

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ESTUDO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E
MANUTENÇÃO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: UMA
ABORDAGEM DELAY TIME MODELLING**

ARMANDO MUCHANGA

Recife
2016

ARMANDO MUCHANGA

**ESTUDO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE E MANUTENÇÃO EM
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS: UMA ABORDAGEM DELAY TIME
MODELLING**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Pernambuco como parte dos
requisitos para obtenção do título de mestre
em Engenharia de Produção

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de
Almeida Filho

Recife
2016

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves, CRB-4 / 1260

M942e Muchanga, Armando.
Estudo e análise de confiabilidade e manutenção em pavimentos
asfálticos: uma abordagem delay time modelling / Armando Muchanga.
2016.
105 folhas, Il., Equa. Sigl. e, Tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida Filho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2016.
Inclui: Referências e Anexos.

1. Engenharia de Produção. 2. Manutenção preventiva. 3. Políticas de
inspeção. 4. Delay time. 5. Pavimento asfáltico. I. Almeida Filho, Adiel Teixeira
(Orientador). II. Título.

UFPE
658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2016-96

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

ARMANDO MUCHANGA

“Estudo e Análise de Confiabilidade e Manutenção em Pavimentos Asfálticos: Uma
Abordagem Delay Time Modelling”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **ARMANDO MUCHANGA, APROVADO.**

Recife, 01 de Fevereiro de 2016.

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA FILHO, Doutor (UFPE)

Prof. CRISTIANO ALEXANDRE VIRGÍNIO CAVALCANTE, Doutor (UFPE)

Prof. SERGIO EDUARDO GOUVEA DA COSTA, Doutor (PUC-PR/UTFPR)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado a vida e saúde durante os anos de trabalho. À minha família, em particular minha mãe Alegria Francisco Uate, que em todos os momentos, e de todas as formas tem apoiado o meu desenvolvimento acadêmico. Ao meu Orientador, o Professor Adiel Teixeira de Almeida Filho, pelo apoio e atenção dispensada ao longo da realização deste trabalho. Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelo conhecimento adquirido no decorrer do curso. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido durante o curso. A todas as empresas e técnicos de manutenção, envolvidos na coleta de dados de manutenção dos pavimentos da cidade de Recife, por terem me ajudado com seus conhecimentos e informações. Por ultimo, a todos que diretamente ou indiretamente de alguma forma me ajudaram.

RESUMO

O desenvolvimento urbano depende de vários setores, e o mais importante, além de mais caro nos custos de urbanização é o setor de infraestrutura de transporte, responsável pela pavimentação e manutenção das vias. Com o aumento acelerado de veículos que trafegam nas vias, para um departamento de transporte manter uma rede viária urbana sob os níveis de desempenho requeridos ao longo da vida útil do pavimento é necessário que haja um melhor gerenciamento das atividades de manutenção. De todos os tipos de defeitos dos pavimentos, os que mais preocupam os usuários das vias, gestor e os técnicos da manutenção são os buracos. Alinhada a este fato exposto, esta dissertação propõe um modelo Delay Time para determinar o período ótimo de inspeção e manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos urbanos, em particular das vias da cidade de Recife, de modo a minimizar os custos de manutenção. Primeiro são exploradas as abordagens de modelo Delay Time, para analisar a que se adequa aos pavimentos asfáltico. E a abordagem proposta é Delay Time do sistema complexo, sujeito a várias falhas, com inspeção perfeita e taxa de chegada de defeitos homogênea. Os pavimentos são sujeitos a vários tipos de defeitos, mas este trabalho considerou os buracos por serem os defeitos que mais gastam no custo de manutenção. Também é feita uma revisão dos trabalhos que contribuíram para investigação e aplicação do modelo Delay Time. Ainda neste trabalho é apresentado uma revisão das normas dos pavimentos asfáltico, bem como a política de manutenção “Operação Tapa-Buraco” praticada atualmente nas vias da cidade de Recife para tapar os buracos. O modelo proposto mostra se viável e não é sensível quando variam os parâmetros de entrada, os resultados obtidos são fáceis de aplicar se o setor de manutenção de pavimento da cidade de Recife incluir as hipóteses do modelo na “Operação Tapa-Buraco”.

Palavras Chaves: *Manutenção Preventiva, Políticas de Inspeção, Delay Time, Pavimento Asfáltico.*

ABSTRACT

The urban development depends on several sectors, the most important, beyond most expensive, comes from the transport infrastructure sector - that is responsible for paving and maintenance of roads. Due the rapid increase of vehicles on roads, for the transport department to keep an urban road network under the performance levels required it is necessary to invest in a better management of maintenance activities. Among all types of floors of defects, the primary concern to road users, managers and maintenance technicians are the holes. In sum to this stated fact, this dissertation proposes a Delay Time model to determine the optimal period of inspection and preventive maintenance of urban asphalt pavements, particularly for the roads of the city of Recife, in order to minimize maintenance costs. First it was explored the Delay Time model approach to analyse which applies to the asphalt pavements. The proposed approach is Delay Time of complex system, subject to several failures, with perfect inspection and a homogeneous rate of defects arrival. Besides the floors being subject to various types of defects, this work only considers holes as defects that cause more impact on the maintenance cost. It is also made a review of the works that contributed to research and application of Delay Time Models. Also in this work is presented a review of the standards of asphalt pavements, as well as the maintenance policy "Operação Tapa-Buraco", currently practiced in Recife city roads to slap the holes. The proposed model shows that it is viable and is not sensitive when varying input parameters, the results are easy to apply to the Recife city pavement maintenance industry including the model assumptions in "Operação Tapa-Buraco".

Keywords: Preventive Maintenance, Inspection Policies, Delay Time, Asphalt Pavement

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Custo X Confiabilidade	25
Figura 2.2 – Tempo até a falha e seus estados	26
Figura 2.3 – Curva da Banheira	27
Figura 2.4 – Composição dos Custos Envolvidos na Manutenção	30
Figura 2.5 – Estrutura de um Modelo de Manutenção	33
Figura 2.6 – Conceito do Delay Time	34
Figura 2.7 – Inspeção com DTM	35
Figura 2.8 – Processo de falha de um sistema complexo com inspeção imperfeita.....	38
Figura 2.9 – Processo de falha de um sistema com um componente	39
Figura 3.1 – Estrutura do Pavimento	46
Figura 3.2 – Índice de Irregularidade do Pavimento ao longo do tempo	47
Figura 3.3 – Fendas	49
Figura 3.4 – Afundamento	50
Figura 3.5 – Ondulação	50
Figura 3.6 – Escorregamento	51
Figura 3.7 – Exsudação.....	51
Figura 3.8 – Desgaste	52
Figura 3.9 – Buraco	52
Figura 3.10 – Remendo.....	53
Figura 5.1 - Etapas Metodológicas	67
Figura 5.2 – Ilustração dos Buracos.....	70
Figura 5.3 – Formação de Buracos em pavimento asfáltico	71
Figura 5.4 – Definição de Defeito e Falha de um Buraco.....	72
Figura 5.5 – Custo Variável.....	75
Figura 5.6 – Custo por um Metro Quadrado de Buraco.....	75
Figura 6.1 – Extensão da Avenida Caxangá	77
Figura 6.2 – Sequência da Operação Tapa-Buraco.....	79
Figura 6.3 – Dados coletados dos Buracos	80
Figura 6.4 – Dados coletados de Custo de Tapa Buracos	81
Figura 6.5 – Custo Esperado	83
Figura 6.6 – Análise de Sensibilidade do Parâmetro λ	84
Figura 6.7 – Análise de Sensibilidade do Parâmetro C_1	86
Figura 6.7 – Análise de Sensibilidade do Parâmetro C_p	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Trabalhos que contribuíram para modelos de manutenção e inspeção.....	58
Tabela 6.1 – Custo Esperado Por Inspeção	83
Tabela 6.2 – Análise de Sensibilidade do Parâmetro λ	85
Tabela 6.3 – Análise de Sensibilidade do Parâmetro C_I	86
Tabela 6.4 – Análise de Sensibilidade do Parâmetro C_p	97

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1: Disponibilidade	21
Equação 2.2: Distribuição de Probabilidade	26
Equação 2.3: Densidade de Probabilidade	26
Equação 2.4: Confiabilidade	26
Equação 2.5: Taxa de Falha	27
Equação 2.6: Taxa de Falha na Forma Reduzida	27
Equação 2.7: Tempo Médio até a Falha	28
Equação 2.8: Densidade de Probabilidade da Distribuição Exponencial	31
Equação 2.9: Confiabilidade da Distribuição Exponencial	31
Equação 2.10: Taxa de Falha da Distribuição Exponencial	32
Equação 2.11: Valor Médio do Tempo até a Falha da Distribuição Exponencial	32
Equação 2.12: Probabilidade de um Defeito Falhar (Inspeção Perfeita)	36
Equação 2.13: Downtime Esperado do Sistema Complexo (Inspeção Perfeita)	37
Equação 2.14: Custo Esperado do Sistema Complexo (Inspeção Perfeita)	37
Equação 2.15: Número Esperado de Defeitos do Sistema Complexo (Inspeção Imperfeita)	38
Equação 2.16: Número Esperado de Falhas do Sistema Complexo (Inspeção Imperfeita)	38
Equação 2.17: Downtime Esperado do Sistema Complexo (Inspeção Imperfeita).....	38
Equação 2.18: Custo Esperado do Sistema Complexo (Inspeção Imperfeita)	39
Equação 2.19: Custo Esperado de Sistema com Único Componente	40
Equação 2.20: Função de Distribuição do Tempo de Falha	40
Equação 2.21: Custo Esperado de Renovação de Uma Falha	40
Equação 2.22: Custo Esperado de Renovação de Um Defeito.....	41
Equação 2.23: Custo Esperado por uma Inspeção de Sistema com Único Componente	41
Equação 2.24: Custo Esperado por Ciclo de Renovação de Sistema com Único Componente	41
Equação 2.25: Função de Densidade de Tempo até a Falha	41
Equação 2.26: Comprimento do Ciclo Esperado de Sistema com Único Componente	41
Equação 2.27: Custo Esperado de Sistema com Único Componente	41
Equação 2.28: Downtime Esperado de Sistema com Único Componente	42
Equação 2.29: Downtime de Falha no Tempo de Renovação, Taxa de Falha não Homogênea	42
Equação 2.30: Downtime Esperado de Falha, Taxa de Falha não Homogênea	42
Equação 2.31: Downtime Esperado por Ciclo de Renovação, Taxa de Falha não Homogênea	43
Equação 2.32: Comprimento de Ciclo Esperado de uma Falha, Taxa de Falha não Homogênea	43

Equação 2.33: Downtime Esperado, Taxa de Falha não Homogênea.....	43
Equação 2.34: Custo Esperado, Taxa de falha não Homogênea	43
Equação 5.1: Função de Distribuição de Probabilidade do Modelo Proposto	73
Equação 5.2: Probabilidade de um Defeito Falhar	73
Equação 5.3: Probabilidade de um Defeito Falhar, Equação Simplificada 1	74
Equação 5.4: Probabilidade de um Defeito Falhar, Equação Simplificada 2.....	74
Equação 5.5: Custo Esperado do Modelo Proposto	74
Equação 5.6: Custo Variável da Falha	74
Equação 5.7: Custo Variável do Defeito.....	74
Equação 6.1: Determinação do Custo Variável da Falha.....	82
Equação 6.2: Determinação do Custo Variável do Defeito.....	82
Equação 6.3: Custo Esperado Depois da Substituição dos Valores dos Parâmetros.....	82

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNT – Confederação Nacional do Transporte
DNIT – Departamento Nacional de Infra – Estrutura de Transportes
DNER – Departamento Nacional de Estrada de Rodagem
DTM – Delay Time Model (Modelo Delay Time)
EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
ICPF – Índice de Condição do Pavimento Flexível
IES – Índice de Estado de Superfície
IGGE – Índice de Gravidade Global Expedito
IPR – Instituto de Pesquisa Rodoviárias
IRI – International Roughness Index (Índice de Irregularidade de Superfície)
LVC – Levantamento Visual Contínuo
Km – Quilômetro
MTTF – Mean Time To Failure (Tempo médio até a falha)
MTTR – Mean Time To Repair (Tempo médio de reparo)
NBR – Norma Brasileira
TP - Preventive Maintenance (Manutenção Preventiva)
TPM – Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)
PSI – Present Serviceability Rating (Valor de Serventia Atual)
RCM – Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade)
VSA – Valor de Serventia Atual
WEF – World Economic Forum (Fórum Econômico Mundial)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	MANUTENÇÃO	18
2.1.1	Definições	18
2.1.1.1	Item	19
2.1.1.2	Componente	19
2.1.1.3	Sistema	19
2.1.1.4	Defeito	19
2.1.1.5	Falha	20
2.1.1.6	Confiabilidade	20
2.1.1.7	Mantenabilidade	21
2.1.1.8	Disponibilidade	21
2.1.2	Evolução Histórica da Manutenção	22
2.1.3	Tipos de Manutenção	23
2.1.3.1	Manutenção Corretiva	23
2.1.3.2	Manutenção Preventiva	23
2.1.3.3	Manutenção Preditiva	24
2.2	MEDIDAS DE CONFIABILIDADE	24
2.2.1	Tempo até a falha	25
2.2.2	Função de Confiabilidade	26
2.2.3	Taxa de Falha	27
2.2.4	Tempo Médio até a Falha	28
2.3	CUSTO DA MANUTENÇÃO	29
2.4	POLITICA DE MANUTENÇÃO	30
2.5	DISTRIBUIÇÕES DE TEMPOS ATÉ A FALHA	31
2.5.1	Distribuição Exponencial	31
2.6	ABORDAGEM DA MANUTENÇÃO	32
2.7	O MODELO DELAY TIME	34
2.7.1	Tipos de DTM	35
2.7.1.1	Modelo Delay Time para planta complexa	35

2.7.1.2	DTM para Único Componente.....	39
3	O CONTEXTO DA MANUTENÇÃO DE PAVIMENTO	44
3.1	DEFINIÇÃO DO PAVIMENTO	44
3.2	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	45
3.3	DEFEITOS DOS PAVIMENTOS.....	48
3.3.1	Tipo de defeitos	48
3.3.2	Manutenção dos Pavimentos Asfálticos	56
4	REVISÃO DA LITERATURA	58
4.1	POLÍTICA DE INSPEÇÃO	59
4.2	EVOLUÇÃO DO DTM.....	61
4.3	APLICAÇÃO DO DTM	63
5	METODOLOGIA E MODELO PROPOSTO.....	66
5.1	METODOLOGIA	66
5.2	MODELO PROPOSTO	70
5.2.1	O Defeito.....	70
5.2.2	Hipóteses do Modelo	72
5.2.3	Custo Esperado por Inspeção	73
6	ESTUDO DE CASO	76
6.1	OBJETO DO ESTUDO: AVENIDA CAXANGÁ.....	76
6.2	EMPRESA E POLÍTICA DE MANUTENÇÃO DAS VIAS DE RECIFE.....	77
6.2.1	Operação Tapa-Buracos.....	78
6.3	ANÁLISE DE DADOS	80
6.4	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	81
6.5	ANALISE DE SENSIBILIDADE.....	84
6.6	ANÁLISE DE RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO MODELO	88
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
7.1	CONCLUSÕES	90
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
	ANEXO	103

1 INTRODUÇÃO

Despesas de manutenção tendem a crescer em todos os setores de nossa sociedade, apesar dos avanços técnicos. Uma das razões principais é a contínua expansão do nosso estoque de ativos. Todas as estruturas artificiais, como estradas, pontes, edifícios e plantas industriais precisam de manutenção, a fim de manter-se disponível para o uso (DEKKER & SCARF, 1998).

