar a participação de todas as variáveis que podem influenciar no processo para estimativa de valor de medida sobre elemento de série.

4.1 Comportamento de valores de elementos de séries temporais

Dentre as características do comportamento de valores de medidas ou contagens de elementos de série temporal podem estar a ocorrência de:

- a) *Tendência* ou variação secular: o conjunto de pares [valor observado, tempo] para onde parece se dirigir ao longo do tempo o conjunto de valores de elementos pertencentes à série - na representação gráfica uma reta ou curva. Por abuso de linguagem diz-se: "*curva ou reta de tendência*" para exprimir o conceito "tendência de valores elementos de série temporal";

- b) *Variações cíclicas* - são as oscilações, ou desvios, de valores observados para elementos da série em relação à reta ou à curva de tendência. Os ciclos podem ser ou não periódicos, ou seja, assumir padrões análogos em intervalos de tempo iguais, ou não.
- c) *Variações sazonais* - têm amplitude menor que a unidade de tempo adotada para análise do comportamento de valores de elementos da série, são produto de ações de agentes que ocorram periodicamente sobre os valores de elementos da série em intervalos de tempo que são subdivisões da unidade adotada.
- d) *Variações aleatórias* ou irregulares - não possuem padrão de amplitude de variação ou de ocorrência no tempo. Representam deslocamentos esporádicos em relação à curva de tendência de valores da série. Podem ser associadas a ações imprevistas de eventos com ocorrência aleatória sobre os valores de elementos da série temporal.

Os valores associados às características descritas nos itens "a" até "d" são chamados de *componentes da tendência* de valores observados de elementos pertencentes à série temporal. Alguns autores (STEVENSON, 1981) recomendam que os estudos sobre o comportamento de variação de valores de elementos de uma série temporal usem a *decomposição da tendência* em componentes obtidos através de isolamento de efeitos dos quatro tipos de características de variações expostos nos valores da tendência. A Figura 22 ilustra a representação proposta por STEVENSON (1981).

Figura 22 - Componentes da tendência de valores de séries temporais (STEVENSON, 1981)

Um dos métodos clássicos para análise sobre o comportamento de valores assumidos por elementos de séries temporais é *decomposição* de valores desses elementos através de identificação e isolamento de valores de efeitos dos quatro tipos de valores de variações - cíclicos (C), sazonais (S), aleatórios ou irregulares (I), e de tendência (T).

A representação gráfica pode facilitar a associação aos movimentos de ponto no plano a que se associem os valores de elementos da série. E, representações simplificadas clássicas de funções que expressem valores assumidos por elementos $[Y(t)]$ pertencentes a séries temporais podem, por exemplo, ser:

a) *Modelo multiplicativo*, a função:

$$Y(t) = C.S.I.T \quad (5)$$

b) *Modelo aditivo*, a função:

$$Y(t) = C + S + I + T \quad (6)$$

4.2 Remoção de efeitos de características

Dentre os métodos usados para obtenção de explicações sobre o comportamento de valores de elementos de séries temporais está "separar ou isolar" a participação de efeitos atribuídos às outras características sobre o comportamento da variação no tempo de valores de medidas ou contagens que compõem uma série temporal, para facilitar o estudo do comportamento de outros tipos de efeitos. O processo é conhecido como a "*remoção de características*".

Por exemplo, a separação ou isolamento de efeitos de variações cíclicas são normalmente efetuadas através de remoção de efeitos de variações sazonais e tendências de valores de elementos da série temporal e quando possível da identificação de efeitos associáveis às variações aleatórias. Por vezes pode ser possível o uso de técnicas específicas para remoção de efeitos de variáveis aleatórias.

Os valores de efeitos de variações sazonais podem ser removidos através de uso de mudança de unidade na organização de dados de observações: a nova unidade deve ser de amplitude igual a de um ciclo completo de movimentos sazonais. Dentre as finalidades de remoção de efeitos de componentes sazonais destacamos: remover esses efeitos para facilitar o estudo de variações cíclicas e identificar informações sobre variações cíclicas para auxílio durante processo de tomada de decisão onde for analisada a série temporal.

A tendência é “secular” quando são mínimas, ou foram eliminadas, as interferências de efeitos de caráter sazonal, cíclicas, ou aleatórias nos valores de variável observada e prevalecem os efeitos de interferências que determinem as variações de longo prazo, tais como os que refletem crescimento ou decréscimo persistente nos valores de elementos de séries no tempo, ou sucessivas etapas de variações irreversíveis no decorrer do tempo.

Para ilustrar: a remoção de efeitos da tendência pode ser efetuada através de ajuste de valores de elementos da série por subtração de valores estimados através de uso de uma curva de tendência (figura 22) quando o modelo de estudo for aditivo, ou de divisão, quando o modelo for multiplicativo. O resultado pode ser uma outra série útil para estudos de comportamento de valores de elementos de série denominada de “*desvios em relação à tendência*”.

Sazonalidade é termo que significa “relativo à estação do ano”, mas que nesse texto deve ser entendido “que se repete a intervalos de tempo constantes”.

Há diversos recursos usados para identificar valores atribuídos a efeitos de tendências. A análise de regressão usando o método dos mínimos quadrados, que consiste em ajustar uma reta ou curva aos valores observados de elementos de uma série minimizando a soma dos quadrados das distâncias até à reta ou curva ajustadas, está entre os processos mais usados para esse tipo de ajuste.

A maior crítica quanto a utilização de métodos de análise de regressão em tentativas de isolamento de tendências de valores de elementos de séries temporais é que a reta, ou curva, obtidas não são garantia alguma da ocorrência compatível de valores fora do intervalo de observações.

A reta, por exemplo, "passa sempre pelo ponto médio de valores", mas não tem vínculos diretos com os pontos nos extremos de valores observados. Isso pode desautorizar o seu uso para previsões, exceto quando os quadrados dos desvios se aproximem de zero, ou seja, todos os pontos estejam muito próximos da reta ou curva ajustadas à série.

Da mesma maneira que nos estudos de efeitos de variáveis sazonais ou variações cíclicas, busca-se isolar os efeitos de tendências sobre os valores de elementos de séries temporais por três motivos:

- a) Identificar as variações atribuídas a efeitos de tendência para excluí-las de valores de elementos de uma série em análise, visando examinar aspectos sobre a sazonalidade;
- b) Ou de variações cíclicas;
- c) Ou explicitar a tendência de valores de elementos pertencentes a uma série para fazer previsões.

4.3 Uso de valores assumidos por séries temporais

Muitos dos conjuntos de valores de elementos de séries temporais têm média variável ao longo do tempo. Mas, mesmo assim, a variação desses valores tem comportamento homogêneo, exceto para casos particulares ou consequência de ações de interferências locais ou tendências externas - essas são as variações homogêneas não estacionárias.

Média móvel é um tipo de média (usualmente aritmética) sobre os últimos k valores de uma série, onde k é o número de observações em um período de onde se quer eliminar o efeito da sazonalidade. O uso de *médias móveis* (estimadas na amplitude de cada intervalo de tempo que caracteriza a sazão) pode contribuir para facilitar o estudo de séries temporais cujo comportamento de valores de seus elementos seja não estacionário.

Conceitos e processos modernos para estimar valores de elementos de séries temporais usam “médias móveis” associadas a outras técnicas matemáticas e são importantes para a análise sobre séries temporais (BOX & JENKINS, 1976).

As “médias móveis” sobre grupos de valores de elementos de séries temporais pertencentes a períodos anteriores podem contribuir para reduzir a influência de variações sazonais ou aleatórias na estimativa de coeficientes de polinômio para representar a tendência de valores de elementos de série temporal (MILLS, 1969).

As principais críticas ao uso de médias móveis são: a facilidade com que absorvem efeitos de variáveis aleatórias e atenuam efeitos de variações cíclicas nos valores de elementos de séries temporais. Uma tentativa para contornar essas restrições consiste em primeiro remover os efeitos de variáveis aleatórias e variações cíclicas antes de iniciar o uso de médias móveis. Isso nem sempre é possível, porque é clássico sugerir o caminho inverso, ou seja remover efeitos de outras variações para explicitar efeitos de variáveis aleatórias.

Entretanto, princípios para uso de médias móveis permitiram o desenvolvimento de técnicas para a remoção de irregularidade em variações de valores de elementos de séries sem perda das demais características de variações nesses valores de elementos, observadas em uma série temporal, tais como o “exponentially weighted moving average” (BOX & JENKINS, 1976).

E, para remover efeitos de sazonalidade podem ser adotados *processos derivados de uso de médias móveis* associados à unidade de estudo da série temporal. Assim, por exemplo, se a unidade é o ano e as observações são mensais, emprega-se uma *média móvel* sobre doze meses de observação. A média aritmética móvel sobre as últimas k observações pode ser estimada por:

$$MM = \frac{\sum_{i=t-k}^t Y_i}{k} \quad (7)$$

Onde, se u é a unidade de tempo para estudo da série:

MM = a média móvel;

$$t = \frac{u}{k};$$

Y_i = valor do elemento i da série

A série temporal cujos elementos são as médias móveis é $(k-1)$ elementos menor que a série original. Por isso, é usual associar para representação cada uma das médias móveis a um ponto da variável tempo entre a observação mais antiga e a mais nova dos k elementos da série original usado para a estimativa daquele valor médio.

4.4 As variações aleatórias

Os efeitos de variações aleatórias sobre valores de elementos de uma série temporal são variáveis aleatórias. Por isso, como não há uma característica passível de ser estudada e analisada, os objetivos de estudos sobre variáveis aleatórias deveriam ser identificar e remover os valores desses efeitos de valores observados na série.

Uma técnica bastante usada para retirar a interferência de efeitos atribuídos a variáveis aleatórias de uma série de valores de observações é a "*regularização exponencial*" [*exponential smoothing* (STEVENSON, 1981) ou *exponentially weighted moving average* (BOX & JENKINS, 1976)].

A técnica para regularização exponencial utiliza *médias móveis ponderadas exponencialmente* para tentativas de regularização de valores de efeitos atribuídos a variações aleatórias em cada um dos padrões de valores de medidas ou contagens observados sobre elementos de uma série temporal.

A finalidade de uso de processos dependentes de funções exponenciais é tentar obter uma representação ou imagem mais clara de efeitos de quaisquer características não-aleatórias que possam estar presentes nos valores de elementos da série.