Apesar da destacada predominância do modal rodoviário no deslocamento de bens e pessoas, verifica-se que, em relação à extensão total da malha rodoviária no Brasil, apenas uma parcela dela encontra-se pavimentada. Em alguns casos, oferecendo condições de trafegabilidade com segurança e conforto para os usuários. Em outros, encontra-se em estado crítico, oferecendo risco para os usuários que nelas trafegam e necessitando de intervenções em maior ou menor escala em particular nas vias urbanas.

Para o departamento de transporte manter uma rede viária urbana sob a sua jurisdição nos níveis de desempenho requeridos ao longo da vida útil do pavimento é necessário desenvolver um modelo de otimização da manutenção em longo prazo para minimizar os custos (Zhang & Gao, 2012). Para atender aos preceitos de otimização de custo total de transporte conforme mencionado anteriormente, o pavimento deve dispor da devida habilitação, isto é, estar permanentemente dotado de adequados atributos de natureza estrutural e de natureza funcional. Atributos estes que, para serem mantidos dentro dos níveis desejáveis e admissíveis exigem que o pavimento seja submetido a um contínuo e adequado processo de inspeção e manutenção. Tal processo de manutenção envolve a execução de conjuntos de intervenções diversas.

Neste contexto, o desenvolvimento das diversas técnicas e políticas de manutenção de pavimentos, as quais estabeleçam as regras que venham garantir a melhoria do funcionamento das rodovias com mínimo dos custos possível são desejáveis. Portanto, a política de inspeção e manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos urbano proposta neste trabalho visa à minimização dos custos no setor de transporte.

1.1 JUSTIFICATIVA

O funcionamento eficiente do setor de transporte, com destaque para o modal rodoviário, viabiliza o fluxo contínuo de distribuição de insumos e produtos e, assim, impulsiona a atividade econômica e o desenvolvimento nacional. Isso porque um serviço de transporte de boa qualidade propicia redução de custos e maior flexibilidade e agilidade para os deslocamentos de pessoas e mercadorias, o que eleva o potencial de crescimento do país. Contudo, para que se tenha um desempenho adequado do transporte rodoviário é necessário, além de qualificação do transportador e equipamentos modernos, a disponibilização de infraestrutura adequada em qualidade e quantidade.

A infraestrutura rodoviária antiga e com insuficiente manutenção disponível eleva os custos logísticos, amplia as desigualdades regionais, potencializa a ocorrência de acidentes e, com isso, compromete o desempenho de todos os setores econômicos. Assim, a modernização das rodovias, configura-se não como um objetivo setorial, mas como um projeto de desenvolvimento econômico e social do país.

A má qualidade das rodovias, motivada em parte por uma insuficiente manutenção, oferece riscos a todos os usuários, e principalmente aos que trafegam com veículos de cargas consideradas perigosas. Implica também custos elevados, sobretudo com a operação dos veículos e com a restauração dos pavimentos, o que decorre de um processo de deterioração que requer soluções técnicas mais robustas e onerosas para a reversão deste cenário.

Segundo o índice de competitividade global divulgado por World Economic Forum - WEF em setembro de 2014, a qualidade das rodovias brasileiras encontra-se na 122ª posição de 144 países analisados, atrás de países como o Chile (31ª), Suriname (70ª), Uruguai (90ª), Bolívia (95ª), Peru (102ª) e Argentina (110ª), todos situados na América do Sul (Pesquisa de WEF, 2014).

De acordo com a Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte - CNT em 2014, existem 98475 KM de rodovias pavimentadas por todo Brasil. Em 62,1 % da extensão total pesquisada, foram detectados algum tipo de deficiência no Pavimento, na Sinalização ou na Geometria da Via. E apenas 37,9 % dos trechos (37361 KM) apresentaram condições satisfatórias. Portanto, há problemas em boa parte da malha rodoviária pavimentada, sendo que 62,1% precisam de uma manutenção. No nordeste do Brasil são 27303 KM de rodovias pavimentadas, sendo que 50,8% do pavimento apresenta boas condições e 49,2% precisa de

uma manutenção. No Estado do Pernambuco os 50,4% do pavimento foi classificado como Ótimo e Bom e os 34,3%, 9,1% e 6,2% como Regular, Ruim e Péssimo, isto é, aproximadamente da metade do pavimento precisa de uma manutenção corretiva (Pesquisa da CNT, 2014).

Os fatores importantes a considerar no setor de transporte urbano é o aumento acelerado de veículos que trafegam nas rodovias, aumento de acidentes por causa dos defeitos superficiais do pavimento, aumento de engarrafamento por má qualidade das vias e a manutenção cada vez mais com seus altos custos financeiros, que exigem um melhor gerenciamento das atividades. Todos estes fatores levam os gestores do setor de transportes urbanos a adotar políticas de manutenção na busca da perfeita otimização dos custos.

O pavimento é projetado para durar determinado intervalo de tempo. Durante cada período ou ciclo de vida, o pavimento se inicia em uma condição ótima até alcançar uma condição ruim. Nesse contexto, o estado de conservação da superfície do pavimento é um dos elementos mais facilmente perceptíveis ao usuário da rodovia, pois os defeitos ou as irregularidades nessa superfície afetam o seu conforto e a segurança ao rolamento do tráfego, bem como diminuem a durabilidade dos componentes veiculares.

Portanto, é essencial que os departamentos de transportes urbanos disponham de políticas viáveis de Manutenção que permitam o monitoramento das condições do Pavimento. Este é um dos fatores determinante na busca por um melhor desempenho do setor de transporte no Brasil em particular na cidade de Recife. Este trabalho visa contribuir na elaboração de uma política viável de inspeção e manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos urbanos, com vista a reduzir o custo de manutenção dos Pavimentos.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral propor um modelo *Delay Time Model* (DTM), para auxiliar na tomada de decisões, na gestão e planejamento de inspeção e manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos, buscando o menor custo possível.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais defeitos e falhas dos pavimentos asfálticos, das vias da cidade de Recife;
- Estudar e analisar a política de inspeção, prevenção e correção dos buracos nos pavimentos asfálticos da cidade de Recife;
- Definir um Modelo, para auxiliar na tomada de decisões nas inspeções e manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos urbanos;
- Determinar uma política ótima de inspeção e manutenção preventiva dos Pavimentos asfálticos da cidade de Recife.
- Aplicar os conceitos de DTM para o planejamento de inspeção dos pavimentos asfálticos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é composto de oito capítulos, o primeiro, introdutório propõe uma visão geral sobre o que vai ser desenvolvido pela dissertação, bem como a justificativa e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 faz uma revisão dos conceitos importantes da manutenção e confiabilidade, e definição do tempo de falha e suas principais funções de distribuições de probabilidade, que é matéria necessária para compressão de surgimento dos defeitos. Ainda neste capítulo são dadas os tipos de abordagens do modelo Delay Time (DTM). No capítulo 3 é feita definição e a caracterização do pavimento que é objeto de estudo do trabalho, os tipos de defeitos superficiais dos pavimentos e revisão das normas nacionais de manutenção dos pavimentos.

O capítulo 4, trata da revisão da literatura, neste capítulo é feita uma revisão dos três assuntos que fundamentam o modelo DTM, que é a Política de Inspeção, Evolução e Aplicações do Modelo DTM. Primeiro é feita uma revisão de trabalhos que formalizaram o conceito de Política de Inspeção, depois a revisão de trabalhos que contribuíram na investigação do modelo DTM, bem como as obras que são consideradas pioneiras na definição do modelo, por último a revisão de trabalhos que fazem aplicação do modelo.

No capítulo 5, é apresentada a metodologia e o modelo deste trabalho, ainda no mesmo capítulo são definidos os parâmetros, as variáveis e as hipóteses do modelo proposto. No capítulo 6, é feito o estudo de caso aplicando o modelo proposto, e depois uma análise de sensibilidade do modelo, e por último é definida uma política de inspeção proposta pelo modelo.

No capítulo 7, são discutidos alguns aspectos básicos relacionados com aproximação do modelo DTM ao problema modelado, bem como explicação das limitações do modelo, e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o capítulo 8, compõe-se de todas as referências bibliográficas que foram utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica que fundamente a manutenção e confiabilidade. Inicia-se revisando conceitos ligados à definição de manutenção e confiabilidade, definição do tempo de falha e suas principais funções de distribuições de probabilidade, que é matéria necessária para compressão de surgimento dos defeitos. Por fim os tipos de abordagens do modelo Delay Time, para compressão do modelo proposto no trabalho.

2.1 MANUTENÇÃO

A Manutenção foi formalizada com o início da indústria mecanizada no final do século XIX, sendo então realizada sem organização e planejamento com o início da produção seriada por Henry Ford, surgiu a necessidade de a manutenção ser organizada e ser mais elaborada (TAVARES,1999).

A manutenção evoluiu muito nos últimos tempos, a justificativa para isto deve-se a um grande aumento no número e diversidade de itens físicos (instalações, equipamentos e construções) a serem mantidos. Conforme o aumento na complexidade dos projetos de equipamentos e sistemas produtivos a manutenção continua reagindo crescente conscientização do quanto uma falha de equipamento afeta a segurança e o meio ambiente, ao aumento na conscientização da relação entre manutenção e qualidade do produto e a uma maior pressão para se atingir alta disponibilidade da instalação e conter custos (MOUBRAY, 1997).

2.1.1 Definições

Para Birolini (1999), manutenção envolve diversos aspectos enfocando-a como uma atividade gestora e executora, que visa garantir disponibilidade e confiabilidade de um item físico, de modo que as funções do sistema sejam mantidas no desempenho mínimo esperado, observando a segurança humana e a integridade ambiental.

De acordo com norma NBR 5462/1994 da ABNT o termo manutenção é definido como a *“combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”*.

Para Ferreira (1994), manutenção é *“Ato ou efeito de manter - se as medidas necessárias para a conservação ou a permanência de alguma coisa ou de uma situação”*.

Conforme Tavares (1987) define a manutenção como *“todas as ações necessárias para que um item seja conservado ou restaurado de modo a poder permanecer de acordo com uma condição especificada”*.

Algumas definições dos termos técnicos utilizados em manutenção e que serão frequentemente abordados no desenvolvimento de todo trabalho:

2.1.1.1 Item

“Qualquer parte, componente ou sistema que possa ser considerado individualmente” (NBR 5462/1994 – ABNT).

2.1.1.2 Componente

“É uma parte integrante de um equipamento” (VIANA, 2002).

2.1.1.3 Sistema

“É todo o conjunto de componentes interconectados segundo um projeto predeterminado, de forma a realizar um conjunto de funções de maneira confiável e com bom desempenho” (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

2.1.1.4 Defeito

“Qualquer desvio das características de um item em relação aos seus requisitos” (NBR 5462/1994 – ABNT).

2.1.1.5 Falha

“Falha é o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. É a diminuição total ou parcial da capacidade de uma peça, componente ou máquina de desempenhar a sua função durante um período de tempo, quando o item deverá ser reparado ou substituído. A falha leva o item a um estado de indisponibilidade” (NBR 5462/1994 – ABNT).

- Falha Primária

“É a falha ocasionada pela presença de um componente defeituoso, mas mesmo assim o componente trabalha dentro dos padrões limites de operação” (SCAPIN, 2007).

- Falha do Comando

“É aquela falha que se origina da operação de um componente ou sistema, apresentando um efeito que não atende as expectativas do operador ou processo, mesmo o componente trabalhando dentro dos limites normais do processo” (SCAPIN, 2007).

- Falha secundária

“É a falha que ocorre em um componente ou sistema que está operando fora dos limites de controle estabelecidos”. Em muitos casos estas falhas são oriundas de pressões elevadas ou baixas, variações de temperaturas, falha de manutenção periódica do equipamento, entre outros fatores. As falhas secundárias podem ser classificadas em: *Falhas de propagação*; *Falhas comuns*; *Falhas decorrentes de erro humano*; Falhas em geral, que causam diminuição no desempenho sem afetar os demais componentes (SCAPIN, 2007).

2.1.1.6 Confiabilidade

“Probabilidade de item poder desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado intervalo de tempo” (NBR 5462/1994 – ABNT).

2.1.1.7 Manutenibilidade

“Probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo de tempo determinado, quando a manutenção é feita sob condições estabelecidas usando procedimentos e recursos prescritos” (NBR 5462/1994 – ABNT).

Para Fogliatto & Ribeiro (2009), *“define como sendo a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições preestabelecidas de uso, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e usando recursos e procedimentos padrão”*. A Manutenibilidade é um fator essencial no estabelecimento da disponibilidade de uma unidade.

2.1.1.8 Disponibilidade

“É a capacidade de um item, mediante manutenção apropriada, desempenhar sua função requerida em um determinado instante do tempo ou em um período de tempo predeterminado” (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

O conceito de disponibilidade varia conforme a capacidade de reparo de uma unidade. Em unidades não reparáveis, os conceitos de disponibilidade e confiabilidade se equivalem. Em unidades reparáveis, os possíveis estados da unidade em um tempo t de análise são em funcionamento ou em manutenção (isto é, sofrendo reparo). Nesses casos, costuma-se supor que reparos devolvam a unidade à condição de nova e trabalha-se com um valor médio de disponibilidade para a unidade (ALMEIDA *et al.* 2015). Dado por:

$$A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad 2.1$$

Onde $A(t)$ denota a disponibilidade média da unidade, $MTTF$ é o tempo médio até a falha (ou seja, o tempo médio de funcionamento da unidade) e $MTTR$ é o tempo médio até reparos feitos na unidade.

2.1.2 Evolução Histórica da Manutenção

A evolução histórica da manutenção pode ser dividida aproximadamente em três gerações distintas: A Primeira Geração caracteriza-se pela utilização de equipamentos simples e sobredimensionados para as funções requeridas. Dessa forma, estes equipamentos eram restaurados apenas quando apresentavam defeitos. Devido ao seu sobredimensionamento os defeitos eram minimizados visto que pouco se dependia de seu desempenho (Siqueira, 2005 e Moubray, 1997). Os produtos não tinham controle de qualidade e a manutenção era “quebra e depois conserta”, caracterizando-se pela ausência de técnicas de diagnóstico e de prevenção da falha. Nesse panorama, não havia necessidade de manutenção sistematizada.

Com o final da II Guerra Mundial, o nível de exigência por produtos passou a ser maior. A guerra fria incentivava a indústria bélica á produção de armas além do aumento acelerado dos diversos ramos da indústria. As indústrias passaram a depender cada vez mais das máquinas, que se multiplicaram e modificaram em tipo, quantidade e complexidade. Nesse período registra-se uma onda de escassez de mão-de-obra especializada, decorrente do rápido processo de automação, gerando custos crescentes de correção das falhas. Uma maior disponibilidade e vida útil dos ativos industriais, a um baixo custo, tornaram-se o objetivo básico de avaliação no ambiente industrial (MOUBRAY, 1997).

A partir deste cenário, surgiu um grande esforço científico de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de manutenção preventiva, com foco na minimização dos impactos das falhas no processo produtivo, que caracterizou a segunda geração. Por volta da década de 70 houve o surgimento da Manutenção Produtiva Total (TPM – Total Productive Maintenance), dando origem ao surgimento da Terceira geração.

Na terceira geração verifica-se uma sofisticação da manutenção nunca antes observada, evidenciada pelo surgimento de novas técnicas de predição, bem como o de novas abordagens, tais como o RCM e o TPM (Moubray, 1997). As novas técnicas de manutenção eram suportadas por computadores de grande porte e sistemas de planejamento e controle surgiram nesse período visando um melhor controle das ações de manutenção. Neste sentido, a Terceira Geração evoluiu da incapacidade das técnicas até então utilizadas na Segunda Geração ante as exigências do processo de automação cada vez maior nas indústrias tornando estreitas suas faixas operacionais aumentando assim a importância da manutenção. Com o objetivo então de prever as falhas, foi criada a manutenção preditiva que se utiliza de

técnicas que possam monitorar os equipamentos, seja da forma sensível ou através de instrumentos de medição.

2.1.3 Tipos de Manutenção

Qualquer ativo físico solicitado para realizar uma determinada função estará sujeito a uma variedade de esforços. Estes esforços gerarão fadiga e isto causará a deterioração deste ativo físico reduzindo sua resistência à fadiga. Esta resistência reduzirá-se até um ponto no qual o ativo físico pode não ter mais o desempenho desejado, em outras palavras, ele pode vir a falhar (Moubray, 1997). Portanto, há necessidade de se adotar uma política de Manutenção para evitar as falhas.

2.1.3.1 Manutenção Corretiva

De acordo com a norma brasileira NBR 5462/1994 da ABNT: é “*Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar o item em condições de executar uma função requerida*”. Pane é “*um estado de item em falha*” (VIANA, 2002)

Para Viana (2002), Manutenção Corretiva é a intervenção necessária imediata para evitar graves consequências aos instrumentos de produção, à segurança do trabalhador ou ao meio ambiente, se configura em uma intervenção aleatória, sem definições anteriores.

2.1.3.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva caracteriza-se pelo trabalho sistemático para evitar a ocorrência de falhas procurando a sua prevenção, mantendo um controle contínuo sobre o equipamento. A manutenção preventiva é considerada como o ponto de apoio das atividades de manutenção, envolvendo tarefas sistemáticas tais como: as inspeções, substituição de peças e reformas (PATTON JR, 1983).

De acordo com a norma brasileira NBR 5462/1994 da ABNT, é “*Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação de funcionamento de um item*”.

Viana (2002) classifica esta manutenção como sendo todo serviço de manutenção realizado em máquinas que não estejam em falha, estando com isto em condições operacionais ou em estado de zero defeito.

2.1.3.3 Manutenção Preditiva

Esse tipo de manutenção caracteriza-se pela previsibilidade da deterioração do equipamento, prevenindo falhas por meio do monitoramento dos parâmetros principais, com o equipamento em funcionamento. A manutenção preditiva é a execução da manutenção no momento adequado, antes que o equipamento apresente falha, e tem a finalidade de evitar a falha funcional ou evitar as consequências desta (MOUBRAY, 1997).

De acordo com a norma brasileira NBR 5462/1994 da ABNT, é “*Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva*”.

2.2 MEDIDAS DE CONFIABILIDADE

Conforme já exposto anteriormente, a confiabilidade é frequentemente definida como a probabilidade que um sistema irá executar a sua função específica de modo satisfatório por um período de tempo determinado, sob condições pré-estabelecidas de operação. Dentro desta definição, esta clara a relação da confiabilidade com a falha, a qual julga se até que ponto o sistema está longe de executar sua função satisfatoriamente. Similarmente, com relação as condições, é necessário o entendimento das cargas que o sistema está sujeito e o ambiente dentro do qual o sistema pode operar. Porém, talvez a mais importante variável que a confiabilidade está relacionada é o tempo, e é por esta razão que a maioria dos fenômenos de confiabilidade são entendidos dentro da dimensão do tempo, (CARTER, 1986).

O custo total de confiabilidade deve ser visto numa visão de ciclo de vida do componente, englobando: além dos custos diretamente relacionados ao programa de confiabilidade, os custos associados ao uso de componente. Sob a ótica do custo, o valor ideal de confiabilidade depende do comportamento dos dois aspectos. A Figura 2.1 a seguir mostra os custos de confiabilidade no ciclo de vida, (ALMEIDA & SOUZA, 2001).

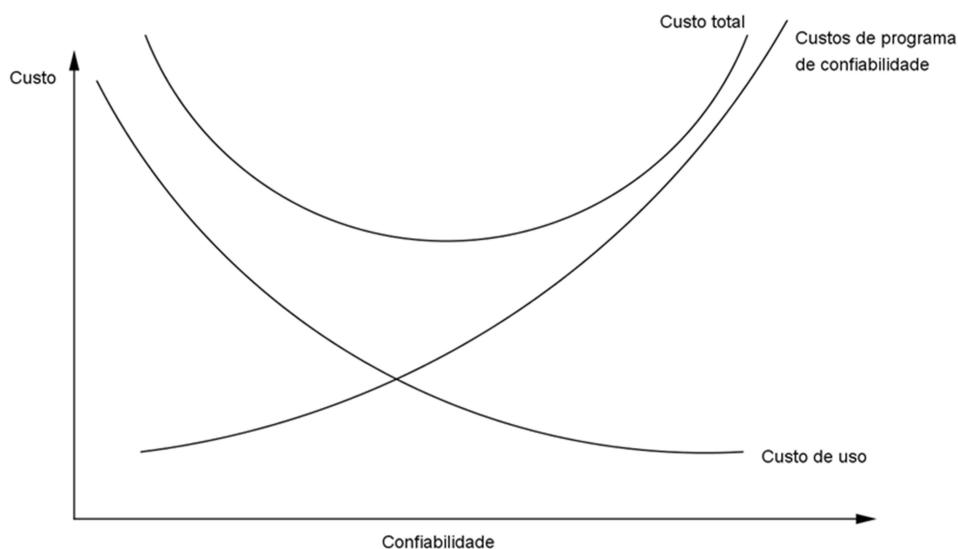


Figura 2.1 – Custo X Confiabilidade

Fonte: Almeida & Souza (2001)

2.2.1 Tempo até a falha

É a “*duração acumulada dos tempos de operação de um item, desde sua colocação em estado de disponibilidade até a ocorrência da falha, ou do instante do restabelecimento funcional até a ocorrência da próxima falha*” (NBR 5462/1994 – ABNT).

Tempo até falha de um item, pode ser entendido como tempo transcorrido desde o momento em que o item é colocado em operação até a sua primeira falha. Convenciona-se $t = 0$ como início da operação do sistema. Por estar sujeito a variações aleatórias, o tempo até a falha é definido como uma variável aleatória, designada por T . O estado do item em um tempo t pode ser descrito por uma variável de estado $X(t)$, que é uma variável aleatória definida por dois estados: $X(t) = 1$, no caso de o item estar operacional no tempo t , e $X(t) = 0$, no caso de o item estar não operacional no tempo t (ALMEIDA *et al.* 2015).

A relação existente entre a variável de estado $X(t)$ e o tempo até a falha T é dada pela Figura 2.2.

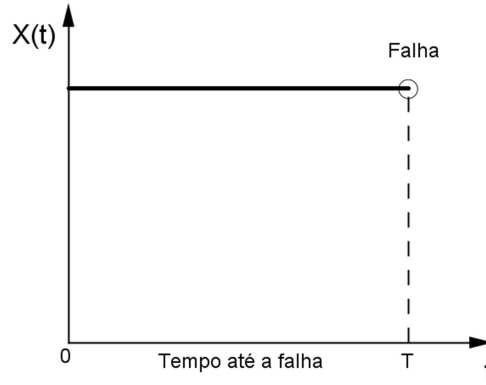


Figura 2.2 – Tempo até a falha e seus estados

Fonte: de Fogliatto & Ribeiro (2009)

Para poder ter uma estimativa da proporção total de itens que falham ao longo do tempo até a falha do ultimo item, recorre-se a função de distribuição acumulada $F(t)$ onde:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du, (t > 0) \quad 2.2$$

E a função de densidade de probabilidade $f(t)$, definida como:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad 2.3$$

2.2.2 Função de Confiabilidade

A confiabilidade de um componente é a probabilidade de poder desempenhar uma função requerida, sob dadas condições, durante um dado tempo t , a função de confiabilidade $R(t)$ é:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u)du = \int_t^{+\infty} f(u)du \quad 2.4$$

Assim, a função de confiabilidade $R(t)$ informa a probabilidade de o componente apresentar sucesso na operação (isto é, ausência de falhas) no intervalo de tempo $(0, t)$ e

ainda estar funcionando no tempo t . A função de confiabilidade $R(t)$ é também denominada função de sobrevivência (ALMEIDA *et al.* 2015).

2.2.3 Taxa de Falha

Na sua forma mais elementar a taxa de falha é a taxa em que cada falha ocorre no tempo. Neste contexto, é importante conhecer a relação existente entre a confiabilidade e taxa de falha, dada pela seguinte expressão (ALMEIDA *et al.* 2015):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad 2.5$$

Sendo que $\lambda(t)$ é a taxa de falha e $f(t)$ função de densidade de probabilidade ou função de distribuição de probabilidade.

No entanto é usual expressar a taxa de falha $\lambda(t)$ como uma proporção da população de equipamentos sobreviventes no instante que a taxa se refere:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{R(t)} \quad 2.6$$

O comportamento da função da taxa de falhas com o tempo é completamente revelador com relação às causas de falha. Qualquer que seja o sistema sem redundância, apresenta invariavelmente as características gerais da *curva da banheira* (ALMEIDA *et al.* 2015).

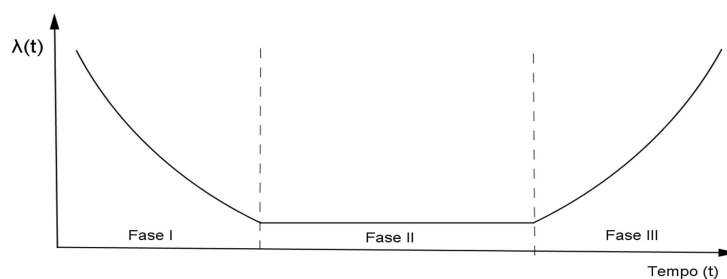


Figura 2.3: Curva da Banheira

Fonte: Almeida *et al.* (2015)

A **fase I** representa a etapa conhecida como fase da Mortalidade Infantil. Nesta etapa, os projetos ou equipamentos ainda se encontram em fase de aperfeiçoamento, o que explica a taxa de falhas decrescente e com uma visível tendência a se estabilizar. Produtos novos, em processo de desenvolvimento, ou aqueles em caráter experimental podem ser exemplificados como estando nesta região da curva. As ações de manutenção para esta etapa estariam fundamentalmente associadas a ajudar no desenvolvimento do projeto, atentando para as questões da Manutenibilidade, ou seja, a capacidade de no futuro a atividade de manutenção ser executada de forma facilitada (ALMEIDA *et al.* 2015).

A **fase II** é a representação de projetos que já foram bem desenvolvidos e apresentam em seu estado atual uma taxa de falhas constante, onde a ocorrência dos eventos (falhas) pode ser atribuída a fatores de natureza aleatória. Nesta fase, também conhecida como vida útil dos equipamentos, as atividades preventivas de manutenção estariam restritas a revisões periódicas, algum tipo de monitoramento ou inspeções para se verificar a condição dos itens e as ações corretivas quando necessárias (ALMEIDA *et al.* 2015).

Por último, a **fase III** mostra os equipamentos chegando ao final de sua vida operacional. É nesta fase, por exemplo, que os problemas devido a um processo de degradação podem se apresentar com maior frequência, e se intensificar, praticamente impondo a utilização uma política de manutenção mais alinhada com a característica crescente apresentada pela taxa de falhas (Almeida *et al.*, 2015). O Modelo Delay Time se adequa muito bem a esta fase, uma vez que nesta etapa, aumenta-se a frequência de ocorrência das falhas na medida em que o tempo vai crescendo.

2.2.4 Tempo Médio até a Falha

O tempo médio até a falha de um componente, designado por *MTTF*, pode ser definido como:

$$MTT \quad (T) = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad 2.7$$

Ou seja, valor esperado da variável T , $E(T)$.

2.3 CUSTO DA MANUTENÇÃO

Se a manutenção é aproveitada eficientemente existe um escopo para melhorar os lucros e produtividade da empresa. Para a manutenção fazer esse melhoramento, ela deve ser reorganizada como parte integral da estratégia de negócio ou equação de força competitiva (HORA, 1987).

Para Pinjala *et al.* (2006), a manutenção tem um papel crucial para alcançar a qualidade superior do produto e custo efetivo das operações. Isso significa que mais atenção é necessária em alguns dos elementos de estratégia de manutenção como modificações na manutenção e políticas de recursos humanos. Com mais modificações no projeto de equipamentos e melhoras contínuas o número de tarefas de manutenção requeridas podem ser reduzidas e também os custos relacionados. Além disso, mais manutenção orientada a equipe envolvendo operadores é crucial para manter a qualidade do produto e reduzir os custos de manutenção. Em outras palavras, existe uma relação entre negócios e estratégias de manutenção.

Tomando a manutenção como premissa para a redução dos custos da produção, deve-se definir a melhor política a ser adotada para a otimização dos custos. Essa análise pode ser observada no gráfico clássico, mostrado na Figura 2.4, que ilustra a relação entre o custo com manutenção preventiva (programada) e o custo com manutenção corretiva. O gráfico mostra que investimentos crescentes em manutenção preventiva reduzem os custos da manutenção corretiva, em consequência, diminuem o custo total da manutenção. Entretanto, o gráfico mostra também que, a partir do ponto ótimo em investimento com manutenção preventiva, mais investimentos trazem poucos benefícios para a redução dos custos da manutenção corretiva e acabam elevando o custo total (ALMEIDA & SOUZA, 2001).

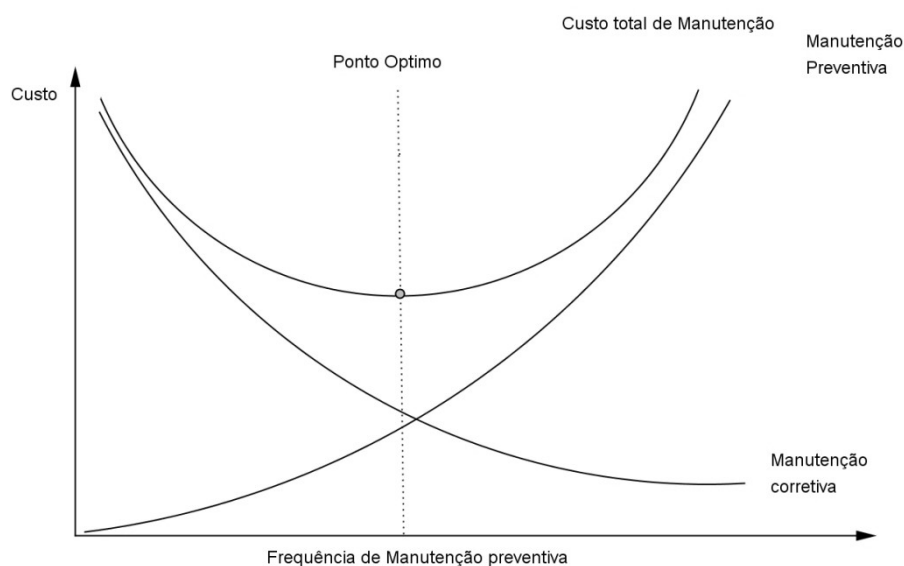


Figura 2.4 – Composição dos Custos Envolvidos na Manutenção

Fonte: de Almeida & Souza (2001)

É muito importante observar, na busca do ponto ótimo, que a política de manutenção a ser adotada deve levar em consideração aspectos como a importância do equipamento para o processo, o custo do equipamento e de sua reposição, as consequências da falha do equipamento no processo, o ritmo de produção e outros fatores que indicam que a política de manutenção não pode ser a mesma para todos os equipamentos, mas deve ser diferenciada para cada um deles, na busca do ponto ótimo entre disponibilidade e custo.