Quanto maior o número de observações incluído na média ponderada, número que define o grau da regularização de efeitos de variações aleatórias sobre os valores de elementos de série temporal, menor será a sensibilidade dessa média em relação ao dado seguinte, e vice-versa, um menor grau de regularização, ou quanto menor número de observações incluídos em cada média, maior a sensibilidade em relação ao dado seguinte. Um *valor regularizado* de elemento de uma série temporal poderia ser expresso por:

$$\bar{z}_{t-1}(\lambda) = \lambda \sum_{j=1}^{\infty} (1-\lambda)^{j-1} z_{t-j} \quad (8)$$

Onde:

t representa a ordem de um elemento na série;

λ representa o peso durante a regularização;

$\bar{z}_{t-1}(\lambda)$ representa o valor regularizado de ordem $t-1$;

z_{t-j} representa o valor do elemento da série de ordem $t-j$, antes de regularizado.

Um tratamento matemático exaustivo sobre esse assunto é exposto em BOX & JENKINS, (1976), páginas 106 a 114 – *Integrated Moving Average (IMA) Process*. Uma representação simples da função adotada para regularização exponencial pode ser:

$$V_s = V_{s-1} + \alpha(D - V_{s-1}) \quad (9)$$

Onde:

V_s representa o valor regularizado;

V_{s-1} representa o valor anterior ao valor regularizado;

D representa o próximo valor de elemento da série;

α representa o fator de regularização.

Entretanto, apesar de não se conhecer todos os fatores característicos de processos que influem em valores de elementos de uma série temporal, pode ser possível obter expressões matematicamente confiáveis para

estimativa da probabilidade de que um valor estimado esteja entre dois limites especificados de confiança.

Esse tipo de modelo é chamado de modelo probabilístico ou modelo estocástico. Um importante grupo de modelos estocásticos recebe o nome de *modelos estacionários* porque descrevem processos cujo produto é um valor de elemento de série temporal constante no tempo – o *equilíbrio*.

Modelos que representem o comportamento de variações de valores de elementos de séries temporais homogêneas e não-estacionárias podem ser obtidos com auxílio da adoção de hipótese “que exista uma *diferença identificável* no processo de análise do comportamento de medidas representadas pela série temporal”. Isso pode ser útil para mostrar que os valores de resultados de observações representam um processo estacionário de variações.

4.5 Processamento de dados sobre séries temporais

WOLD (1938) afirmou que qualquer série temporal, Z_t , pode ser representada por uma estrutura médias móveis infinita. BOX & JENKINS (1970) propõem uma classe geral de modelos lineares conhecida como ARIMA (“*autoregressive integrated moving average*”) para Z_t .

Teoricamente, BOX & JENKINS assumem que a série temporal Z_t é uma realização particular de um processo estocástico gerado pela passagem sucessiva de um processo ruído branco a_t à uma seqüência de dois filtros lineares: um estável e outro instável, como ilustrado no diagrama abaixo:

Figura 23 – Diagrama teórico do modelo BOX & JENKINS

Onde:

$$FLE: \frac{\theta(B)}{\phi(B)} \equiv \frac{1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q}{1 - \phi_1 B - \dots - \phi_q B^q} \quad (10)$$

$$FLI: \nabla^{-d} = (1 - B)^{-d} \quad (11)$$

sendo:

B : operador de retardo, tal que $B^k X_t = X_{t-k}$

$\alpha(B)$: polinômio médias móveis (MA)

$\phi(B)$: polinômio auto regressivo (AR)

∇ : operador diferença simples, tal que $\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$

Box & Jenkins definem a estrutura ARIMA(p,d,q) pela equação:

$$\phi(B) \cdot \nabla^d Z_t = \theta(B) \cdot a_t \quad (12)$$

onde d é o grau do operador diferença simples.

Para análise do comportamento de valores de elementos de séries temporais assume-se que os dados observados podem ser adotados para identificação de componentes da tendência de valores na série temporal e “ruídos aleatórios” ou “erros” que podem dificultar as estimativas. Na maioria dos casos, as técnicas de análise incluem alguma maneira de identificar e remover os ruídos para ressaltar os padrões de comportamento de valores de elementos de séries - são os chamados “filtros”, operadores matemáticos úteis para manuseio de dados e transformações de valores de efeitos de variáveis sobre os valores estudados.

Mas, na prática da vida real o comportamento de valores de elementos de série temporal não é claro, as observações individuais contêm erros e mesmo assim continuamos necessitando não só descobrir as formas de variação desses valores e ainda gerar previsões e outras informações confiáveis em função deles.

Não existem processos “automáticos” para identificar e representar componentes da tendência de valores de elementos de séries temporais - mas quando a variação desses valores é monotônica (só crescente ou decrescente) essa análise pode ser facilitada. Se os valores de elementos da série contêm erros consideráveis, o primeiro passo pode ser a regularização primária de valores de elementos de séries temporais visando eliminar efeitos grosseiros de ações de variáveis aleatórias.

Valores de elementos de séries monotônicas podem ser adequadamente estimados por funções lineares. Mas, quando ocorrem componentes não lineares, os dados devem ser transformados para remover a não-linearidade. Nessa hora pode ser usual recorrer a transformações logarítmicas, exponenciais ou polinomiais.

Nos próximos relatos usaremos as seguintes notações:

t = Ordem da observação do elemento da série;

$z_{t-1}, z_{t-2}, \dots, z_{t-n}$ = Estimativas de observações de valores de elementos da série temporal em tempos anteriores a t ;

$z_{t+1}, z_{t+2}, \dots, z_{t+n}$ = Estimativas de observações de valores de elementos da série temporal em tempos posteriores a t ;

$\hat{z}_t(l)$ = Estimativas de observações de valores de elementos da série temporal correspondentes ao tempo l depois de t .

Para estudo de modelos estocásticos, adotaremos a hipótese de que cada valor do elemento de uma série temporal pode ser resultado de ações de uma série de *distúrbios* a_t , independentes. Tais distúrbios seriam aleatórios, de distribuição normal, com média zero e variância σ_a^2 . A seqüência de valores cujos elementos são $\{a_t, a_{t-1}, a_{t-2}, \dots\}$ é conhecida como *ruído branco* - supõe-se que o processo de formação de valores de elementos da série que seja deflagrado por a_t possa aí ser transformado no mesmo processo que seria deflagrado por z_t . Esse tipo de modelo é conhecido como *modelo do filtro linear*. A Figura 23 ilustra o modelo de transformações através de um filtro linear. E, para facilitar raciocínios, usaremos os seguintes operadores:

B = Operador para indicar troca para o elemento anterior da série temporal, tal que: $Bz_t = Bz_{t-1}$, ou $B^m z_t = Bz_{t-m}$

$F = B^{-1}$ = Operador para indicar troca para o elemento posterior da série temporal, tal que: $Fz_t = Fz_{t+1}$, ou $F^m z_t = Fz_{t+m}$

∇z_t = Operador para diferenças em ordem inversa,
 $\nabla z_t = z_t - z_{t-1} = (1 - B)z_t$ (13)

$$\begin{aligned}\nabla^{-1}z_t = Sz_t &= \text{Operador inverso de } \nabla z_t, \text{ o operador de somas na ordem} \\ &\text{inversa,} \\ \nabla^{-1}z_t &= \sum_{j=0}^{\infty} z_{t-j} = (1-B)^{-1}z_t = z_t + z_{t-1} + z_{t-2} + \dots = \\ &= (1+B+B^2+\dots)z_t\end{aligned}\quad (14)$$

Uma classe especial de variação de valores de elementos de uma série temporal é o chamado *processo estocástico estacionário* - ou seja aquele que leve os valores de elementos a convergirem para um valor determinado, conhecido como o "*nível da série*".

Se tratarmos de n observações $z_{t1}, z_{t2}, \dots, z_{tn}$ efetuadas nos tempos $t_1, t_2, \dots, t_n$ sobre os valores de elementos de série temporal, se $n=1$, poderemos escrever:

A hipótese de ocorrência do *equilíbrio estatístico* para os valores de elementos da série leva a consequência de que a distribuição de probabilidade de valores de elementos da série z_t , $p(z_t)$ é a mesma para todos os tempos t e pode ser escrita $p(z)$. Ou, o processo estocástico tem média constante μ :

$$\mu = E[z_t] = \int_{-\infty}^{\infty} zp(z)dz \quad (15)$$

que define o nível em torno do qual os valores dos elementos da série iriam flutuar e uma variância constante para tais valores, σ_z^2 ,

$$\sigma_z^2 = E[(z_t - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (z - \mu)^2 p(z)dz \quad (16)$$

$E[]$ é a notação usada para a esperança matemática. A variância mede a dispersão em torno do nível de valores de elementos da série.

A média de valores dos elementos da série temporal pode ter o estimador

$$\hat{z} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n z_t \quad (17)$$

E, a variância tem o estimador

$$\hat{\sigma}_z^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (z_t - \bar{z})^2 \quad (18)$$

A ocorrência do processo estacionário implica na aceitação da hipótese de que a probabilidade de ocorrência $p(z_{t1}, z_{t2})$ é a mesma para todos os pares (t_1, t_2) que são parte de uma seqüência de intervalos constantes no tempo. Se a série é temporal, há relação entre os valores de elementos consecutivos desse conjunto - poderemos construir uma função cujos pares de valores (*variável independente, variável dependente*) sejam (z_t, z_{t+k}) e estimar a covariância entre z_t e z_{t+k} - este valor é chamado de *autocovariância correspondente ao número de intervalos de tempo entre observações k* :

$$\gamma_k = \text{cov}(z_t, z_{t+k}) = E[(z_t - \mu)(z_{t+k} - \mu)] \quad (19)$$

Similarmente, a *autocorrelação correspondente ao número de intervalos de tempo entre observações* é:

$$\rho_k = \frac{E[(z_t - \mu)(z_{t+k} - \mu)]}{\sigma_z^2} = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (20)$$

Associa-se ao processo observado n vezes uma *matriz de covariância* Γ_n :

$$\Gamma_n = \begin{bmatrix} \gamma_0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \cdots & \gamma_{n-1} \\ \gamma_1 & \gamma_0 & \gamma_1 & \cdots & \gamma_{n-2} \\ \gamma_2 & \gamma_1 & \gamma_0 & \cdots & \gamma_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n-1} & \gamma_{n-2} & \gamma_{n-3} & \cdots & \gamma_0 \end{bmatrix} = \sigma_z^2 \begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{n-1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \rho_1 & \cdots & \rho_{n-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_0 & \cdots & \rho_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n-1} & \rho_{n-2} & \rho_{n-3} & \cdots & \rho_0 \end{bmatrix} = \sigma_z^2 P_n \quad (21)$$

A covariância da matriz Γ_n escrita com elementos constantes nas duas diagonais é chamada matriz de autocovariância e a correspondente matriz P_n é denominada matriz de autocorrelação.