2.4 POLITICA DE MANUTENÇÃO

Política de Manutenção é a “*Descrição das inter-relações entre os escalões de manutenção, os níveis de intervenção e os níveis de manutenção a serem aplicados para a manutenção de um item*” (NBR 5462/1994 – ABNT). A política de manutenção pode ser corretiva, programada (preventiva ou preditiva).

A política de manutenção é um dos elementos mais importantes da gestão de manutenção eficaz. É essencial para a continuidade de operações e uma compreensão clara do programa de gestão de manutenção, independentemente do tamanho de uma organização de manutenção. Normalmente, as organizações de manutenção têm manuais contendo itens como políticas, programas, objetivos, responsabilidades e autoridades de todos os níveis de

supervisão, apresentação de relatórios, métodos úteis e técnicas, e índices de medição de desempenho. Na falta de tal manual, um documento de política de manutenção deve ser desenvolvido com todas as informações essenciais para manutenção (DHILLON, 2002).

2.5 DISTRIBUIÇÕES DE TEMPOS ATÉ A FALHA

As quatro distribuições de probabilidade frequentemente utilizadas para descrever tempos até a falha de componentes e sistemas são: Exponencial, Weibull, Gama, e Lognormal. A distribuição normal, importante na estatística inferencial, encontra pequena aplicabilidade em estudos de confiabilidade. As representações apresentadas para as distribuições aqui abordadas são as mais usadas em estudos de confiabilidade: função de densidade $f(t)$, função de confiabilidade $R(t)$, Taxa de Falha $\lambda(t)$ e tempo médio até falha $MTTF$ (ALMEIDA *et al.*, 2015).

No caso de variável aleatória contínua, a distribuição exponencial é aplicável no caso de taxa de falhas constante, isto é, fase II da curva de banheira. As outras distribuições são aplicáveis nas fases I e II. Para o caso de variável aleatória discreta são aplicáveis principalmente as distribuições de Poisson e a Binomial.

2.5.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é importante em estudos de confiabilidade por ser a única distribuição contínua com taxa de Falha constante, importante neste trabalho.

A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad 2.8$$

A função de confiabilidade é dada por:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad 2.9$$

Taxa de falha dada por:

$$\lambda(t) = \lambda \text{ (constante)} \quad 2.10$$

O valor médio do Tempo até a falha (ou valor esperado):

$$MTTE = (t) = \frac{1}{\lambda} \quad 2.11$$

Para distribuição Weibull, Gama, e Lognormal poderá ser consultadas Almeida *et al.* (2001), Almeida & Souza (2001) e Fogliatto & Ribeiro (2009).

2.6 ABORDAGEM DA MANUTENÇÃO

Apesar da engenharia de manutenção e a manutenção terem o mesmo objetivo, os ambientes sob as quais operam diferem significativamente. Engenharia de manutenção é uma função analítica, assim como ela é deliberada e metódica, enquanto que a manutenção é uma função que deve ser realizada sob circunstâncias normalmente adversas, e seu principal objetivo é restaurar rapidamente o equipamento para o seu estado de prontidão operacional, usando os recursos disponíveis. No entanto, os objetivos que contribuem de engenharia de manutenção incluem: melhorar as operações de manutenção, reduzir a quantidade e frequência de manutenção, reduzir o efeito de complexidade, estabelecer a melhor frequência e extensão da manutenção preventiva, melhorar e assegurar a utilização máxima das instalações de manutenção e melhorar a organização de manutenção, (DHILLON, 2002).

De acordo com Almeida & Souza (2001), uma visualização bem estruturada da manutenção é apresentada na forma de duas abordagens: Matemática e Engenharia.

- *Abordagem Matemática* – consiste em estudos dedicados à otimização de procedimentos, onde os modelos de manutenção são classificados de acordo com três critérios: número de estados (modos de falhas no sistema), observabilidade do estado do sistema, e número de componentes. A figura 2.5 mostra como são classificados esses critérios.

- *Abordagem de Engenharia* – consiste no tratamento de um conjunto satisfatório de procedimentos de manutenção, ou seja, associa – se diretamente à definição das ações contidas nestes procedimentos respondendo o seguinte questionário “o que faz” e “quando”.

Esta abordagem inclui a visão de Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), que pode ser sintetizada em quatro etapas: divisão do sistema, determinação de itens significativos, classificação de falhas e determinação de tarefas de manutenção.

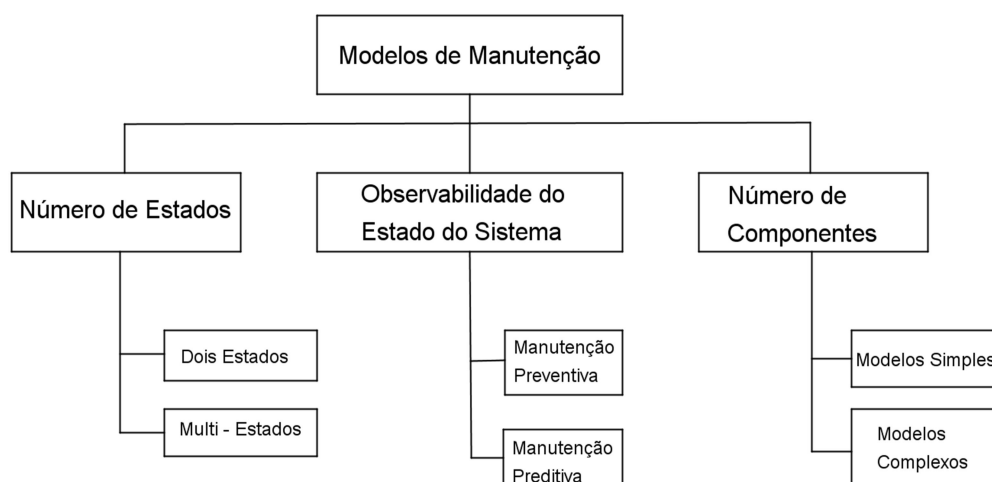


Figura 2.5 – Estrutura de um Modelo de Manutenção

Adaptado de Almeida & Souza (2001)

Quanto ao *número de estados* os modelos podem ser de *dois estados* ou *multi – estados*, a depender da quantidade de modos que as falhas incorram no sistema.

Os modelos quanto à *observabilidade do estado do sistema* podem ser de *manutenção preventiva*, se o estado do sistema for tomado como sendo sempre conhecido, de *manutenção preditiva*, se o estado do sistema não for conhecido com certeza, sendo, portanto, necessário a realização de alguma ação para que este estado seja conhecido. Nos últimos anos, essa manutenção vem sendo bastante explorada nas modelagens, em particular para modelos de inspeção.

Os modelos quanto ao *número de Componentes* são classificados como: *modelos Simples*, onde a modelagem só tem interesse apenas de um componente de falha, e *modelos complexos*, onde a modelagem considera vários componentes de falha do sistema.

2.7 O MODELO DELAY TIME

O Delay Time Modelling é uma ferramenta de modelagem que foi criada para modelar os problemas de inspeção e manutenção, intervenções de manutenção planejada. Este conceito oferece uma estrutura de modelagem facilmente aplicável a uma grande classe de problemas reais de manutenção industrial de bens em geral.

O conceito do Delay Time foi mencionado pela primeira vez por Christer (1982), em um contexto de manutenção predial. Em 1984, o conceito foi aplicado pela primeira vez a um problema de manutenção industrial (Christer & Waller, 1984a). Desde então, uma série de trabalhos de pesquisa apareceu com relação à teoria e aplicações de DTM nos problemas de ativos industriais (CHRISTER, 1999).

O DTM define o processo de falha de um componente como um processo em duas fases. A primeira é a fase de operação normal de novo para o ponto em que um defeito oculto foi identificado. A segunda fase é definida como Delay Time do ponto de identificação de defeito até a falha. É a existência dos defeitos que DTM proporciona a oportunidade para a manutenção preventiva para remover ou corrigir os tais defeitos identificados antes de falhas.

A primeira instância, onde a presença de um defeito pode ser esperado para ser reconhecido por uma inspeção, se tiver ocorrido, é chamado o ponto inicial do defeito “ u ”, e o tempo até a falha do mesmo defeito é chamado Delay Time “ h ”. Segundo Jones *et al.* (2009) “*Delay Time é o período de tempo em que a inspeção ou manutenção pode ser levada a cabo a fim de evitar uma falha total*”.

Na Figura 2.6, pode se observar que se uma inspeção tivesse sido efetuada em h , a presença de um defeito poderia ter sido anotada e ação corretiva aplicada antes da falha. Dado que surgir um defeito, o Delay Time representa uma janela de oportunidade para a prevenção de uma falha.

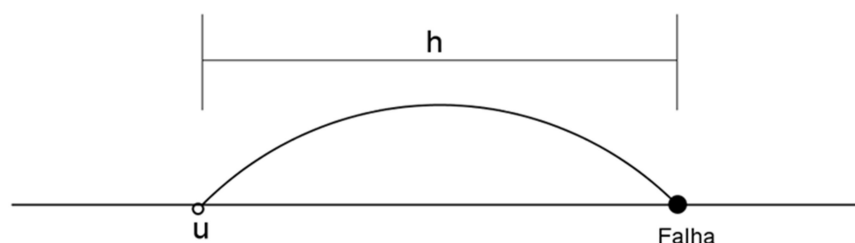


Figura 2.6 - Conceito do Delay Time

Fonte: de Christer (1999)

Um exemplo de DTM, a Figura 2.7 representa um componente com 7 falhas que ocorrem em tempos diferentes, assumindo que as inspeções são perfeitas, ou seja, um defeito é identificado por uma inspeção e é removida por uma manutenção corretiva, então, se tivesse sido efetuada a *inspeção 1*, dois defeitos poderiam ter sido identificados e as sete falhas poderiam ter sido reduzido para 5. Da mesma forma, se as *inspeções 1, 2 e 3* tivessem sido efetuadas, 4 defeitos poderiam ter sido identificados e as 7 falhas poderiam ter reduzido a três. A Figura 2.7 demonstra que, se for possível modelar a forma de surgir um defeito, que é a taxa de chegada de defeito e o Delay Time associado “ h ”, então, o conceito Delay Time pode captar a relação entre a frequência de inspeções e o número de falhas dos componentes.

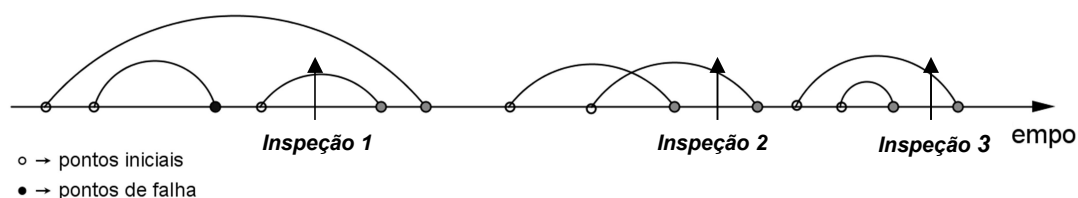


Figura 2.7 – Inspeções com DTM

Adaptado de Christer (1999)

2.7.1 Tipos de DTM

O Modelo Delay Time sofreu algumas modificações desde que foi formalmente definido em 1982. Muitas destas modificações resultaram de sua aplicação a diferentes problemas de manutenção, de acordo com Christer (1999), os dois tipos básicos do DTM são: *O primeiro tipo é aplicado em plantas complexas, sujeito a vários modos de falhas; O segundo tipo é aplicado em plantas de um único componente, sujeito a um modo de falha.*

2.7.1.1 Modelo Delay Time para planta complexa

A planta complexa, ou planta multi – componente é aquela em que surge um grande número de modos de falha. O DTM de planta complexa é dividido em duas partes: *Inspeção perfeita*, ou seja, todos os defeitos são identificados na inspeção, e *Inspeção imperfeita*, ou seja, os defeitos são identificados na inspeção com certa probabilidade menor que um.

- DTM com Inspeção Perfeita

Este é modelo básico de DTM, Christer (1999) apresenta as hipóteses para modelagens deste tipo de modelo:

1. Uma inspeção é realizada a cada unidade de Tempo T , a um custo de C_I , requer um tempo “ d ” (donwtime de inspeção) para ser realizada, onde $d \ll T$;
2. As inspeções são perfeitas em todas as suas formas, ou seja, defeitos presentes serão perfeitamente identificados;
3. Os defeitos identificados serão corrigidos imediatamente, durante o tempo da inspeção;
4. O ponto inicial de surgimento do defeito na planta é assumido como sendo uniformemente distribuído no tempo desde a última inspeção e independente de h ;
5. Os defeitos surgem a uma taxa “ λ ” constante;
6. A função densidade de probabilidade do Delay Time $f(h)$ é conhecida.
7. A planta industrial tem que ter operada por um longo tempo para ser considerada efetivamente em regime permanente;
8. Defeitos e falhas apenas surgem quando a planta está em operação.

Estes pressupostos caracterizam o problema de manutenção mais simples com inspeção não trivial (Christer *et al.*, 1995), e só poderá ser acordado depois de uma cuidadosa análise e investigação da situação específica. A partir de pressupostos 1 à 4, é obvio que o número de falhas do sistema é idêntico e independente em cada intervalo de inspeção, e pode simplesmente estudar o comportamento de um processo de falha do sistema ao longo de um intervalo, ou mesmo no primeiro intervalo $[0, T)$ (WANG, 2008).

Segundo Wang (2008), a função de distribuição de probabilidade do Delay Time $f(h)$, segue uma distribuição exponencial se a taxa de falha λ é constante ao longo de um período de tempo especificado, então:

A probabilidade de um defeito falhar $b(T)$ pode ser expressa como se segue:

$$b(T) = \int_0^T \left(\frac{T-h}{T} \right) f(h) dh \quad 2.12$$

É importante notar que $b(T)$ é independente de taxa de chegada de defeitos λ , mas depende de Delay Time h .

E o Downtime $D(T)$ Esperado

$$D(T) = \frac{d + \lambda T b(T) d_f}{T + d} \quad 2.13$$

Onde d é Downtime (tempo de inatividade) devido à inspeção; λ taxa de chegada de defeito; $b(T)$ é probabilidade de um defeito falhar; d_f Downtime médio para reparação da falha; T o período de inspeção.

Custo $C(T)$ esperado é:

$$C(T) = \frac{T\lambda\{C_f b(T) + C_p[1 - b(T)]\} + C_I}{T + d} \quad 2.14$$

Onde C_f é custo de reparar a falha, C_p custo de reparar um defeito e C_I custo de inspeção. Segundo Jones *et al.* (2009), o tempo e o custo de inspecionar devem ser menor que o tempo e custo de prevenção, e por sua vez estes últimos devem ser menores que tempo e custo de reparar um defeito.

- DTM com Inspeção imperfeita

Para este modelo são considerada todas as hipóteses propostas no modelo anterior, exceto o de controlo perfeito. Assume-se agora que, se um defeito está presente num sistema, então há uma probabilidade “ r ” que o defeito pode ser identificado (Wang, 2008). Isto implica que existe uma probabilidade “ $1 - r$ ” que o defeito será despercebido. Na Figura 2.8 descreve um processo de falha de um sistema multi – componente, submetido a três inspeções, onde

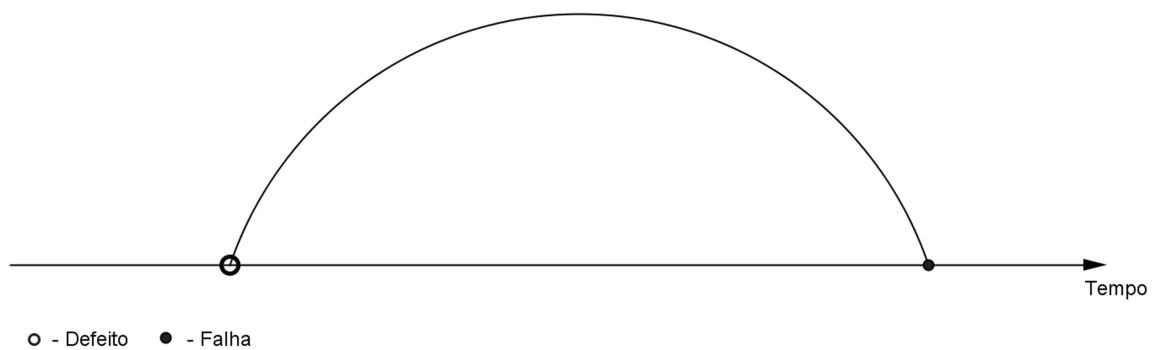
Onde d_p é downtime médio para se reparar um defeito.

E o Custo $C(T)$ Esperado

$$C(T) = \frac{C_f EN_f(T) + C_p EN_p(T) + C_l}{T} \quad 2.18$$

2.7.1.2 DTM para Único Componente

A maioria dos aplicativos de DTM é para sistemas complexos sujeitos a modos de falha independentes, mas há itens de plantas que podem ter um único modo de falha dominante, e podem ser em alguns casos, substituídos ou reparados em caso de falha (Wang, 2008). E a principal diferença em comparação com um sistema multi – componente é que sistema com único componente está sujeito a um único modo de falha, e a única ação de manutenção é a renovação de todo o sistema, quer por uma substituição completa ou um tipo de renovação por reparação. Isto implica que, em qualquer tempo, apenas um defeito ou falha dominante pode existir. A Figura 2.9 mostra um exemplo de processo de falha de um sistema com único componente.



*Figura 2.9 – Processo de falha de um sistema com um componente
Adaptado de Wang (2008)*

- DTM com taxa de falha homogênea

De acordo com Wang (2008), pode ser estabelecidas as seguintes Hipóteses para este tipo de Delay Time:

1. As inspeções são perfeitas;
2. Os defeitos identificados serão corrigidos imediatamente, durante o tempo da inspeção;
3. O ponto inicial de surgimento do defeito aleatório “ U ” tem uma função de densidade de probabilidade $g(u)$;
4. Os defeitos surgem a uma taxa “ λ ” constante;
5. O componente defeituoso identificado numa inspeção será renovado ou por uma reparação ou substituição a um custo C_p médio e Downtime d_p .

Baker & Wang (1991, 1993) e Wang (2008), mostram detalhadamente como calcular o custo esperado por ciclo de renovação do sistema:

$$C(T) = \frac{E(CC)}{E(CL)} \quad 2.19$$

Onde CC é o custo do ciclo de renovação, CL é a duração do ciclo de renovação que é o intervalo entre duas renovações consecutivas, $E(CC)$ custo esperado por ciclo de renovação e $E(CL)$ comprimento do ciclo esperado. Pode haver dois ciclos de renovação diferentes do sistema, a renovação depois da falha e renovação depois do defeito.

A função de distribuição acumulada $P(X < T)$ do tempo de falha de um sistema qualquer, quando não há uma intervenção preventiva, depende das funções densidades de probabilidade $g(u)$ e $f(h)$, onde, para um único intervalo $[0, T)$ pode ser calculada por:

$$P(X < T) = \int_0^T g(u)F(T - u)du \quad 2.20$$

Onde $X \in [0, T)$

E o custo esperado de renovação depois de uma falha identificada é dado por:

$$E(C_f) = C_f P(X < T) = C_f \int_0^T g(u)F(T-u)du \quad 2.21$$

E o custo esperado de renovação depois de um defeito identificado é dado por:

$$E(C_p) = (C_p + C_l)P(U < T \cap X \geq T) = (C_p + C_l) \int_0^T g(u)[1 - F(T-u)]du \quad 2.22$$

E o custo esperado por uma inspeção é dado por:

$$E(C_l) = C_l(T \leq U) = C_l \int_T^\infty g(u)F(T-u)du \quad 2.23$$

E o custo esperado por ciclo de renovação é dada pela Equação.

$$E(CC) = E(C_f) + E(C_p) + E(C_l) \quad 2.24$$

Se a função de densidade $p(t)$ de tempo até a falha é determinada por:

$$p(t) = \frac{dP(X \leq t)}{dt} = \int_0^t g(u)f(t-u)du \quad 2.25$$

Então, o comprimento do ciclo Esperado é dado pela expressão:

$$E(CL) = \int_0^T t \int_0^t g(u)f(t-u)dudt + T(1 - \int_0^T g(u)F(T-u)du) \quad 2.26$$

Finalmente, o custo esperado por unidade de tempo é dada por:

$$C(T) = \frac{C_f \int_0^T g(u)F(T-u)du + (C_p + C_l) \int_0^T g(u)[1 - F(T-u)]du + C_l \int_T^\infty g(u)F(T-u)du}{\int_0^T t \int_0^t g(u)f(t-u)dudt + T(1 - \int_0^T g(u)F(T-u)du)} \quad 2.27$$

O Downtime esperado $D(T)$,

$$D(T) =$$

$$\frac{d_f \int_0^T g(u)F(T-u)du + (d_p + d) \int_0^T g(u)[1 - F(T-u)]du + d \int_T^\infty g(u)F(T-u)du}{\int_0^T t \int_0^t g(u)f(t-u)dudt + T(1 - \int_0^T g(u)F(T-u)du)} \quad 2.28$$

- DTM com taxa de falha não homogênea

Se $g(u)$ não for distribuído exponencialmente, então podemos assumir que qualquer inspeção vai renovar o sistema, a não ser que um defeito seja identificado em uma inspeção e o sistema seja substituído ou reparado como nova condição. Neste caso, um ciclo de renovação pode se estender por vários intervalos de inspeção. Então, o downtime esperado devido a uma falha no tempo de renovação X , onde $X \in [(1-i)T, iT]$, com inspeção perfeita é dado por:

$$E_i(d_f) = [(i-1)d + d_f] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u)F(iT-u)du \quad 2.29$$

Onde $(I-i)$ quantidade de inspeções realizadas, que não foram identificados nenhum defeito.

Na Equação 2.29 apenas é uma das possibilidades de que uma falha pode estar em um intervalo qualquer inspecionado, então, para todos os intervalos possíveis de i , onde $i \in [1, \infty)$ a Equação 2.29 é dada pela Equação 2.30:

$$E(d_f) = \sum_{i=1}^{\infty} [(i-1)d + d_f] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u)F(iT-u)du \quad 2.30$$

E o downtime esperado por ciclo de renovação.

$$E(CD) = \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ [(i-1)d + d_p] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) du + [d_f - d_p] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) F(iT - u) du \right\} \quad 2.31$$

E o comprimento do ciclo esperado é dado por:

$$E(CL) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} t \int_{(i-1)T}^t g(u) f(t-u) du dt + iT \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) [1 - F(iT - u)] du \quad 2.32$$

Por ultimo, o Downtime esperado por unidade de tempo é igual à:

$$D(T) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ [(i-1)d + d_p] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) du + [d_f - d_p] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) F(iT - u) du \right\}}{\sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} t \int_{(i-1)T}^t g(u) f(t-u) du dt + iT \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) [1 - F(iT - u)] du} \quad 2.33$$

Se a função objetivo é o Custo $C(T)$ esperado, obtém se substituindo na Equação 2.33 os paramentos de downtime pelos paramentos de custo correspondentes, isto é:

$$C(T) = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ [(i-1)C_I + C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) du + [C_f - C_p] \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) F(iT - u) du \right\}}{\sum_{i=1}^{\infty} \int_{(i-1)T}^{iT} t \int_{(i-1)T}^t g(u) f(t-u) du dt + iT \int_{(i-1)T}^{iT} g(u) [1 - F(iT - u)] du} \quad 2.34$$

3 O CONTEXTO DA MANUTENÇÃO DE PAVIMENTO

O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas, e proporcionar aos usuários conforto ao rolamento e segurança. Uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que é construída sobre o subleito para suportar as cargas dos veículos de forma a distribuir as solicitações às suas diversas camadas e ao subleito, limitando as tensões e as deformações de forma a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo. Portanto, para manter os pavimentos durante sua vida útil precisam de uma manutenção constante, por isso, neste capítulo tem como objetivo revisão das normas e manuais que caracteriza os pavimentos e seus defeitos, que abrem uma oportunidade para uma manutenção programada ou corretiva.

3.1 DEFINIÇÃO DO PAVIMENTO

De acordo com a norma NBR 7207/82 o **Pavimento** é “*Superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito (infraestrutura ou terreno de fundação) a qual é designada de subleito*”.

O Pavimento, também pode ser visto como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construído sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCC et al., 2006).

Segundo a Pesquisa CNT de Rodovias (2014), a história do transporte rodoviário brasileiro, utilizando rodovias pavimentadas, teve início no ano de 1861 com a inauguração da primeira estrada de rodagem do Brasil, intitulada Estrada União Indústria, ligando o estado do Rio de Janeiro ao de Minas Gerais. Em meados dos anos 1940 as rodovias brasileiras pavimentadas contavam com singelos 423 KM entre rodovias federais e estaduais. Com o Decreto-Lei nº 8.463/1945, conferia-se autonomia técnica e financeira ao Departamento

Nacional de Estradas de Rodagem - DNER, a Lei Áurea do rodoviarismo brasileiro. Como consequência, impulsionou-se o crescimento da malha rodoviária brasileira, que contava em 1950 com 968 Km - o dobro do ano de 1945. A partir daí, houve um grande crescimento das rodovias nas décadas seguintes, ocasionando a expansão do modal.

Desde então, o modal rodoviário vem liderando a matriz de transportes no Brasil e, ao longo dos anos, tem desempenhado o importante papel de contribuir para o crescimento da nação – permitindo o desenvolvimento econômico e social – e de fazer a integração entre os demais modais de transporte.

3.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

O pavimento rodoviário é classificado em três tipos: **Rígidos** (pavimentos de concreto de “cimento Portland” ou Concreto-Cimento), **Semi-Rígidos** e **flexíveis** (pavimentos asfálticos), (NORMA NBR 7207/82).

- **Pavimentos Rígidos** ou **Concreto-Cimento** – são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de “cimento Portland”. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço. É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos, como mostra a Figura 3.1(a).

O *Cimento de Portland* é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de “Clinker Portland” ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos. Clinker Portland é produto constituído em sua parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas (NORMA DNER 036/95).

- **Pavimentos Semi-Rígidos** - caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias, como por exemplo, uma camada de solo cimento, revestida por uma camada asfáltica.

- **Pavimentos Flexíveis** ou **asfálticos** – são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes *asfálticos*. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, Figura 3.1(b). O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de binder. Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros.

O **asfalto** utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provem da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável a água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e água (BERNUCCI *et al*, 2006).

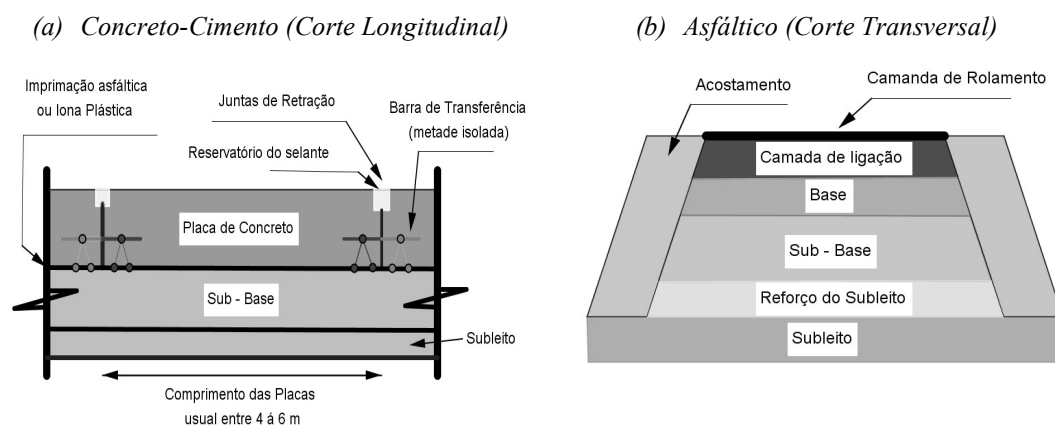


Figura 3.1 – Estrutura do Pavimento

Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

A capacidade que um pavimento tem de proporcionar um determinado nível de desempenho funcional é intitulada de **Serventia do Pavimento**, cujo respectivo processo de aferição pode ser efetivado através de *Avaliações Subjetivas* e ou de *Avaliações Objetivas*.

A *Avaliação Subjetiva* da Serventia envolve a participação de grupo de indivíduos identificados com a Rodovia e que são previamente orientados, (NORMA DNIT 009/2003-PRO).

A *Avaliação Objetiva* da Serventia é calculada analiticamente, com base no conhecimento dos valores de vários parâmetros representativos das condições de superfície do pavimento, em correspondência com tais parâmetros, existem Índices usados para a determinação da serventia, que estão correlacionados entre si, (NORMA DNIT 006/2003-PRO).

Entre os vários índices existentes, podem ser mencionados alguns: Present Serviceability Rating (PSI), Valor de Serventia Atual (VSA), Levantamento Visual Contínuo (LVC), Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE), Índice de Estado de Superfície (IES), Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) e International Roughness Index (IRI) (Índice de Irregularidade de Superfície). Este último Índice é o mais frequentemente, utilizado no Brasil, conhecido como Irregularidade Longitudinal de Pavimento ou simplesmente Irregularidade.

A *Irregularidade Longitudinal (IRI)* é definida pela norma DNER-PRO 164/94 como, “conjunto dos desvios da superfície do pavimento em relação a um plano de referência, desvios estes que, entre vários outros inconvenientes, afetam a qualidade do rolamento e a ação dinâmica das cargas sobre a via”, para mais detalhes poderá ser consultada também as normas: DNER-ES 173/86, DNER-PRO 182/94 e DNER-PRO 229/94.