Se escrevermos uma função linear L_t , de valores dos elementos z_t , $L_t = l_1 z_1 + l_2 z_2 + \dots + l_n z_n$, a $\text{cov}[z_i, z_j] = \gamma_{|j-i|}$ para um processo estacionário leva à estimativa da variância de L_t :

$$\text{var}[L_t] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_i l_j \gamma_{|i-j|} \quad (22)$$

que é necessariamente maior que zero se os coeficientes da função linear são diferentes de zero. Logo, os determinantes das matrizes de autocovariância e autocorrelação são maiores do que zero para qualquer processo estacionário.

Em particular para $n=2$,

$$\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{vmatrix} > 0, \text{ ou } -1 < \rho_1 < 1 \quad (23)$$

E, para $n=3$:

$$\begin{vmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 \\ \rho_2 & \rho_1 & 1 \end{vmatrix} > 0, \text{ ou } -1 < \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} \quad (24)$$

O processo L_t obtido por transformações lineares sobre o processo estacionário z_t é também estacionário. Em particular, a primeira diferença $\nabla z_t = z_t - z_{t-1}$ e outras diferenças de maior ordem $\nabla^d z_t$ são estacionárias.

A estimativa de autocovariâncias e autocorrelações de um conjunto de observações sobre uma série temporal é efetuada em função de estimadores definidos para o k -ésimo conjunto de intervalos conforme abaixo:

$$\tilde{\gamma}_k = c_k = \frac{1}{N} \sum (z_t - \bar{z})(z_{t+k} - \bar{z}), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (25)$$

E, o estimador r_k de ρ_k é

$$r_k = \frac{c_k}{c_0} \quad (26)$$

O erro padrão da estimativa nas autocorrelações é estimado em função de considerações desenvolvidas por BARTLETT e expostas por BOX & JENKINS (1976):

$$\text{var}[r_k] \cong \frac{1}{N} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \{ \rho_v^2 + \rho_{v+k} \rho_{v-k} - 4\rho_k \rho_v \rho_{v-k} + 2\rho_v^2 \rho_k^2 \} \quad (27)$$

É usual escrever $\rho_k = \phi^k$, com $(-1 < \phi < 1)$, que leva a:

$$\text{var}[r_k] \cong \frac{1}{N} \left[\frac{(1+\phi^2)(1-\phi^{2k})}{1-\phi^2} - 2k\phi^2 \right] \quad (28)$$

E, por raciocínios similares,

$$\text{cov}[r_k, r_{k+s}] \cong \frac{1}{M} \sum_{v=-\infty}^{+\infty} \rho_v \rho_{v+s} \quad (29)$$

Os procedimentos de estimativa da autocorrelação e autocovariância são conhecidos como a obtenção de *funções para autocorrelação* - uma distribuição de probabilidades com comportamento aproximadamente o da distribuição normal.

A função que representa o filtro linear é uma combinação linear de valores observados previamente na série:

$$z_t = \mu + a_t + \Psi_1 a_{t-1} + \Psi_2 a_{t-2} + \dots = \mu + \Psi(B) a_t \quad (30)$$

De maneira generalizada diz-se que μ é um parâmetro que define o "nível" do processo, e

$$\Psi(B) = 1 + \Psi_1 B + \Psi_2 B^2 + \dots \quad (31)$$

é o operador linear que transforma a_t em z_t , chamado de *função de transferência do filtro linear*.

Figura 24 - Representação das transformações através de um filtro linear

A seqüência $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots$, formada pelos pesos na função de transferência pode ser finita ou infinita. Caso a seqüência seja finita, ou infinita e convergente, o filtro é dito "estável" e o processo representado por z_t é do tipo estacionário. O parâmetro μ é então a média em torno da qual o processo varia. De outra forma, z_t é não estacionário e μ não tem um significado específico, exceto como um ponto de referência.

Chama-se “*modelo de auto-regressão*” à função usada para representar valores de elementos de uma série temporal em função de valores que ocorreram anteriormente.

Se, os intervalos de tempo entre as observações sobre a série temporal forem iguais, e se $\bar{z}_t, \bar{z}_{t-1}, \bar{z}_{t-2}, \dots$ são os desvios em relação a μ , então o processo de auto-regressão de ordem p pode ser representado:

$$\bar{z}_t = \phi_1 \bar{z}_{t-1} + \phi_2 \bar{z}_{t-2} + \phi_3 \bar{z}_{t-3} + \dots + \phi_p \bar{z}_{t-p} + a_t \quad (32)$$

O nome “*processo de auto-regressão*” se atém à analogia ao “*modelo linear para estudo de relações entre a variável dependente z a um conjunto de variáveis independentes $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ com erro a* ”, que é usualmente denominado “*modelo de regressão*” quando z é dito “*obtido por regressão sobre $x_1, x_2, \dots, x_p$* ”.

$$\bar{z}_t = \phi_1 \bar{x}_1 + \phi_2 \bar{x}_2 + \phi_3 \bar{x}_3 + \dots + \phi_p \bar{x}_p + a \quad (33)$$

O operador para estudos sobre as características de processo de auto-regressão de ordem p é definido por:

$$\phi(B) = \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad (34)$$

Ou:

$$\phi(B)z_t = a_t \quad (35)$$

Esse tipo de modelo tem “ $p+2$ parâmetros desconhecidos”, a serem estimados em função de operações sobre dados provenientes de observações sobre valores de série temporal. Um parâmetro adicional é a variância σ_a^2 do ruído a_t . O modelo de auto-regressão é um caso particular de filtro linear.

Os processos de auto-regressão podem ser estacionários ou não. $\phi(B)z_t = a_t$ é equivalente a $z_t = \Psi(B)a_t$, com $\Psi(B) = \phi^{-1}(B)$. Se os valores de elementos da série tiverem um processo de variação estacionário, $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \dots$ em que $\Psi(B) = \phi^{-1}(B)$ é uma série convergente.

BOX & JENKINS (1976), página 49, relatam e discutem que é conveniente obter as autocovariâncias através de uso de *função para geração de autocovariâncias*:

$$\gamma(B) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k B^k \quad (36)$$

E, na página 50, BOX & JENKINS (1976) comentam que para que um processo de auto-regressão seja estacionário, a série $\Psi(B)$, geradora dos pesos Ψ deve convergir para $|B| \leq 1$. Ou, no ou próximo ao círculo unitário:

a) a *função de transferência do filtro linear* é definida

$$\Psi(B) = 1 + \sum_{j=1}^{\infty} \Psi_j B^j = \sum_{j=0}^{\infty} \Psi_j B^j \quad (37),$$

$$\text{com } \Psi_0 = 1$$

b) a função de autocorrelação para o ruído a_t tem a forma simplificada

$$\rho_k = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases} \quad (38)$$

c) a expressão dos resíduos pode ser rescrita

$$\overline{z}_t = \sum_{j=1}^{\infty} \pi_j \overline{z}_{t-j} + a_t \quad (39)$$

Ou seja, o desvio atual é obtido em função dos anteriores e $\pi(B) = \Psi^{-1}(B)$ (40)

d) e, para ser estacionário, o processo de formação de valores da série temporal deve atender a condição de "*invertibilidade*", ou seja a matriz

$$\pi(B) \overline{z}_t = a_t \quad (41)$$

deve possuir inversa. Isso se dá se a série $\pi(B)$ converge *no, ou próximo ao círculo unitário*.

Caso as condições "a" e "b", acima expostas, não sejam satisfeitas, os valores dos elementos anteriores na série irão se acumulando e os novos elementos da série terão valores que tenderão ao infinito. Ou seja a série não representaria um processo estacionário.

Quando os resíduos $\bar{z}_t$ forem expressos por uma função linear de um número finito q de ruídos brancos, a_t , então a função

$$\bar{z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (42)$$

pode representar os resíduos associados aos valores de elementos de série temporal obtidos com uso “de médias móveis de ordem q ”.

Define-se o “operador para transformação em médias móveis” à função:

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (43)$$

$$\text{ou } z_t = \theta(B)a_t \quad (44)$$

Os estudos sobre estimativa de valores de elementos de séries temporais tratam de $q+2$ parâmetros desconhecidos, que devem ser estimados em função de dados observados sobre as séries temporais.

A associação de modelos tipo “médias móveis” com os de “auto-regressão”, os *modelos combinados ou associados*, levaria a funções do tipo:

$$\bar{z}_t = \phi_1 \bar{z}_{t-1} + \phi_2 \bar{z}_{t-2} + \phi_3 \bar{z}_{t-3} + \dots + \phi_p \bar{z}_{t-p} \quad (45)$$

Aí ter-se-iam $(p+q+2)$ parâmetros desconhecidos que deveriam ser estimados em função de dados observados sobre a série temporal.

Sem entrar em muitos detalhes, é necessário comentar que há uma dualidade entre o modelo de médias móveis e o de auto-regressão [BOX & JENKINS (1976)]. Ou seja, a função obtida através de médias móveis pode ser invertida para outra função do tipo “auto-regressão”. Ou mais, é necessário que a função que expressa o modelo de auto-regressão represente um processo estacionário - isto é, a *função que representa o modelo de médias móveis deve ser “invertível”*.

A dualidade entre os modelos ocorre se

$$\phi(B)\rho_k = 0, \quad k < q \quad (46),$$

que leva à equação característica

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p = 0 \quad (47)$$

cujas raízes são $G_1^{-1}, G_2^{-1}, \dots, G_p^{-1}$.

Para o modelo ser estacionário, é necessário que $|G_i| < 1$.

Também, BOX & JENKINS (1976), páginas 67 e 68, mostram que a série que expressa os resíduos da função que estima os valores de elementos de séries temporais pode ser transformada na função $\pi(B) = \theta^{-1}(B)$, que leva à condição de inversão expressa pela equação característica

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_p B^p = 0 \quad (48)$$

A série $\pi(B)$ converge se as raízes de $\phi(B)$, H_j^{-1} , $j=1, 2, \dots, q$ são tais que $|H_j| < 1$. Ou seja estejam fora do círculo unitário.

4.6 O processo ARIMA para estimativa de valores de elementos de série temporal

A maior parte das séries temporais que refletem valores de observações sobre processos naturais, econômicos e de administração são caracterizados por comportamento não-estacionário, e em particular as variações de valores de elementos não têm médias fixas no tempo. Pode-se também encontrar séries cujos valores de elementos nem ao menos têm comportamento de variação homogêneo.