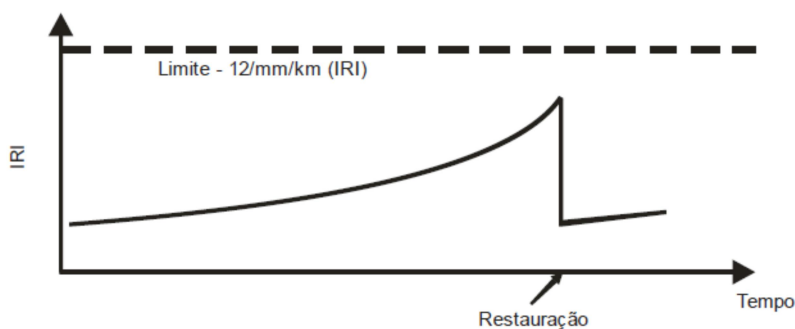


Figura 3.2 – Índice de Irregularidade do Pavimento ao longo do tempo

Fonte: Manual DNIT/IPR – 720 (2006)

3.3 DEFEITOS DOS PAVIMENTOS

Defeitos dos Pavimentos é “*anomalia observada no pavimento, decorrente de problemas na fundação, de má execução ou do uso do pavimento*” (NORMA DNIT 061/2004-TER).

A condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante dos processos associados ao meio ambiente e ao seu uso continuado pelo tráfego. A avaliação desta condição é possível por meio do conhecimento de diversos parâmetros de referência, já normalizados, que permitem a determinação das: condições de superfície, condições estruturais, condições de rugosidade longitudinais, avaliação das solicitações do tráfego, condições de aderência pneu-pavimento.

As condições de superfície dos pavimentos Flexíveis e Semi-Flexíveis são avaliadas pelas seguintes Normas: DNIT 005/2003-TER, DNIT 006/2003-PRO, DNIT 007/2003-PRO, DNIT 008/2003-PRO, DNIT 009/2003-PRO. E para superfícies dos pavimentos Rígidos pelas normas: DNIT 060/2004-PRO, DNIT 061/2004-TER, DNIT 062/2004-PRO, DNIT 063/2004-PRO, DNIT 067/2004-ES.

Defeitos de superfície podem aparecer precocemente (devido a erros ou inadequações) ou a médio ou longo prazo (devido à utilização pelo tráfego e efeitos das intempéries). Entre os erros ou inadequações que levam à redução da vida de projeto, destacam-se os seguintes fatores, agindo separada ou conjuntamente: erros de projeto; erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de materiais; erros ou inadequações construtivas; erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção. Os erros de projeto decorrem de diferentes fatores, muitos comumente relacionados à dificuldade de prever o tráfego real que atuará no período de projeto. Essa dificuldade advém da ausência de dados de tráfego local ou da falta de planejamento estratégico regional, o que leva ao desconhecimento das taxas de crescimento real (BERNUCCI *et al.*, 2006).

3.3.1 Tipo de defeitos

Os defeitos dos pavimentos são os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos que podem ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada pelas normas. A classificação dos defeitos no pavimento é feita de acordo com o tipo do

pavimento: *Defeitos nos pavimentos flexíveis e Semi - Rígidos, Defeitos nos pavimentos Rígidos.*

1. **Defeitos dos pavimentos flexíveis e Semi- Rígidos (Norma DNIT 006/2003-TER)**

- *Fenda* - Qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que conduza a aberturas de menor porte (Fissura) ou maior porte (Trinca), apresentando-se sob diversas formas, Figura 3.3.



Figura 3.3 – Fendas

Fonte: Bernucci et al., (2006)

- *Afundamento* - Deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de solevamento, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento “plástico” ou de “consolidação”, Figura 3.4.



Figura 3.4 – Afundamento

Fonte: Bernucci et al. (2006)

- *Ondulação ou Corrugação* - Deformação caracterizada por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento, Figura 3.5.



Figura 3.5 – Ondulação

Fonte: Bernucci et al. (2006)

- *Escorregamento* - Deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua, Figura 3.6.



Figura 3.6 – Escorregamento

Fonte: Bernucci et al. (2006)

- *Exsudação* - Excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento, Figura 3.7.



Figura 3.7 – Exsudação

Fonte: Bernucci et al. (2006)

- *Desgaste* - Efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego, Figura 3.8.



Figura 3.8 – Desgaste

Fonte: Bernucci et al. (2006)

- *Panela ou buraco* - Cavidade que se forma no revestimento por diversas causas (inclusive por falta de aderência entre camadas superpostas, causando o deslocamento das camadas), podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas, Figura 3.9.



Figura 3.9 – Buraco

Fonte: Bernucci et al. (2006)

- *Remendo Trincado* - Panela preenchida com uma ou mais camadas de pavimento na operação denominada de “tapa-buraco” Figura 3.10.



Figura 3.10 – Remendo Trincado

Fonte: Bernucci et al. (2006)

2. Defeitos nos pavimentos Rígidos (Norma DNIT 061/2004-TER)

- *Alçamento de placas* - Desnívelamento das placas nas juntas ou nas fissuras transversais e eventualmente, na proximidade de canaletas de drenagens ou de intervenções feitas no pavimento.
- *Fissura de canto* - É a fissura que intercepta as juntas a uma distância menor ou igual à metade do comprimento das bordas ou juntas do pavimento (longitudinal e transversal), medindo-se a partir do seu canto. Esta fissura geralmente atinge toda a espessura da placa.
- *Placa dividida* - É a placa que apresenta fissuras dividindo-a em quatro ou mais partes.
- *Escalonamento ou degrau nas juntas* - Caracteriza-se pela ocorrência de deslocamentos verticais diferenciados e permanentes entre uma placa e outra adjacente, na região da junta.

- *Falha na selagem das juntas* - É qualquer avaria no material selante que possibilite o acúmulo de material incompressível na junta ou que permita a infiltração de água.
- *Desnível pavimento - acostamento* - É o degrau formado entre o acostamento e a borda do pavimento, geralmente acompanhado de uma separação dessas bordas.
- *Fissuras lineares* - São fissuras que atingem toda a espessura da placa de concreto, dividindo-a em duas ou três partes. Quando as fissuras dividem a placa em quatro ou mais partes, o defeito é denominado de “placa dividida”.
- *Grandes reparos* - Entende-se como "grande reparo" uma área do pavimento original maior que 0,45 metro quadrado, que foi removida e posteriormente preenchida com um material de enchimento.
- *Pequenos reparos* - Entende-se como "pequeno reparo" uma área do pavimento original menor ou igual a 0,45 metro quadrado, que foi removida e posteriormente preenchida com um material de enchimento.
- *Desgaste superficial* - Caracteriza-se pelo descolamento da argamassa superficial, fazendo com que os agregados aflorem na superfície do pavimento, e com o tempo fiquem com a sua superfície polida.
- *Bombeamento* - Consiste na expulsão de finos plásticos existentes no solo de fundação do pavimento, através das juntas, bordas ou trincas, quando da passagem das cargas solicitantes. Os finos bombeados tem a forma de uma lama fluida, sendo identificados pela presença de manchas terrosas ao longo das juntas, bordas ou trincas.
- *Quebras localizadas* - São áreas das placas que se mostram trincadas e partidas em pequenos pedaços, tendo formas variadas, situando-se geralmente entre uma

trinca e uma junta ou entre duas trincas próximas entre si (em torno de 1,5 metro).

- *Passagem de nível* - São defeitos que ocorrem em passagens de nível, consistindo de depressões ou elevações próximas aos trilhos.
- *Fissuras superficiais (rendilhado) e escamação* - As fissuras superficiais (rendilhado) são fissuras capilares que ocorrem apenas na superfície da placa, tendo profundidade entre 6 e 13 milímetros, que apresentam a tendência de se interceptarem, formando ângulos de 120 graus. A escamação caracteriza-se pelo descolamento da camada superficial fissurada, podendo no entanto, ser proveniente de outros defeitos, tal como o desgaste superficial.
- *Fissuras de retração plástica* - São fissuras pouco profundas (superficiais), de pequena abertura (inferior a 0,5 milímetro) e de comprimento limitado. Sua incidência costuma ser aleatória e elas se desenvolvem formando ângulo de 45 a 60 graus, com o eixo longitudinal da placa.
- *Esborcinamento ou quebra de canto* - São quebras que aparecem nos cantos das placas, tendo forma de cunha, que ocorrem em uma distância não superior a 60 centímetros do canto. Este defeito difere da fissura de canto, pelo fato de interceptar a junta num determinado ângulo (quebra em cunha), ao passo que a fissura de canto ocorre verticalmente em toda a espessura da placa.
- *Esborcinamento de juntas* - O esborcinamento das juntas se caracteriza pela quebra das bordas da placa de concreto (quebra em cunha) nas juntas, com o comprimento máximo de 60 centímetro, não atingindo toda a espessura da placa.
- *Placa “bailarina”* - É a placa cuja movimentação vertical é visível sob a ação do tráfego, principalmente na região das juntas.

- *Assentamento* - Caracteriza-se pelo afundamento do pavimento, criando ondulações superficiais de grande extensão, podendo ocorrer que o pavimento permaneça íntegro.
- *Buracos* - São reentrâncias côncavas observadas na superfície da placa, provocadas pela perda de concreto no local, apresentando área e profundidade bem definidas.

3.3.2 Manutenção dos Pavimentos Asfálticos

Compreende um processo sistemático a que, de forma contínua, deve ser submetido um Pavimento, no sentido de que está, de conformidade com suas funções e magnitude de tráfego, venha a oferecer ao usuário, permanentemente, um tráfego econômico, confortável e seguro, em consonância com competentes preceitos de otimização técnico-econômica do Custo Total de Transporte. A manutenção se consubstancia através de ações sistemáticas e programadas que devem ter lugar diante de condicionamentos cronológicos e/ou da ocorrência de eventos supervenientes (MANUAL DNIT/IPR – 720, 2006).

A manutenção de um pavimento asfáltico não deve ser realizada tão-somente como correção funcional ou estrutural e próxima ao limite de aceitabilidade. É aconselhável um plano estratégico de intervenções periódicas, envolvendo também manutenção preventiva, de modo a garantir um retardamento do decréscimo das condições de superfície. Essas técnicas envolvem às vezes uma simples selagem de trincas ou execução de camadas asfálticas delgadas, tapa buracos, etc. Serviços periódicos de conservação devem ser sempre realizados envolvendo técnicas reparadoras em locais específicos, como limpeza e preservação do sistema de drenagem, dos acostamentos e das áreas lindeiras à estrada.

O estabelecimento das necessidades de manutenção de uma determinada via consiste na identificação das medidas de conservação ou de restauração de menor custo que seja suficiente para colocar o pavimento em condições funcionais adequadas ou aceitáveis e de modo a que essas condições se mantenham durante um período da vida útil do pavimento asfáltico. Para tanto, é preciso elaborar o diagnóstico do pavimento, ou seja, esclarecer os mecanismos através dos quais a sua deterioração vem se processando ao longo do tempo. É

através desse diagnóstico que se podem seleccionar as medidas de manutenção capazes de não apenas solucionar as deficiências funcionais, mas também de representarem um investimento economicamente eficaz.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Manutenção, como um sistema, desempenha um papel fundamental na redução de custos, minimizando o tempo de inatividade, melhorando a qualidade, aumentando a produtividade e fornecer equipamentos confiáveis, como resultado atingir metas e objetivos organizacionais (Bashiri, Badr & Hejazi, 2011). Vários modelos têm sido utilizados para determinar as políticas ótimas para problemas de planejamento e gestão da manutenção. Estes incluem programação dinâmica determinística e estocástica (Csenki, 2007; Emami-Mehrgani *et al.*, 2016; Kuo & Ke, 2016), Heurísticas (Gan *et al.*, 2015), Metodologia Multicritério de Apoio a Decisão (Ferreira, Cavalcante & Almeida, 2007; Baker, 2007; Brito & Almeida, 2007; Bashiri, Badr & Hejazi, 2011), Programação em Redes (Brovarnyi, 2011). Este capítulo tem a finalidade de dar uma revisão dos trabalhos que contribuíram para introdução, desenvolvimento e aplicação do modelo DTM, proposto neste trabalho. Alguns exemplos de trabalhos que contribuíram para modelos de manutenção e introdução, evolução, aplicação do modelo DTM podem ser resumidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Trabalhos que contribuíram para modelos de manutenção e inspeção

	Trabalhos	Contribuição
Modelos de Manutenção	Brito & Almeida (2007), Ferreira, Cavalcante & Almeida (2007), Baker (2007), Csenki (2007), Brovarnyi (2011), Bashiri, Badr & Hejazi (2011), Gan <i>et al.</i> (2015) Feng <i>et al.</i> (2015), Wenbin, Zhao & Peng (2014), Sheu <i>et al.</i> (2015), Emami-Mehrgani <i>et al.</i> (2016), Kuo & Ke (2016)	Aplicaram os modelos matemáticos para determinar uma política ótima de manutenção.
Introdução da política de inspeção	Barlow <i>et al.</i> (1963) e Barlow & Proschan (1965)	Definiram procedimentos básicos para realização de inspeção
Desenvolvimento da política de inspeção	Munford & Shahani (1972)	Desenvolveram uma política ótima de inspeção para a detecção de falhas em sistemas
	Munford & Shahani (1973)	Fizeram aplicação do modelo desenvolvido no trabalho Munford & Shahani (1972), onde, o tempo para a falha, foi descrito por uma distribuição weibull.
Introdução do DTM	Christer (1982), Christer & Waller (1984a), Christer & Waller (1984b)	Formalização de DTM em contexto predial e industrial

Evolução de DTM	Christer (1992), Baker & Wang (1991 e 1993), Christer (1999), Pellegrin (1992) (2007), Wang (2008 e 2011). Wang <i>et al.</i> (2011).	Desenvolvem o modelo DTM para uma planta com único componente de falha para inspeção perfeita e imperfeita
	Okumura <i>et al.</i> (1996), Okumura (1997), Zhao <i>et al.</i>	Desenvolveram um método para determinar os pontos de inspeção de tempo discretos de um sistema de único componente de deterioração.
	Christer & Wang (1995), Baker <i>et al.</i> (1997), Christer & Lee (2000).	Desenvolveram o modelo DTM para inspeção de substituição para um sistema complexo.
	Christer & Wang (1995), Christer <i>et al.</i> (2000), Desa e Christer (2001), Jia & Christer (2003), Jones <i>et al.</i> (2009), Wang (2008 e 2010), Lv & Wang (2011), Wang (2012).	Desenvolvem o modelo DTM para uma planta complexa para inspeção perfeita e imperfeita.
Aplicação do DTM	Christer & Waller (1984b), Desa & Christer (2001), Jia & Christer (2002)	Modelagem dos processos operacionais de frotas de veículos
	Akbaror, Christer & Wang (2008), Wang (2009a), Jones <i>et al.</i> (2009), Werbińska-Wojciechowska & Zając (2015)	Modelagem do desempenho dos sistemas de produção
	Pillay <i>et al.</i> (2001),	Modelagem de equipamentos de pesca
	Tang <i>et al.</i> (2015)	Aplicado na indústria de perfuração de petróleo e gás
	Lopes, Cavalcante & Alencar (2015)	Aplicado na empresa de alugue de equipamentos de construção
Trabalhos Recentes do DTM	Flage (2014), Van Oosterom <i>et al.</i> (2014), Lopes, Cavalcante & Alencar (2015), Tang <i>et al.</i> (2015).	