Mais ainda, o valor em torno do qual os elementos da série flutuam pode variar ao longo do tempo - as flutuações podem variar ao longo do tempo e ser diferentes em instantes diferentes - mas, algumas vezes o comportamento principal da variação de valores pode ser similar de tempos em tempos, ou manter-se em torno de valores que variam no tempo.

O comportamento homogêneo e não estacionário de valores de elementos de série temporal poderia ser representado por um modelo que imponha a hipótese de que a *d-ésima diferença* no processo de variação de valores é estacionária. Na prática a ordem *d-ésima* é "0", "1" ou "2". BOX & JENKINS (1976) demonstraram (capítulo 4, páginas 87 a 94) que o comportamento de valores de elementos de séries com as características citadas no parágrafo anterior pode ser representado através de um operador estacionário para

auto-regressão $\phi(B)$, no qual um ou mais zeros do polinômio $\phi(B)$ [uma ou mais raízes da equação $\phi(B) = 0$] é igual a "1". Ou seja:

$$\varphi(B) = \phi(B)(1-B)^d \quad (49)$$

Assim o comportamento de valores de elementos da série temporal pode ser representado por:

$$\varphi(B)z_t = \phi(B)(1-B)^d z_t = \theta(B)a_t, \text{ ou } \varphi(B)w_t = \theta(B)a_t, \text{ onde } w_t = \nabla^d z_t$$

A função que represente o processo de variação de valores de elementos de série temporal assim definido fornece um modelo poderoso para descrever o comportamento de valores em séries de comportamento estacionário ou não. Essa função, ou processo é conhecida na literatura por *ARIMA* (*autoregressive integrated moving average process*) de ordem (p, d, q) . Onde p é a ordem de um modelo de auto-regressão, d o número de diferenças característica do modelo e, q , de médias móveis. O processo de variação adotado pode ser explicitado por:

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p w_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (50)$$

$$\text{com } w_t = \nabla^d z_t \quad (51)$$

Se substituirmos w_t por $z_t - \mu$, quando $d=0$ o modelo adotado inclui o modelo estacionário misto e também o de auto-regressão, ou ainda o modelo puro de médias móveis. E ainda, relação que é a inversa de $w_t = \nabla^d z_t$, é $z_t = S^d w_t$, tal que:

$$S w_t = \sum_{j=0}^{\infty} w_{t-j} = w_t + w_{t-1} + w_{t-2} + \dots \quad (52)$$

Ou seja a função que expressa o modelo ARIMA pode ser gerada em função de ruídos brancos a_t e através de aplicação de três filtros (Figura 25):

Figura 25 - Diagrama de blocos para representar o processo ARIMA.

- a) O primeiro tem como entrada os ruídos a_t , função de transferência $\theta(B)$ e saída e_t . Onde:

$$e_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (53)$$

- b) O segundo, tem entrada e_t , função de transferência $\phi^{-1}(B)$ e saída w_t :

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \dots + \phi_p w_{t-p} + e_t = \phi^{-1}(B) \quad (54)$$

- c) E, o terceiro filtro tem como entrada w_t e saída z_t , através da função de transferência S^d .

Ou ainda, o ARIMA transforma o processo internamente dependente e possivelmente não-estacionário, z_t em uma seqüência variáveis aleatórias a_t .

O ARIMA se tornou popular em muitas áreas para estudos de funções e previsões que reflitam o comportamento de valores de elementos de séries temporais devido a seu poder e flexibilidade.

Devido a sua complexidade, o ARIMA é uma técnica de difícil uso e exige grande dose de experiência. A qualidade da interpretação de resultados solicita grande experiência de estudiosos e pesquisadores. Recomenda-se a leitura complementar dos trabalhos de HOFF (1983); BAILS & PEPPERS (1982) e McDOWALL et al. (1980).

4.7 Funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais

Os processos ARIMA de ordem (p, d, q) podem ser aplicados para a construção de funções capazes de representar estimativas adequadas de valores de elementos pertencentes a séries temporais - embora seja necessário que o comportamento desses valores seja estacionário, homogêneo e o processo representado pela série esteja em equilíbrio.

Lembrando que o modelo ARIMA é definido através de uso da função

$$\phi(B)(1-B)^d = \theta_0 + \theta(B)a_t \quad (55)$$

onde $\phi(B)$ e $\theta(B)$ são operadores matemáticos sobre B de graus p e q , respectivamente e cujas raízes deveriam estar fora do *círculo unitário*.

Esse modelo é muito geral: contém modelos de auto-regressão, médias móveis, mistos para as médias e combinações de todos os três. O trabalho com esse tipo de formulação pode ser melhor se dividirmos as atividades sobre manuseio de dados em três fases:

- a) A *identificação* - o uso dos dados para efetuar definições preliminares e escolher a sub-classe de modelos para início do processamento de dados;
- b) A *estimativa* - o uso eficiente de dados para fazer inferências sobre parâmetros que condicionam a adequação das funções para estimativa ao modelo adotado;
- c) O *diagnóstico* - a verificação do modelo e as relações identificadas para verificar falhas e aperfeiçoar o uso dos resultados.

A *identificação* de funções para expressar modelos adota processos matemáticos "*não tão eficientes, nem exatos*" para identificar até que ponto se pode fazer simplificações nas funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais - pode-se adotar inclusive o auxílio de gráficos e assemelhados. Para identificar o tipo de função representa-se elementos da série em função do modelo geral para a família de funções que expressam o processo ARIMA.

$$\phi(B)\nabla^d z_t = \theta_0 + \theta(B)\alpha_t \quad (56)$$

O processamento adotado inclui o uso de modelo misto do tipo

$$\phi(B)w_t = \theta_0 + \theta(B)\alpha_t \quad (57)$$

$$\text{onde } w_t = (1-B)^d = \nabla^d z_t \quad (58)$$

que fornece os valores iniciais para uso nas fases seguintes.

E, para o modelo ser *estacionário*, $\phi(B)\rho_k = 0$, $k < q$, leva à condição

$$|G_p| < 1, k > q - p \quad (59)$$

ou seja que as raízes da equação característica dessa função estejam *dentro do círculo unitário*.

Para estimar o *grau de diferenças* que deve ser adotado processam-se dados sobre a relação entre esperanças matemáticas de estimativas de variâncias dos resíduos $E[c_k]/E[c_0]$, com a hipótese de que se δ é muito pequeno, A_1 é o primeiro dos coeficientes de $\phi(B)\rho_k = 0$, $\rho_k \cong A_1(1 - k\delta)$. A experiência mostra que a ordem de diferenças mais usual estaria entre 0, 1 ou 2.

Decidido qual o grau de diferenças inicia-se a *estimativa*: decidir qual forma da função para exprimir as relações entre valores das observações - isso é possível estudando-se funções para autocorrelação de novas séries obtidas por aplicação das diferenças e obtenção de chaves que contribuam para obtenção de p e q para os operadores de auto-regressão e autocorrelação através da equação característica da função de autocorrelação para os modelos adotados.

Para maiores detalhes, ver BOX & JENKINS (1976), páginas 174 a 177. **A origem da referência não foi encontrada.** contém um resumo do comportamento das funções para autocorrelação para um processo ARIMA de ordem (p, d, q) .

Tabela 8- Resumo do comportamento das funções para autocorrelação para um processo ARIMA de ordem (p, d, q) [BOX & JENKINS (1976)]

Ordem	(1, d, 0)	(0, d, 1)
Comportamento de ρ_k	Decai exponencialmente	Somente ρ_1 é diferente de zero
Comportamento de ϕ_{kk}	Somente ϕ_{11} é diferente de zero	Funções exponenciais dominam a queda
Estudos preliminares	$\phi_1 = \rho_1$ (60)	$\rho_1 = \frac{-\theta_1}{1 + \theta_1^2}$ (61)
Regiões admissíveis	$-1 < \phi_1 < 1$	$-1 < \theta_1 < 1$
Ordem	(2, d, 0)	(0, d, 2)
Comportamento de ρ_k	Mistura de exponenciais ou ondas senoidais	Somente ρ_1 e ρ_2 são diferentes de zero
Comportamento de ϕ_{kk}	Somente ϕ_{11} e ϕ_{22} são diferentes de zero	Dominadas por uma mistura de exponenciais ou ondas senoidais amortecidas
Estudos preliminares	$\phi_1 = \frac{\rho_1(1 - \rho_2)}{1 - \rho_1^2}$ (62)	$\rho_1 = \frac{-\theta_1(1 - \theta_2)}{1 - \theta_1^2}$ (63)
	$\phi_2 = \frac{\rho_1 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2}$ (64)	$\rho_2 = \frac{-\theta_2}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2}$ (65)
Regiões admissíveis	$\begin{cases} -1 < \phi_2 < 1 \\ \phi_2 + \phi_1 < 1 \\ \phi_2 - \phi_1 < 1 \end{cases}$	$\begin{cases} -1 < \theta_2 < 1 \\ \theta_2 + \theta_1 < 1 \\ \theta_2 - \theta_1 < 1 \end{cases}$
Ordem	(1, d, 1)	
Comportamento de ρ_k	Decai exponencialmente em função do primeiro intervalo de estudos	
Comportamento de ϕ_{kk}	Dominado por queda exponencial	
Estudos preliminares	$\rho_1 = \frac{(1 - \theta_1\phi_1)(\phi_1 - \theta_1)}{1 - \theta_1^2 - 2\phi_1\theta_1}$ (66)	$\rho_2 = \rho_1\phi_1$ (67)
Regiões admissíveis	$-1 < \phi_1 < 1$	$-1 < \theta_1 < 1$

Como não se conhecem os valores de coeficientes de correlação teóricos e porque os valores estimados podem diferir bastante de valores teóricos,

necessitamos de indicativos sobre o valor teórico para controle. Em particular, é necessário ter subsídios que garantam que as autocorrelações tendem a zero desde um dado intervalo q .

Usando a hipótese de ocorrência da distribuição normal, os coeficientes de autocorrelação podem ser substituídos pela sua estimativa,

$$\hat{\sigma}[r_k] \cong \frac{1}{n^2} \left\{ 1 + 2(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_q^2) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad k > q \quad (68)$$

Diz SANT'ANNA (1997): "o tratamento de dados conforme acima exposto poderia ser considerado estratosférico ou sobrenatural antes do advento e disseminação do processamento de dados em computadores. Na atualidade associam-se conhecimentos de métodos estatísticos, numéricos e o processamento em computadores para colocar em uso o potencial de processos como o ARIMA".

Dentre os novos conceitos estão: *verossímil* é "semelhante a verdade, que parece verdadeiro, que não repugna a verdade". *Verossimilhança* é a "propriedade de ser verossímil".

Os conceitos estatísticos de análise da *verossimilhança* são usados durante a estimativa de valores de elementos de séries temporais através de aplicações do ARIMA para estudos sobre a estimativa de funções que expressam as somas de quadrados de desvios.

Supondo N observações z associadas a uma variável aleatória com probabilidade de ocorrência de medidas ou contagens $p(z|\xi)$ dependente de fatores desconhecidos ξ , o estudo de valores ξ sobre as observações é conduzido através do uso da função de verossimilhança $L(\xi|z)$, que tem a mesma forma que $p(z|\xi)$.

É usual o manuseio da função $\ln[L(\xi|z)] = l(\xi|z)$ porque os estatísticos adotam o chamado *princípio da verossimilhança* para isolar os efeitos de todos as variáveis nas relações em estudo. Os valores de parâmetros que

maximizam a função que expressa a verossimilhança são conhecidos como *estimadores da verossimilhança máxima*.

Supondo que tenhamos $N = n + d$ observações z de uma série temporal, denotadas por $z_{d+1}, \dots, z_0, z_1, z_2, \dots, z_n$, e essa série tenha sido gerada através de uso de um modelo $ARIMA(p, d, q)$, poderemos gerar uma série w das diferenças $w_1, w_2, \dots, w_n$, de ordem $N - d$, onde $w_t = \nabla^d z_t$. Isso torna o problema *obter as matrizes de parâmetros ϕ e θ do modelo ARIMA* equivalente à busca do conjunto de valores dos " w ". O novo processo estacionário pode ser escrito:

$$a_t = \bar{w}_1 - \phi_1 \bar{w}_{t-1} - \phi_2 \bar{w}_{t-2} - \dots - \phi_p \bar{w}_{t-p} + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (69)$$

Onde $w_t = \nabla^d z_t$ e $\bar{w} = w_t - \mu$, com esperança matemática $E[w_t] = \mu$.

Para início de avaliação dos ruídos a_t é necessário fornecer um pré-estimativa, obtida em função das matrizes w_* , com p valores e a_* , com q valores - este procedimento estima um *conjunto inicial de valores para a série w* , que leva às matrizes de parâmetros (ϕ, θ) . Em função desses valores estima-se o conjunto de verossimilhança $a_t(\phi, \theta | w_*, a_*, w)$, $t=1, 2, \dots, n$. Se por hipótese a distribuição de a for a distribuição normal, a probabilidade de ocorrência do conjunto dos " a " será:

$$p(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sigma_a^{-n} \exp \left\{ - \left(\sum_{t=1}^n \frac{a_t^2}{2\sigma_a^2} \right) \right\} \quad (70)$$

E, a estimativa da verossimilhança associada seria

$$l_*(\phi, \theta) = -n \ln(\sigma_a) - \frac{S_*(\phi, \theta)}{2\sigma_a^2} \quad (71)$$

que permite a estimativa de somas de quadrados de resíduos,

$$S_* = \sum_{t=1}^n a_t^2(\phi, \theta | w_*, a_*, w) \quad (72)$$

Esse é um processo equivalente (apenas formalmente) ao método dos mínimos quadrados para estimativa de valores de variáveis. Mas, é processo

eficiente para estimativa de valores de variáveis quando for usado em processamento de dados em computadores.

O procedimento exposto pode ser generalizado usando a hipótese de que o modelo estacionário pode ser gerado da suposição de que w_t tem a função de geração de covariâncias $\gamma(B)$ representada pelo modelo linear $\phi(B)w_t = \theta(B)a_t$ e que valores estimados para conjuntos de w_t sejam representados por:

$$\phi(B)\overline{w_t} = \theta(B)a_t, \text{ onde } \nabla^d z_t = w_t \text{ e } \overline{w_t} = w_t - \mu \quad (73)$$

Nessas condições, segundo BOX & JENKINS (1976), as estimativas de erros padrões das médias dos w poderia ser efetuada conforme resumido na Tabela 9.

Tabela 9 - Estimativa de erros padrões das médias dos w , quando $w_t = \nabla^d z_t$, e z_t é função que representa um modelo ARIMA

Ordem	$(1,d,0)$	$(0,d,1)$
	$\left\{ \frac{c_o(1+r_1)}{n(1-r_1)} \right\}^{1/2} \quad (74)$	$\left\{ \frac{c_o(1+2r_1)}{n} \right\}^{1/2} \quad (75)$
Ordem	$(2,d,0)$	$(0,d,2)$
	$\left\{ \frac{c_o(1+r_1)(1-2r_1^2)}{n(1-r_1)(1-r_2)} \right\}^{1/2} \quad (76)$	$\left\{ \frac{c_o(1+2r_1+2r_2)}{n} \right\}^{1/2} \quad (77)$
Ordem	$(1,d,1)$	
	$\left\{ \frac{c_o}{n} \left(1 + \frac{2r_1^2}{r_1-r_2} \right) \right\}^{1/2} \quad (78)$	

Se admitirmos que a estrutura de probabilidades de uma função que represente um modelo de estimativa de valores de série temporal pode ser representada por múltiplos de outros modelos, [BOX & JENKINS (1976)],

página 196, desenvolveram estimativas para estudos dos w , chamados *padrões F de valores iniciais das séries w* ,

$$F = z_t + z_{t-1} + z_{t-2} = 58,3 + a_t \quad (79)$$

que podem ser usados para geração de modelos de estimativa de valores e resíduos.

4.8 Controle de qualidade sobre funções geradas pelo modelo ARIMA

Assumindo que os valores " w " podem ter sido gerados em função de funções que representem o modelo de estimativa de erros associados a valores da série temporal, $\{\overline{w_t}\}$, $\phi(B)\overline{w_t} = \theta(B)a_t$, em função de uma estimativa preliminar, $\phi(F)\overline{w_t} = \theta(F)e_t$, usada para gerar os ruídos a_t em função de estimativas por recorrência e verossimilhança em função de intervalo de tempo para controle Q

$$[e_{-j} | \phi, \theta, w] = 0, \quad j = 1, 2, \dots \quad (80)$$

$$[a_{-j} | \phi, \theta, w] = 0, \quad j > Q-1 \quad (81)$$

O uso de simplificações e processamento prévio sobre funções pode acelerar de sobremaneira o *controle da qualidade dos coeficientes de funções para estimativa*. BOX & JENKINS (1976), páginas 226 a 231 relatam conclusões sobre estudos desses coeficientes e em resumo:

a) definem um vetor para controle para a auto-regressão β com $k = p+q$ elementos, que define o conjunto de parâmetros que controlam o modelo ARIMA como $\{\phi, \theta, \sigma_a\}$, ou $\{\phi, \sigma_a\}$, $\{\xi\}$. Isso leva a verossimilhança a

$$l(\xi) = l(\beta, \sigma_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k l_{ij} (\beta_i - \hat{\beta}_i) (\beta_j - \hat{\beta}_j) \quad (82)$$

b) conjunto de vetores de controle $\{\beta\}$ é conhecido como a *matriz de informações sobre parâmetros*. Usando hipóteses e aproximações, redefine-se a variância $V(\hat{\beta}_i)$ para $j = i$ em função do processamento da estimativa $\text{cov}(\hat{\beta}, \beta_j) \cong 2\hat{\sigma}_a S^{ij}$, onde a matriz $\{S^{ij}\} = \{S_{ij}\}^{-1}$.

A estimativa dos intervalos de confiança $1 - \varepsilon$ pode ser efetuada usando as esperanças matemáticas da verossimilhança $E[l_{ij}]$ e é definida pela região

$$-\sum_{i,j} E(l_{ij})(\beta_i - \hat{\beta}_i)(\beta_j - \hat{\beta}_j) < \chi^2_\varepsilon(k) \quad , \quad (83)$$

onde $\chi^2_\varepsilon(k)$ é o correspondente χ^2 para ε e k e o controle dos intervalos de confiança dos parâmetros é efetuado com uso de valores da matriz

$$S(\beta) = S(\hat{\beta}) \left\{ 1 + \frac{\chi^2_\varepsilon(k)}{n} \right\} \quad (84)$$

4.8.1 Controle sobre a “existência” de funções para estimativa

A “verificação existência de funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais” é um problema que se confunde com a “verificação de existência de relações entre o conjunto de pares de medidas sobre duas variáveis”.

Para facilitar as soluções, o texto de BOX & JENKINS (1976) sugere que se adote um conjunto básico de funções para estimativa que constitui o núcleo das expressões entre relações de medidas sobre elementos de séries temporais. Os tipos de função para orientação de processamento de dados estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Tipos de função para orientação de processamento de dados na obtenção de funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais

Tipos de função	DESCRIÇÃO
(1,0,0)	Somente auto-regressão, com um único coeficiente.
(1,1,0)	Auto-regressão e transformação por diferenças ao valor anterior de valores de elementos da série.
(1,2,0)	Auto-regressão, um único coeficiente e transformação por diferenças aos dois últimos valores que antecedem ao elemento da série.
(2,0,0)	Auto-regressão, com dois coeficientes (transformação para processar cada observação em "definida pelas outras duas anteriores").
(1,1,1)	Auto-regressão e transformação por diferenças ao valor anterior e parcela correspondente a médias móveis.
(1,0,1)	Auto-regressão e médias móveis.

Um dos controles recomendados sobre a existência de função que descreva os valores de elementos de uma série temporal é aplicarmos o teste *t* de *Student* sobre as estimativas de valores efetuadas.

Generalizações sobre o teste *t* podem ser usadas para verificar a compatibilidade das estimativas através de funções que representem os valores de séries temporais obtidas através de uso do modelo ARIMA. Entretanto, formalmente o processamento para uso da teoria desenvolvida por Student é simples: as variantes podem ser muitas mas recaímos na base teórica simples de estudo e teste. Para maiores detalhes ver SANT'ANNA (1997), páginas 59 a 61. Em resumo:

- a) se o "*t* de Student" não puder ser estimado para os dados e a função testada, o "erro padrão de estimativa" não pode ser calculado e as estimativas são suspeitas porque poderia não ser possível estimar intervalos de confiança;
- b) se, para um coeficiente estimado, a estatística "*t*" associada ao número de graus de liberdade que as observações fornecem ao estudo da função para estimativa for **maior que** a estatística "*t* de Student" para o teste correspondente, diz-se que "*a relação identificada por essa função para estimativa de valores de elementos da série temporal poderia explicar relações entre os pares de variáveis observados*";

- c) Caso a estatística " t " associada ao número de graus de liberdade que as observações fornecem ao estudo da função para estimativa for **menor que** a estatística " t de Student" para o teste correspondente, diz-se que "*a relação identificada por essa função para estimativa de valores de elementos da série temporal **poderia não explicar** relações entre os pares de variáveis observados*". Ou seja a função poderia não ter significado estatístico.