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

4.1 POLÍTICA DE INSPEÇÃO

As políticas de manutenção têm sido extensivamente estudadas na literatura, por exemplo, os trabalhos de Almeida, Ferreira & Cavalcante (2015), Feng *et al.* (2015), Wenbin, Zhao & Peng (2014), Sheu *et al.* (2015), Kuo & Ke (2016) mostram a importância da aplicação dos modelos de otimização das políticas de manutenção. Almeida, Ferreira & Cavalcante (2015), fazem uma revisão da literatura de alguns trabalhos que foram desenvolvidos de 1978 à 2013 relacionado a problemas de manutenção e confiabilidade

abordados a partir de uma perspectiva de modelos de decisão multicritério. No trabalho de Feng *et al.* (2015), os autores desenvolveram uma política de manutenção baseada em condições, em que a substituição ou uma ação preventiva ou corretiva é realizada de acordo com a condição do sistema. Wenbin, Zhao & Peng (2014) apresentam uma política de inspeção de dois níveis para um único sistema, com base em um processo de falha de três estágios. Onde processo de falha divide a vida do sistema em três fases: boas, menores e graves defeitos. A inspeção menor, só pode identificar o estágio com defeito menor, com uma certa probabilidade. A principal inspeção identifica as duas fases de defeito.

Sheu *et al.* (2015), neste trabalho consideram um modelo de substituição generalizada para um sistema de deterioração em que as falhas só podem ser detectadas por inspeção. O sistema é assumido para ter dois tipos de falhas, tipo I (falha menor) e tipo II (falha grave). A probabilidade de uma falha de tipo I ou tipo II depende do número de falhas de tipo I. Com essas premissas os autores desenvolvam um algoritmo computacional para encontrar a política ótima. Em quanto que, Kuo & Ke (2016) desenvolveram um modelo de manutenção prático com três configurações de sistemas reparáveis diferentes. Os autores usam métodos de equações diferenciais com varias equações complementares, para obter a disponibilidade de estado estacionário dessas três configurações de sistemas reparáveis diferentes. Finalmente, comparam a relação custo / benefício entre as três configurações, dados os parâmetros de distribuição, bem como o custo dos componentes primário e de espera.

Geralmente, a maioria dos esforços de investigação centram se no desenvolvimento de modelos matemáticos para determinar inspeção ideal.

As políticas de inspeção foram formalmente mencionadas na década de sessenta e desenvolvidas pelos trabalhos de Barlow *et al.* (1963) e Barlow & Proschan (1965) que definem procedimentos ótimos para realização de inspeção. E mais tarde Munford & Shahani (1972) desenvolveram uma política ótima de inspeção para a detecção de falhas em sistemas. Eles definem um parâmetro de decisão, onde a determinação da periodicidade depende apenas da estimação deste parâmetro, o que pode ser feito através da obtenção de dados de manutenção. Assim, eles mostram que esta política apresenta intervalos decrescentes, para inspeções sucessivas, quando o sistema tem uma taxa de falhas crescente, e, intervalos crescentes, para taxas decrescentes, já no outro trabalho Munford & Shahani (1973), fizeram aplicação do modelo desenvolvido no trabalho anterior, onde, o tempo para a falha, foi descrito por uma distribuição Weibull.

E na década de oitenta é introduzido pela primeira vez o conceito do Delay Time com os trabalhos de Christer (1982). Ele introduz o conceito Delay Time como um processo de falha em duas fases, primeira fase é a fase de operação normal até o tempo em que um defeito surge, segunda fase é definida como Delay Time o tempo do surgimento do defeito até a falha. Neste trabalho também define a terminologia básica, e apresenta uma aplicação na manutenção de edifícios. Dai vários trabalhos de investigação do modelo foram desenvolvidos e alargados na base deste trabalho, e foram apresentados resultados teóricos e estudos de caso em uma ampla gama de domínios de aplicação.

Desta forma, os modelos de inspeção parecem ser ferramentas eficazes que podem contribuir para uma melhor gestão de manutenção. Aspectos como a degradação de uma peça, a ocorrência de falhas e / ou defeitos, o tempo de reparação, substituição e do dimensionamento das equipes de manutenção, essas são alguns pontos considerados durante o processo de construção de um modelo de inspeção (LOPES, CAVALCANTE & ALENCAR, 2015).

4.2 EVOLUÇÃO DO DTM

Depois da formalização do DTM no trabalho de Christer (1982), em um contexto predial, os próximos trabalhos Christer & Waller (1984a) e Christer & Redmond (1989), os autores investigam o conceito de DTM com inspeção imperfeita. Nestes trabalhos foi proposto o DTM básico de inspeção imperfeito para manutenção da planta industrial. No próximo trabalho de Christer & Waller (1984b), os autores apresentam a variação desse modelo de inspeção imperfeito para uma manutenção da frota de veículos. Mais tarde, Baker & Wang (1993), apresentam um modelo DTM, em que a idade de um componente influencia tanto para o período de falha “ u ” e tanto para o Delay Time “ h ”.

Em Christer (1992), Baker & Wang (1991 e 1993) e Pellegrin (1992), os autores desenvolvem o modelo de uma planta com único componente de falha para inspeção perfeita e imperfeita. Christer (1992), no seu trabalho desenvolve o modelo de monitoramento do estado para uma planta de produção, quando o ponto inicial de um defeito é medido como o tempo desde o novo estado. Já no trabalho de Pellegrin (1992), considera manutenção com base na inspeção periódica dos equipamentos produtivos. A condição do equipamento é descrito pelo seu desgaste e deterioração. O autor também constrói um procedimento gráfico

para escolher o melhor intervalo de inspeção para diferentes critérios. Em Baker & Wang (1992), os autores concentram-se principalmente no problema de parâmetro de estimativa do modelo, com o uso do método de máxima verossimilhança e “Akaike” um critério de informação, fornecendo um modelo para o desempenho de inspeções imperfeito.

Mais tarde, nos trabalhos de Okumura *et al.* (1996), os autores desenvolveram um método para determinar os pontos de inspeção de tempo discretos de um sistema de único componente de deterioração. O modelo DTM é utilizado para descrever a transição de estados do sistema. Este problema é posteriormente investigado por Okumura (1997). Outros trabalhos de DTM com plantas com único componente são encontrado em Zhao *et al.* (2007) e Wang (2011). Em Zhao *et al.* (2007) os autores investigam o modelo para avaliar a confiabilidade e otimizar a programação de inspeção para um componente multi - defeito e também consideram a situação dos intervalos de inspeção não constantes. Em Wang (2011), o autor apresenta um modelo estendido de DTM para planta de produção e investiga o processo de falha de três estágios. E Wang *et al.* (2011), Desenvolve um modelo de disponibilidade com base no modelo DTM com manutenção imperfeita.

Um dos trabalhos com inspeção imperfeita é encontrada no trabalho de Flage (2014), o autor apresenta um modelo baseado no modelo básico de DTM em que um sistema tem três estados: funcionamento normal, com defeito e falha. Portanto, as inspeções são realizadas periodicamente, utilizando um procedimento pelo qual o sistema falha com uma probabilidade dependente do estado fixo.

Christer & Wang (1995), apresentam DTM para inspeção de substituição para um sistema complexo. Os autores assumem também que o sistema é inspecionado não só de forma planejada, mas também quando um componente falha. O objetivo deste trabalho é a minimização do custo de substituição, os intervalos de inspeção e o tempo de reposição do sistema. Anos depois Baker *et al.* (1997), concentram-se na estimativa dos parâmetros e os erros do modelo proposto anteriormente, a partir de registros de tempos de falha, o número de defeitos encontrados em inspeções de uma máquina que foi operada por algum tempo sob alguma inspeção imperfeita. Mais tarde, no trabalho de Christer & Lee (2000), os autores apresentam um modelo baseado em Manutenção Preventiva (PM) e DTM com um pressuposto de inatividade não negligenciável. O modelo é fornecido para processos homogêneos perfeitos e imperfeitos e por um processo não-homogêneo perfeito, ainda na política de substituição.

Em Wang (2008), o autor centra-se sobre o modelo de inspeção básica para o sistema complexo, como uma continuação do trabalho de investigação apresentado no exemplo de Christer & Wang (1995). E em Wang (2010) autor desenvolve um modelo de PM baseado no DTM, para uma política em que três tipos de manutenção são considerados (inspeção, manutenção preventiva e corretiva). Mais tarde, o autor estende o modelo para o trabalho Lv & Wang (2011). Uma revisão do modelo DTM, também é encontrada no trabalho de Wang (2012). Este trabalho é uma revisão de diferentes abordagens do DTM já citadas na literatura, nota-se que a maioria dessas abordagens compartilham uma suposição comum: substituição instantânea do sistema mediante a identificação de um defeito.

O trabalho mais recente de DTM para política de substituição é encontrado em Van Oosterom *et al.* (2014), os autores desenvolveram um modelo DTM de substituição para determinação de uma política ideal de manutenção, com uma nova hipótese de substituição adiada. Eles relaxam a hipótese de que a reposição instantânea é feita assim que um defeito é identificado em uma inspeção, assim permitindo que a substituição seja adiada por um período de tempo adicional. O objetivo é alcançar uma melhor utilização do tempo de vida útil do sistema, e reduzir os custos de substituição, fornecendo uma oportunidade de tempo suficiente para se preparar recursos de manutenção.

4.3 APLICAÇÃO DO DTM

Além da aplicação do DTM pela primeira vez na manutenção predial com Christer (1982), várias aplicações do modelo são investigadas como: o trabalho de Christer *et al.* (2000), os autores trazem um estudo de caso de uma política de manutenção programada, para uma planta industrial, que apresenta uma deficiência de dados de manutenção. Neste trabalho, a estimação dos parâmetros da distribuição do DTM é feita através do estimador de máxima verossimilhança, e uma política ótima de inspeção é proposta, baseada nos parâmetros estimados no modelo.

No trabalho de Desa e Christer (2001), o modelo DTM é aplicado num estudo de caso das frotas de ônibus. Estes autores fazem um estudo de caso para uma frota de ônibus, em Malásia na ausência de dados. Eles propõem um modelo para as inspeções nos ônibus que utiliza métodos subjetivos para a estimação dos parâmetros do modelo, devido à ausência de

dados de manutenção. O trabalho avalia os custos, para diferentes valores dos parâmetros e para inspeção perfeita e imperfeita.

Pillay *et al.* (2001), usam o DTM para modelar um problema de segurança da manutenção de equipamentos de pesca, com os critérios disponibilidade, custos esperado e downtime. Após a minimização dos critérios, diferentes valores de DTM foram encontrados. O próximo passo consistiu em comparar as curvas de downtime e custos e depois as três curvas em conjunto de maneira a identificar a melhor estratégia para os equipamentos com alta frequência de manutenção.

Jia & Christer (2003), reportam um estudo de caso comparando a abordagem do RCM e do DTM, para a definição dos intervalos de inspeção em uma planta de uma indústria química. Uma avaliação da disponibilidade é então proposta, tanto para o caso de uma inspeção perfeita como para o caso de uma inspeção imperfeita. Uma inovação, trazida neste modelo, diz respeito à consideração de um fator probabilístico relativo a introdução de erros humanos no sistema, durante a realização das inspeções.

Jones *et al.* (2009), no seu trabalho fazem um estudo de caso para uma empresa de produção de negro de carbono no Reino Unido, o objetivo deste trabalho foi de aplicar o DTM para determinar uma política ótima de substituição de filtros. Os autores construíram um modelo DTM para otimizar os critérios downtime da planta e os custos das inspeções associados, levando em consideração os possíveis impactos ambientais que uma falha possa causar, ou seus impactos em termos de custo, tanto para a companhia como para o meio ambiente.

No trabalho de Wang (2009a), o autor propõe modelo DTM no processo de produção que pode ser submetido a dois tipos de deteriorações. O primeiro tipo de deterioração é uma mudança na qualidade do produto causada por defeitos do processo menores que podem ser identificados e corrigidos pelas inspeções e reparações de rotina e as inspeções menores são consideradas perfeitas. O segundo tipo de deterioração é um grande defeito, causado por um grande problema mecânico ou elétrico que pode ser observado apenas quando o defeito tem levado a uma avaria do processo ou o defeito é revelado por uma inspeção principal, seguido de uma ação corretiva apropriada no momento da inspeção. Neste modelo as grandes inspeções são assumidas como imperfeitas. O modelo de inspeção tem como objetivo otimizar os intervalos de inspeção para os dois tipos de inspeções.

Das aplicações mais recentes do modelo DTM, encontramos os seguintes trabalhos: Lopes, Cavalcante & Alencar (2015), o modelo foi aplicado nas empresas de alugue de equipamentos de construção, onde foi usado para determinar o período ótimo de inspeção dos equipamentos de construções e o número de equipes de manutenção designados, com o objetivo de reduzir os custos de manutenção dos equipamentos de construção, aumentar a segurança e melhorar os contratos de alocação dos equipamentos.

O DTM no trabalho de Tang *et al.* (2015) foi aplicado na indústria de perfuração de petróleo e gás, na borracha e no filtro e a função de distribuição do tempo de falha inicial e DTM para cada exemplo foram estimados, para obtenção das funções de distribuição. Tal estimativa de parâmetros com base em dados objetivos contribuíram para a otimização do intervalo de inspeção e também forneceu alguns modelos teóricos para apoiar a gestão de integridade de equipamentos e sistemas.

5 METODOLOGIA E MODELO PROPOSTO

Neste capítulo é apresentada a metodologia e o modelo deste trabalho. O modelo foi elaborado para propor o período ótimo de inspeção e manutenção preventiva do pavimento asfáltico urbano com o custo mínimo possível.

Como foi exposto anteriormente, o modelo de inspeção Delay Time, foi introduzido pela primeira vez por Christer (1982), em um contexto de manutenção predial. Mas ao longo do tempo este modelo foi sofrendo algumas alterações de modo a adaptar-se a cada tipo de problema a ser modelado. E o modelo DTM proposto nesta dissertação segue as ideias propostas nos trabalhos de Christer (1999), Weng (2008) e Jones *et al.* (2009).

5.1 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho resume-se nas 11 fases do Framework para definição de uma política de inspeção e manutenção preventiva baseada em DTM para pavimentos asfálticos urbanos, dada pela Figura 5.1:

1ª Fase: Identificar métodos de surgimento de defeito e falha do pavimento asfáltico Urbano

Antes do desenvolvimento de qualquer modelo de manutenção, é necessário, identificar os métodos de surgimento de defeitos e falhas do componente. No caso deste trabalho, primeiro foi necessário entender os tipos de defeitos e falhas frequentes dos pavimentos asfálticos urbanos, principais causas, e as políticas usadas para inspecionar, prevenir e corrigir os defeitos e falhas, de modo a garantir a trafegabilidade das vias, em particular da cidade de Recife. Para o efeito, foi feita uma revisão bibliográfica e consultas das normas e técnicos da manutenção dos pavimentos, e também foram contatados o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) - PE e Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB).

Segundo as empresas contatadas, os defeitos mais frequentes e preocupantes das vias em particular na cidade de Recife são os buracos (Painéis), por causa da intensidade da chuva em períodos sazonais, os casos têm vindo a se agravar.