4.8.2 Controle sobre erros de previsão por funções para estimativa

O desempenho de uma particular função na estimativa de valores de elementos de uma série depende essencialmente de três fatores:

- a) o processo de formação de valores da série;
- b) a habilidade em identificar e ajustar coeficientes de funções para estimativa corretamente;
- c) os critérios adotados para controle de qualidade de previsões.

A função para estimativa de valores de elementos de uma série temporal é uma "descrição probabilística do processo de formação de valores de elementos da série". MORETTIN & TOLOI (1981) comentam que "cabe a usuário" de métodos para previsão as decisões sobre "o como" verificar se atingiram seus objetivos.

A função que descreve valores de elementos de uma série não necessariamente conduz a um processo eficaz de previsão. O critério mais usado para comparar a *eficácia de funções para previsão de valores de elementos de série temporal* é o "*menor erro médio quadrático*" [MORETTIN & TOLOI (1981)]. A Figura 26 é uma tentativa de ilustrar a posição relativa de valores observados para elementos de uma série temporal $[Z(t)]$ até um instante " t " e previsões para valores de elementos até o instante " $t+h$ ", $[Z(t+h)]$.

Figura 26 – Observações e previsões de valores de elementos de série temporal de origem em “t” e horizonte em “h”

GRANGER & NEWBOLD (1976) sugerem que a estimativa do erro quadrático médio da previsão, abreviado “EQMP”, seja

$$EQMP_{(h)} = \frac{\sum_{t=m+1}^N [Z_t - \hat{Z}_{t-h}(h)]^2}{N - m} \quad (85)$$

Onde”:

Z_t é o último valor observado para elemento da série temporal;

$\hat{Z}_{t-h}(h)$ é uma estimativa, através da “função para estimativa”, de valor para o elemento que esteja na posição da observação definida por um índice entre $(m+1)$ e N ;

“h” é o número de intervalos de tempo após a última observação;

N é o número de observações;

m é um número de últimos valores observados para elementos da série temporal sob análise. Não há teoria para fixar “m”, entretanto diz-se [GRANGER & NEWBOLD (1976)] que previsões são “imediatas” se $N-m=1$; “a curto prazo” se $N-m=6$ ou “a longo prazo” se $N-m=12$.

Em tempo: “desempenho de função” não é sinônimo de existência de relações entre tempo e valores de elementos de série temporal!!!!

4.9 O processamento de dados em computadores

As necessidades de militares, de pesquisa e administração fizeram governos, empresas e outros, a financiar o desenvolvimento de programas de computador específicos para o processamento de dados provenientes de séries temporais.

Mas, a maioria das tentativas de estimativa de valores de elementos de séries temporais exige o manuseio de grande volume de dados. Os métodos numéricos associados são de árduo manuseio.

Dentre os produtos que podem ser usados para esse fim, destacamos o conjunto de programas para computador denominado *Complete Statistical System - STATISTICA* (STATSOFT, 1991), que contém um conjunto de rotinas para processamento de dados em computador úteis para cumprir as funções necessárias para identificar, estimar coeficientes e avaliar funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais.

O *STATISTICA* (STATSOFT, 1991) contém procedimentos para definir o número de parâmetros a serem estimados, identificar e eliminar os efeitos de variações sazonais, contribuir para melhor qualidade de modelos, análise de resíduos, testes para avaliação de significância; estudos sobre funções para representar processos de auto-regressão, métodos de médias móveis e ARIMA; estimativa e avaliação de parâmetros estatísticos ou previsões.

As rotinas incluídas no *STATISTICA* foram desenvolvidas de acordo com sugestões de BOX & JENKINS (1976), são flexíveis no que se refere ao tratamento à capacidade de processamento em microcomputadores. A entrada de dados pode ser efetuada no pacote de programas - mas, dados processados previamente podem ser transferidos para o *STATISTICA*.

A apresentação de resultados pode ser tabelas ou gráficos que contribuam para melhor visualização de resultados. *Compete entretanto, ao analista estudar, conhecer, discutir e avaliar teorias referentes aos procedimentos usados para dirigir adequadamente as estimativas e avaliações porque é indispensável o fornecimento de um grande número de informações de nível conveniente para garantir a qualidade de estimativas.*

5 ARIMA e comportamento de pavimentos

Para identificar consequências do uso do método ARIMA para obter funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais, submeteram-se os dados consolidados a estudos através do programa para computador STATISTICA (STATSOFT, 1991).

Os dados processados foram:

- a) o valor do "pavement condition index" igual a 100, correspondente ao instante em que o pavimento foi colocado em serviço;
- b) os valores de "pavement condition index" iguais aos valores estimados usando as distribuições de ocorrências de defeitos correspondentes as quatro observações efetuadas sobre o pavimento da via que liga Assai a Pau D'Alho;
- c) valores interpolados nos intervalos entre as observações, para simular que as observações foram distribuídas mês a mês durante o intervalo de vida do pavimento estudado para obter dados sobre distribuições de defeitos;
- d) um total de vinte e seis pares ["pavement condition index" , "tempo contado desde o início de colocação do pavimento em serviço"].

As capacidade de previsão estudada foi o "médio prazo", "m=6", segundo GRANGER & NEWBOLD (1976).

5.1 A existência das funções ou relações entre tempo e valores de elementos de séries temporais

A “existência de funções para estimativa de valores de elementos de séries temporais pode ser discutida em função de resultados de análises sobre a “estatística *t* de Student” (item 4.8.1).

Para visualização transferiram-se os “*t estimados*” resultantes de processamento sobre os dados de observações sobre o pavimento da via Assai a Pau D’Alho (Tabela 5 e Tabela 6), que levaram às estimativas de “pavement condition index” expostas na Tabela 7, para as Tabela 15 a Tabela 29.

Também, considerando que as estatísticas *t de Student* assumem os valores $t(0,005; 23 \text{ graus de liberdade}) = 2,807$; $t(0,005; 24 \text{ graus de liberdade}) = 2,797$; $t(0,005; 25 \text{ graus de liberdade}) = 2,787$. Nas Tabela 15 a Tabela 29 também foram resumidos os resultados obtidos em análise sobre a existência de funções que usou o conjunto de conceitos expostos no item 4.8.1.

Tabela 11 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 0 a 12

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	19,3203	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	18,1241	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0507	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7492	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0508	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,9178	
(1,1,1)	p(1)	23	0,9803	"t" menor que "t de Student".
	q(1)		0,4029	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,6667	

Tabela 12- Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 12 a 24

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	20,7258	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	19,8262	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		0,0188	"f" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7116	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		0,0189	"f" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,6829	
(1,1,1)	p(1)	23	0,7861	"f" menor que "t de Student".
	q(1)		0,1959	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,2553	

Tabela 13 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 24 a 37+10

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	23,0772	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	21,8547	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0519	"f" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,8086	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0524	"f" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,7455	
(1,1,1)	p(1)	23	0,7124	"f" menor que "t de Student".
	q(1)		-0,0714	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,1034	

Tabela 14 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 37+10 a 52

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	19,7294	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	18,1179	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,1684	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,8473	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,1726	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,8765	
(1,1,1)	p(1)	23	0,9190	"t" menor que "t de Student".
	q(1)		0,1704	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,2222

Tabela 15 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 100 a 120

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	20,1172	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	18,9484	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0443	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7507	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0448	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,9412	
(1,1,1)	p(1)	23	0,9999	"t" menor que "t de Student".
	q(1)		0,3999	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,5000	

Tabela 16 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 120 a 125

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	16,9344	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	15,9814	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		0,0216	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,6221	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		0,0215	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,8449	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	0,8830	
	q(1)		0,1271	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,3111	

Tabela 17 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 125 a 135

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	16,4284	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	15,4754	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		0,0230	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,6151	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		0,0229	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,8750	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	0,8920	
	q(1)		0,0719	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,2308	

Tabela 18 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 147 a 150

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	19,8369	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	18,9294	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		0,0245	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7046	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		0,0241	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,8113	
(1,1,1)	p(1)	23	0,8906	"t" menor que "t de Student".
	q(1)		0,2324	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,5625	

Tabela 19 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 175 a 192

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	18,9595	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	17,6573	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0834	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7579	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0849	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,9833	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	1,0000	
	q(1)		0,3235	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,3636	

Tabela 20 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 192 a 200

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	19,7079	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	18,7872	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		0,0169	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7001	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		0,0170	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,7963	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	0,9750	
	q(1)		0,5705	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,6667	

Tabela 21 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 604=3 a 12

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	20,4527	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	19,1321	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0839	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,8043	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0846	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,8267	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	0,9528	
	q(1)		0,4307	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,5769	

Tabela 22 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 60 a 116

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	21,4110	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	0,0000	"f" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
	q(1)		0,0000	
(2,0,0)	p(1)	24	4,8083	"f" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0682	
(1,1,0)	p(1)	24	0,8525	"f" menor que "t de Student". Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	0,8845	
	q(1)		0,1180	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,1765	

Tabela 23 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 141 a 152

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	21,7029	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	20,8824	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		0,0378	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,7068	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		0,0379	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,7609	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,1,1)	p(1)	23	0,8614	
	q(1)		0,2288	
(1,2,0)	p(1)	23	-0,2222	

Tabela 24 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 167 a 250

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	20,8940	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	19,6043	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0723	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,8011	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0727	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,8070	
(1,1,1)	p(1)	23	0,9553	"t" menor que "t de Student".
	q(1)		0,4511	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,6087

Tabela 25 - Existência de funções para estimativa de valores de "pavement condition index" na via PR-090, segmento entre as estacas 250 a 280

Tipo de função	Coefficientes	Graus de Liberdade	t estimado	Comentários
(1,0,0)	p(1)	25	22,0045	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
(1,0,1)	p(1)	24	20,7728	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	q(1)		-0,0593	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(2,0,0)	p(1)	24	4,8033	"t" maior que o "t de Student". A função pode explicar relações entre os pares de variáveis observados
	p(2)		-0,0601	"t" menor que "t de Student". Essa parcela da função pode não ter significado estatístico
(1,1,0)	p(1)	24	0,7843	
(1,1,1)	p(1)	23	0,9175	"t" menor que "t de Student".
	q(1)		0,3553	Essas funções podem não ter significado estatístico
(1,2,0)	p(1)	23	-0,5455	

A conclusão a que se pode chegar é que: para os quinze segmentos de pavimento observados na PR-090, a análise sobre as informações expostas na coluna "comentários" das Tabela 15 a Tabela 29 indica que *existe pelo menos um tipo de função para estimativa de valores de elementos de série temporal para previsão do "pavement condition index" que poderia explicar as relações entre o tempo e o "estado do pavimento" (expresso pelo índice verificado).*

5.2 Eficiência de funções para previsão de “pavement condition index”

Para estudo da eficiência de funções para previsão de “pavement condition index” adotou-se o conjunto de conceitos expostos no item 4.8.2 e dados expostos na Tabela 1. Resumo de estimativas de “erro médio quadrático” consta na Tabela 26. A cor amarela indica a função mais eficiente.

Tabela 26 – Erros médios quadráticos na previsão de “pavement condition index”

	Tipo de função	Erro médio quadrático		Tipo de função	Erro médio quadrático		Tipo de função	Erro médio quadrático
entre estacas 0 e 12	(1,0,0)	1,10	entre estacas 12 e 24	(1,0,0)	16,27	entre estacas 24 e 37+10	(1,0,0)	381,96
	(1,0,1)	1,45		(1,0,1)	16,75		(1,0,1)	371,64
	(2,0,0)	1,45		(2,0,0)	16,75		(2,0,0)	371,50
	(1,1,0)	0,73		(1,1,0)	11,43		(1,1,0)	0,77
	(1,1,1)	0,15		(1,1,1)	5,40		(1,1,1)	1,20
	(1,2,0)	0,00		(1,2,0)	30,73		(1,2,0)	60,71
entre estacas 37+10 e 52	(1,0,0)	20,87	entre estacas 100 e 120	(1,0,0)	6,83	entre estacas 120 e 125	(1,0,0)	33,00
	(1,0,1)	45,90		(1,0,1)	6,12		(1,0,1)	34,76
	(2,0,0)	47,28		(2,0,0)	6,09		(2,0,0)	34,74
	(1,1,0)	4,17		(1,1,0)	1,12		(1,1,0)	0,65
	(1,1,1)	5,97		(1,1,1)	0,63		(1,1,1)	1,21
	(1,2,0)	58,98		(1,2,0)	0,67		(1,2,0)	33,00
entre estacas 125 e 135	(1,0,0)	33,00	entre estacas 147 e 150	(1,0,0)	1,07	entre estacas 175 e 192	(1,0,0)	9,35
	(1,0,1)	34,24		(1,0,1)	0,99		(1,0,1)	7,93
	(2,0,0)	34,23		(2,0,0)	1,00		(2,0,0)	7,85
	(1,1,0)	4,71		(1,1,0)	2,74		(1,1,0)	1,87
	(1,1,1)	6,11		(1,1,1)	1,39		(1,1,1)	0,46
	(1,2,0)	33,00		(1,2,0)	0,50		(1,2,0)	1,00
entre estacas 192 e 200	(1,0,0)	3,34	entre estacas 604=3 e 12	(1,0,0)	2,67	entre estacas 60 e 116	(1,0,0)	0,33
	(1,0,1)	3,15		(1,0,1)	4,00		(1,0,1)	0,72
	(2,0,0)	3,15		(2,0,0)	4,00		(2,0,0)	0,10
	(1,1,0)	7,17		(1,1,0)	0,79		(1,1,0)	0,33
	(1,1,1)	0,12		(1,1,1)	3,58		(1,1,1)	0,27
	(1,2,0)	1,02		(1,2,0)	2,67		(1,2,0)	0,33
entre estacas 141 e 152	(1,0,0)	258,08	entre estacas 167 e 250	(1,0,0)	161,99	entre estacas 250 e 280	(1,0,0)	26,21
	(1,0,1)	261,31		(1,0,1)	175,07		(1,0,1)	23,59
	(2,0,0)	261,34		(2,0,0)	175,23		(2,0,0)	23,44
	(1,1,0)	1,80		(1,1,0)	0,34		(1,1,0)	5,28
	(1,1,1)	0,32		(1,1,1)	0,92		(1,1,1)	0,76
	(1,2,0)	16,28		(1,2,0)	0,10		(1,2,0)	0,33

A Tabela 27 lista figuras que resumem o aspecto das funções mais eficientes para estimativas de PCI na via que liga Assai a Pau D'Alho. *Em todas as figuras, o eixo horizontal representa os meses desde a liberação do pavimento ao tráfego e o eixo vertical representa o valor do PCI, e o termo “via que liga Assai a Pau D'Alho” significa “PR-090”.*

Tabela 27 – Listagem de figuras de referência à funções mais eficientes para estimativas de “pavement condition index” na via PR-090

Segmento entre	Tipo de função	Referência	Segmento entre	Tipo de função	Referência
estacas 0 e 12	(1,2,0)	Figura 27	estacas 175 e 192	(1,1,1),	figura 35
estacas 12 e 24	(1,1,1)	Figura 28	estacas 192 e 200	(1,1,1),	figura 36
estacas 24 e 37+10	(1,1,0),	figura 29	estacas 604=3 e 12	(1,1,0),	figura 37
estacas 37+10 e 52	(1,1,0)	figura 30	estacas 60 e 116	(2,0,0)	figura 38
estacas 100 e 120	(1,1,1)	figura 31	estacas 141 e 152	(1,1,1)	figura 39
estacas 120 e 125	(1,1,0)	figura 32	estacas 167 e 250	(1,2,0)	figura 40
estacas 125 e 135	(1,1,0)	figura 33	estacas 250 e 280	(1,2,0)	figura 41
estacas 147 e 150	(1,2,0),	figura 34

Figura 27 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 0 e 12 da via que liga Assai a Pau D'Alho, função tipo (1,2,0)

Figura 28 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 12 e 24 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,1)

Figura 29 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 24 e 37+10 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,0)

Figura 30 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 37+10 e 52 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,0)

Figura 31 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 100 e 120 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,1)

Figura 32 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 120 e 125 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,0)

Figura 33 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 125 e 135 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,0).

Figura 34 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 147 e 150 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,2,0)

Figura 35 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 175 e 192 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,1)

Figura 36 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 192 e 200 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,1)

Figura 37 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 604=3 e 12 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,1,0).

Figura 38 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 60 e 116 da PR-090, função tipo (2,0,0)

Figura 39 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 141 e 152 da PR-090, função tipo (1,1,1)

Figura 40 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 167 e 250 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,2,0)

Figura 41 – Melhor função para estimativa de “pavement condition index” entre estacas 250 e 280 da via que liga Assai a Pau D’Alho, função tipo (1,2,0)

5.2.1 Conseqüências da existência de funções eficientes para estimativas de "pavement condition index"

GRANGER & NEWBOLD (1976) expuseram que funções para previsão de valores de elementos de séries temporais indicam a existência de relações entre o tempo e essas relações. BOX & JENKINS (1976) reforçam o conceito exposto anteriormente.

Assim, pode-se expor que, para a via que liga Assai a Pau D'Alho:

- a) se de um lado as funções de menor erro médio de estimativa não constam (Tabela 15 a Tabela 29) dentre os tipos que definem a existência de relações entre o tempo e valores de "pavement condition index" estimados, de outro *indicam que poderão existir relações numéricas eficientes para estimativa de "pavement condition index"*;
- b) é temerário sugerir as funções ilustradas nas Figura 27 a Figura 41 como guias para estimativas de "pavement condition index". Entretanto, com parcimônia, *estes resultados podem ser usados para orientar a identificação de tendências de comportamento de valores do índice estudado e por conseqüência de "estado de pavimento"*;
- c) as tendências identificadas podem ser usadas para orientar o aprofundamento de estudos, análises e outros que podem orientar decisões sobre fatos da manutenção e avaliação de materiais e processos construtivos de pavimentos;
- d) exceto o indicado na Figura 28, a tendência de redução de "pavement condition index" é uma constante para todos os trechos. O fato é coerente com a idéia de que a acumulação de repetição de solicitações de pavimento por eixos de veículos provoca o desgaste do pavimento como um todo;
- e) exceto o indicado na Figura 38, mostra-se a tendência de "possibilidade de estimativa de intervalos de confiança" associados às "estimativas de valores do pavement condition index".

6 Conclusões e Recomendações

O exposto e discutido mostrou, nos itens 5.1 e 5.2, que a estimativa de valores de elementos de séries temporais podem ser úteis e eficientes para identificar informações sobre características de comportamento de pavimento ao longo do tempo em que é submetido às solicitações de cargas provenientes de tráfego de eixos de veículos.

Isso porque:

- a) para os quinze segmentos de pavimento observados na via que liga Assai a Pau D'Alho, a análise sobre as informações expostas na coluna "comentários" das Tabela 15 a Tabela 29 indica que *existe pelo menos um tipo de função para estimativa de valores de elementos de série temporal para previsão do "pavement condition index" que poderia explicar as relações entre o tempo e o "estado do pavimento" (expresso pelo índice verificado)*;
- b) se de um lado as funções de menor erro médio de estimativa não constam (Tabela 15 a tabela 29) dentre os tipos que definem a existência de relações entre o tempo e valores de "pavement condition index" estimados, de outro *indicam que poderão existir relações numéricas eficientes com o tempo para estimativa de "pavement condition index"*.

O estudo sobre a tendência de redução de "pavement condition index" forneceu resultados coerentes com a idéia de que a acumulação de repetição de solicitações ao pavimento por eixos de veículos provoca o desgaste do pavimento como um todo. Isso indica que o *processo de desgaste do pavimento* foi *"em termos conceituais explicado pelos estudos efetuados com uso da busca de funções proposta pelo método ARIMA"*. A

coerência se ampliou ao mostrar há tendência de “possibilidade de estimativa de intervalos de confiança associados às estimativas de valores do pavement condition index”.

Recomenda-se que, com parcimônia, *os resultados sejam usados para orientar identificação de tendências de comportamento de valores do índice estudado* e por conseqüência de “estado de pavimento”. Ressalte-se que os resultados são locais e não podem ser transladados.

Os resultados expostos indicam que é possível derivar um modelo matemático ou estatístico que pode ser usado para verificar probabilidade de ocorrência de valor futuro para o “pavement condition index”. As funções para estimativa de valores são parte fundamental de processos para descrever, através de índices ou outras expressões para a serventia, o estado de pavimento do ponto de vista de conforto e segurança ao tráfego (como sentido pela média de usuários de via). Mas, repetimos que *direta ou indiretamente, é o arcabouço proposto por CAREY & IRICK (1960) a base de métodos para estimar “índices para classificar o serviço oferecido pelo pavimento às viagens de veículos”*.

O *processo de uso de estimativas de valores de elementos de séries temporais com uso do ARIMA* tem potencial para orientar estudos sobre comportamento de pavimentos. As operações aqui efetuadas podem tornar-se roteiro para outros trabalhos.

O *estudo de índices para verificar o “estado de pavimentos”, ou seja, de defeitos da superfície de pavimentos* podem contribuir para orientar ações para aumentar o conforto e segurança de viagens ou facilitar o tráfego de veículos. Em particular, as tendências identificadas podem ser usadas para orientar o aprofundamento de estudos, análises e outros que podem melhorar decisões sobre fatos da manutenção, avaliação de materiais e processos construtivos de pavimentos.

A análise de variações no tempo de “valores de elementos pertencentes às séries temporais” é uma ciência com componentes de arte. Isso porque a eficiência de uso de resultados pode exigir a aplicação de componentes de

habilidade, senso e experiência de analistas. O estudo de índices para exprimir “estado de pavimento” exige cautela, cultura e treinamento no uso de métodos e processos para o tratamento de dados obtidos nas observações efetuadas. O método ARIMA mostrou seu potencial nessa direção.

Algumas sugestões específicas podem ser:

- a) A continuação de observações na via que liga Assai a Pau D’Alho pode contribuir para a continuidade de pesquisas e aperfeiçoamento dos resultados aqui expostos. E também para a própria avaliação de comportamento de pavimentos;
- b) O processo ARIMA, com o que aqui foi exposto pode ser usado para repetir o processamento de dados em outros casos onde existam observações sobre pavimentos de vias. Os resultados decorrentes ampliarão o domínio sobre a verificação de tendências de índices para avaliação de “estado de pavimento”.

7 Bibliografia

- AASHO (1962), *"The AASHO Road Test: Report 5-Pavement Research"* - HRB Special Report 61E - Washington, D.C..
- AFIESIMAMA, B.T. & GARCIA-DIAZ, A. (1988), *"Model for Evaluating Rehabilitation Costs of Flexible Pavements under Different Climatic Conditions."* - In: Transportation Research Record - TRB, nº 1200.
- ARANOVICH, L. A. S. (1985), *"Desempenho de Pavimentos de Baixo Custo no Estado do Paraná"*. Rio de Janeiro. 360p. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ.
- ARCHONDO-CALLAO, R. (1992), *"The HDM-III Model - Highway Design and Maintenance Standards Model"*. World Bank. Washington, D.C.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991), *"Pavement Management Implementation"*, Holt/Gramling, editors. STP 1121.
- BAILS, D. G. & PEPPERS, L. C. (1982), *"Business Fluctuations: Forecasting Technics and Applications"*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ.
- BOX, G. E. P. & JENKINS, G. M. (1970), *"Time Series Analysis, Forecasting and Control"*, Holden-Day, San Francisco.
- BOX, G. E. P. & JENKINS, G. M. (1976), *"Time Series Analysis, Forecasting and Control"*, Revised Edition, Holden-Day, San Francisco.
- BUTT, A.A.; SHAHIN, M.Y.; FEIGHAN, K.J. & CARPENTER, S.H. (1987), *"Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process"*. In: Transportation Research Record - TRB, nº 1123.
- CAREY, J.R. & IRICK, P.E. (1960), *"The Pavement Serviceability-Performance Concepts"*. HRB Bulletin 250.
- COLLURA, J.; SPRING, G. & BLACK, K.B. (1993), *"Service Lives and Costs of Local Highway Maintenance and Rehabilitation Treatments"*. In: Transportation Research Record - TRB, nº 1397.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO PARANÁ (1991), *"Sarjetas e Valetas"*. Especificação de Serviço DER/PR ES-D 01/91. Paraná.
- EMBRAPA (1984), *"Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Paraná"*. Tomo I. Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1984.

- GARCIA-DIAZ, A. & RIGGINS, M. (1984), "**Serviceability and Distress Methodology for Predicting Pavement Performance**". In: Transportation Research Record 997. National Research Council, Washington, DC.
- GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (1976), "**Pesquisa do Interrelacionamento entre Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias**", Relatório 1 - Conceitos e Metodologias - Brasília, DF.
- GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes (1982), "**Pesquisa do Interrelacionamento entre Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias**" - 12 volumes, Ministério dos Transportes, Brasília-DF, Brasil.
- GEORGE, K. P., RAJAGOPAL, A. S. & LIM, L. K. (1989), "**Models for Predicting Pavement Deterioration**". In: Transportation Research Record 1215. National Research Council, Washington, DC.
- GOPINATH, D.; BEN-AKIVA, M. & RAMASWAMY, R. (1994), "**Modeling Performance of Highway Pavements**". In: Transportation Research Record - TRB, nº 1449.
- GRANGER, C. W. J. & NEWBOLD, J. P. (1976), "**Forecasting Transformed Series**", Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 38.
- HAAS, R.; HUDSON, W.R. & ZANIEWSKI, J. (1994), "**Modern Pavement Management**". Krieger Publishing Co. - Malamar, Florida.
- HAAS, R.; HUDSON, W.R. (1978), "**Pavement Management Systems**". McGraw-Hill.
- HODGES, J.W.; ROLT, J. & JONES, T.E. (1975), "**The Kenia Road Transport Cost Study: Research and Road Deterioration**". Relatório do TRRL LR 673, Crowthorne.
- HOFF, J. C. (1983), "**A Practical Guide to Box & Jenkins Forecasting**", Lifetime Learning Publications, London.
- KARAN, M. A. et al. (1988), "**Development and Implementation of Alberta's Pavement Information and Needs System**". In: Transportation Research Record 938. National Research Council, Washington, DC.
- LEE, Y.H. & DARTER, M.I. (1994), "**New Predictive Techniques for Pavements**" - In: Transportation Research Record - TRB, nº 1449.
- LEE, Y.H.; MOHSENI, A. & DARTER, M.I. (1993), "**Simplified Pavement Performance Models**" - In: Transportation Research Record - TRB, nº 1397.
- MAJIDZADEH, K.; VEDAIE, B. & KENNEDY, J.C. (1990), "**Pavement Management System to Maximize Pavement Investment and Minimize Cost**". In: Transportation Research Record - TRB, nº 1272.
- McDOWALL, D.; McCLEARY, R.; MEIDINGER, E. E. & HAY, R. A. (1980), "**Interrupted Time Series Analysis for the Social Sciences**", Sage Publications, Beverly Hills, CA.
- MELO, R. A. (1998), "**Avaliadores, Notas e Qualidade de Pavimentos**", São Carlos, Dissertação (Mestrado), 107 pág. Escola de Engenharia de São Carlos/USP.
- MICROCAL (1997), "**ORIGIN 5.0 Owners Manual**", Microcal Software Inc., Northampton, MA.

- MILLS, F. C. (1969), "**Metodos Estadisticos**", Aguilar, SA de Ediciones, Madrid.
- MITCHELL (1997), "**Marisoft Digitizer Application and Manual**", Independent JPEG Group.
- MORETTIN, P. A & TOLOI, C. M. C. (1981), "**Modelos para Previsão de Séries Temporais**", 13º Colóquio Brasileiro de Matemática, Poços de Caldas-MG, Volumes I e II.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (1981), "**Collection and Use of Pavement Condition Data**". In: Transportation Research Board. National Research Council. Washington, D.C..
- O'BRIEN, D.E.; KOHN, S.D. & SHAHIN, M.Y. (1983), "**Prediction of Performance by Using Nondestructive Test Results**." In: Transportation Research Record nº 943.
- QUEIROZ, C.A.V. (1984), "**Modelos de Previsão de Desempenho Para a Gerência de Pavimentos no Brasil**". GEIPOT, Brasília-DF.
- RAUHUT, J.B.; LYTTON, R.L. & DARTER, M.I. (1984), "**Pavement Damage Functions for Cost Allocation: Vol. 1, Damage Functions and LEF; Vol. 2, Description of Detailed Studies; Vol. 3, Flexible Pavement Damage Functions from AASHO Road Test Data**" - FHWA/RD 84/018, 84/019, 84/020.
- RAUHUT, J.B.; LYTTON, R.L.; JORDAHL, P.R. & KENIS, W.J. (1983), "**Damage Functions for Rutting, Fatigue Cracking, and Loss of Serviceability in Flexible Pavements**." - Transportation Research Record - TRB, nº 943.
- SANT'ANNA, J. A. (1997), "**Comportamento de Pesos e Valores de Cargas no Corredor São Paulo-Buenos Aires**", São Carlos, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos-USP.
- SHAHIN, M. Y. & KOHN, S. D. (1979), "**Development of a Pavement Condition Rating Procedure for Roads, Streets, and Parking Lots**", vol. I e II: U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Technical Report M-268.
- SHAHIN, M.Y.; NUNEZ, M.M.; BROTON, M.R.; CARPENTER, S.H. & SAMEH, A. (1987), "**New Techniques for Modeling Pavement Deterioration**". Transportation Research Record - TRB, nº 1123.
- SHRP - STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (1993), "**Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project**". Publication SHRP-P-338. National Research Council, Washington, DC.
- SMITH, H.A.; STEPHANOS, P.J.; RADA, G.R.; SCHWARTZ, C.W. & CASANOVA, L. (1993), "**Development of Delaware Department of Transportation Pavement Management System**". In: Transportation Research Record - TRB, nº 1397.
- STATSOFT (1991), "**STATISTICA – Reference for Statistical Procedures**", Statsoft Inc, Tulsa, OK.
- STEVENSON, J. S. (1981), "**Estatística Aplicada à Administração**", Harper & Row do Brasil, São Paulo-SP.

- WAY, G. B. & EISENBERG, J. (1988), "***Pavement Management System for Arizona Phase II: Verification of Performance Prediction Models and Development of Data Base***". Arizona Department of Transportation.
- WAY, G. B.; EISENBERG, J. & KULKARNI, R. B. (1982), "***Arizona Pavement Management System: Phase 2 - Verification of Performance Prediction Models and Development of Data Base***". In: Transportation Research Record - TRB, nº 846.
- WOLD, H. O. (1938), "***A Study in the Analysis of Stationery Time Series***", Stockholm: Almqvist and Wiksell.