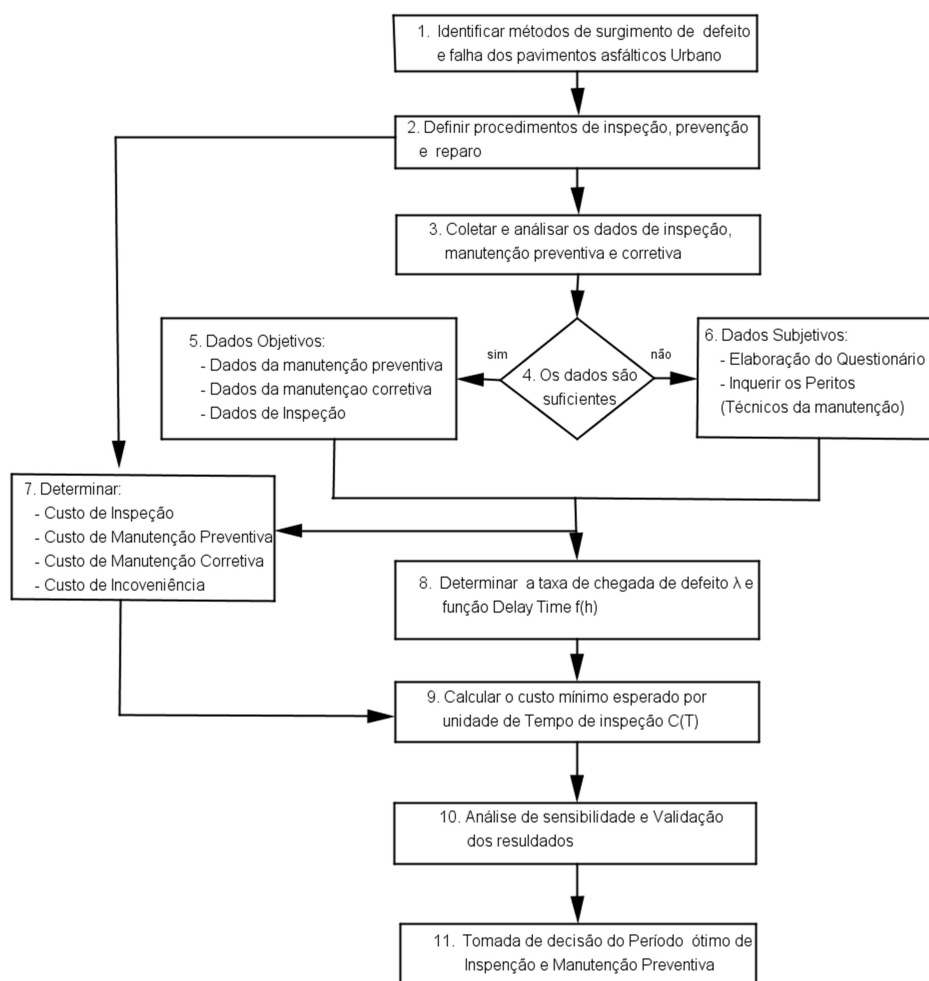


Figura 5.1 - Etapas Metodológicas

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

2ª Fase: Definir Procedimento de Inspeção, Prevenção e Reparo

Os procedimentos de inspeção, prevenção e reparo variam de acordo com o componente e o tipo de problema a ser resolvido. Nos pavimentos asfálticos existem oito tipos de defeitos que poderá ser considerados falhas de acordo com a gravidade do defeito, de todos são considerados os buracos como defeitos ou falhas perigosas. O início desta falha quanto a sua evolução são aceleradas pela ação do tráfego e de fatores climáticos, em grande parte das cidades brasileiras em particular a cidade de Recife para corrigir esses defeitos foi definido uma política chamada operação Tapa – Buraco. No caso da cidade em estudo a fiscalização das vias é feita no período de 8 a 9 dia. Os fiscais são responsáveis no levantamento de

medidas dos buracos nas vias em metros quadrados, considerando uma profundidade fixa de 5 centímetros. Para aplicar o modelo proposto neste trabalho é necessário definir quando um buraco é considerado defeito e quando é uma falha. Portanto, foram definidos defeito e falha como:

- ✓ Defeito é um buraco com limite máximo aceitável de 0,09 metro quadrado (m^2), com uma profundidade fixa de 5 centímetro;
- ✓ Falha é um buraco com limite mínimo de 1,5 metros quadrados (m^2), com uma profundidade fixa de 5 centímetro, considerado perigoso para tráfego.

3ª Fase: Coletar e Analisar os Dados de Inspeção, Manutenção Preventiva e Corretiva.

Para validação de qualquer modelo é preciso estabelecer dados necessários, e analisar os dados existentes, se são suficiente ou não. No caso deste trabalho foram considerados como dados necessários:

- ✓ Downtime médio devido à inspeção d ;
- ✓ Custo médio C_I de inspeção;
- ✓ Custo médio C_p , devido à manutenção preventiva (correção de um defeito);
- ✓ Custo médio C_f , devido à manutenção corretiva (correção de uma falha);
- ✓ Custo médio C_i , devido à inconveniência (custo das multas por deixar um defeito falhar);
- ✓ Custo fixo F ;
- ✓ Custo variável em um metro quadrado do buraco $C_v(\cdot)$;
- ✓ Taxa de chegada de defeito λ ;
- ✓ Período de Inspeção τ .

5ª e 6ª Fases: Dados Objetivos e Subjetivos

Para o modelo DTM, dois tipos de dados podem ser usados, *dados objetivos*, que foram usados neste trabalho: se os dados fornecidos pelos registos da empresa forem suficientes para validação do modelo. Ou *dados Subjetivos*: se forem recolhidas informações a partir de fontes, como equipe de manutenção, pessoal de operação e gestão de manutenção, através de

aplicação do questionário. Foi previamente sugerido por Christer e Waller (1984a) que o número de peritos para coleta de dados subjetivos pode ser de 3 à 5.

7ª, 8ª e 9ª Fases: Determinar os custos, parâmetro “ λ ” do modelo e a função de distribuição de DTM “ $f(h)$ ”

Depois da coleta e análise dos dados, segue a fase de determinação dos parâmetros de entrada do modelo e a função de distribuição do DTM. Para este trabalho foi determinada a taxa de chegada dos defeitos homogênea, portanto, a função de distribuição do Delay Time é exponencial.

Depois da informação dos custos envolvidos na inspeção, prevenção e reparo dos buracos, os custos foram determinados tendo em conta:

- ✓ Custo médio C_I de inspeção;
- ✓ Custo médio C_i , devido à inconveniência;
- ✓ Custo médio $C_p(m^2)$, devido à manutenção preventiva, inclui o custo variável C_v de correção dos defeitos e o custo fixo F ;
- ✓ Custo médio $C_f(m^2)$, devido à manutenção corretiva, inclui custo variado $C_v(\cdot)$ de correção de falhas, mais custo fixo F e custo de inconveniência C_i .

Para determinar o custo esperado, foi aplicado o modelo DTM de planta complexa, inspeção perfeita com taxa de chegada de defeito homogênea.

10ª e 11ª Fases: Análise de Sensibilidade, Validação dos Resultados e Determinar o Período Ótimo de Inspeção e Manutenção Preventiva

A análise de sensibilidade trata de um estudo e análise do impacto provocado na saída do modelo, por variações na entrada deste. Ou seja, avalia que impacto é ocasionado por variações nos dados de entrada ou nos parâmetros do modelo sobre a solução apresentada pelo modelo (Almeida, 2013). Uma análise de sensibilidade foi feita para avaliar a sensibilidade e robustez do modelo, e validar os resultados, sobre os parâmetros taxa de chegada de defeito λ , custo de inspeção C_I e custo de manutenção preventiva $C_p(m^2)$ com um aumento e diminuição de 5%, 10% e 15%.

5.2 MODELO PROPOSTO

Desde a sua criação o modelo DTM já foi aplicado e adaptado para vários tipos de problemas de inspeção e manutenção, e neste trabalho foi aplicado o modelo DTM de planta complexa com taxa de chegada de defeito homogênea, para determinar o período de inspeção e manutenção preventiva dos pavimentos asfálticos das vias urbanas. Segundo DNIT e EMLURB, em todas as infraestruturas urbanas, o mais importante e mais caro nos custos de urbanização é o pavimento que compõe o sistema viário. Os defeitos dos pavimentos que têm sido uma grande preocupação nas vias urbanas são os buracos, e por serem defeitos que criam mais problemas no tráfego das vias da cidade de Recife, foi criada uma política de manutenção para correção desses defeitos, chamada “Operação Tapa-Buraco”.

5.2.1 O Defeito

Os **Buracos** são cavidades formadas inicialmente no revestimento do pavimento e que possuem dimensões e profundidades variadas. O buraco é muito grave, pois afeta estruturalmente o pavimento, permitindo o acesso das águas superficiais ao interior da estrutura. Também é grave do ponto de vista funcional, já que afeta a irregularidade longitudinal, e como consequência, a segurança do tráfego, e o custo do transporte, ilustração na Figura 5.2.

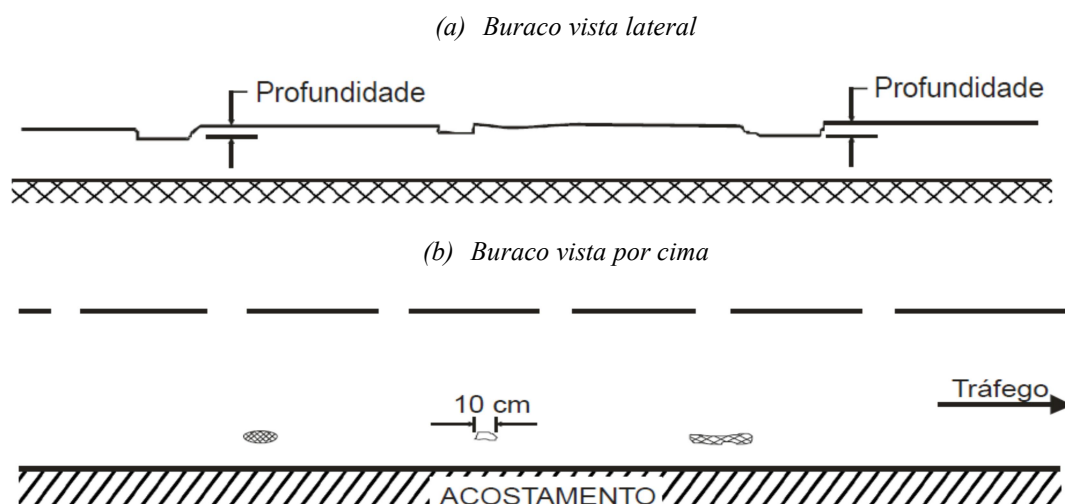


Figura 5.2 – Ilustração dos Buracos

Fonte: Manual DNIT/IPR – 720 (2006)

Os buracos surgem quando há trincamento por fadiga (estágio terminal) ou desintegração localizada na superfície do pavimento (desgastes de severidade alta), causada pelo excesso de carga por eixo dos veículos, deficiência de projeto, deficiências construtivas; e ação da água devido à infiltração.

O início desta falha quanto a sua evolução são aceleradas pela ação do tráfego e de fatores climáticos. As trincas de fadiga na medida em que evoluem sofrem um processo de interligação, formando pequenas placas sem vínculo e com bordas erodidas. Com a passagem das cargas de tráfego estas placas vão sendo arrancadas, formando buracos no revestimento, os quais podem evoluir ao ponto de atingir a base do pavimento. A água superficial, que já possuía acesso até a base através das trincas, terá ainda maior facilidade de alcançar essa camada. A água sob pressão irá carrear o material mais fino da base e agravar o problema. No caso de desintegração, o processo é semelhante, a Figura 5.3 ilustra a formação de buracos

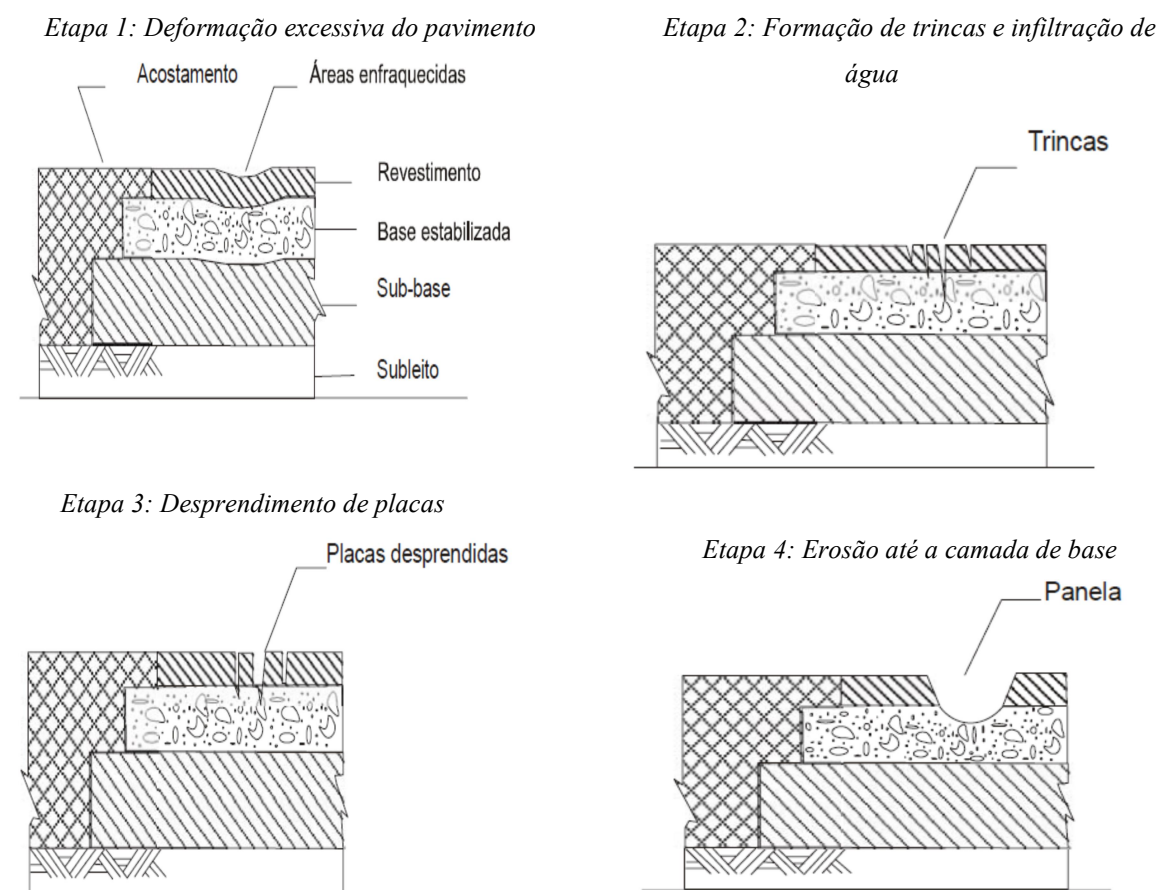


Figura 5.3 – Formação de Buracos em pavimento asfálticos

Fonte: Manual DNIT/IPR – 720 (2006)

As trincas por reflexão ocorrem quando o trincamento existente em uma camada inferior propaga-se em direção à superfície, atingindo o revestimento asfáltico. Assim sendo, elas podem apresentar-se sob a forma de qualquer tipo de trinca (longitudinal, irregular ou mesmo interligada). A reflexão ocorre como consequência da concentração das tensões no entorno da região ocupada pela trinca existente, fazendo com que a vida de fadiga do revestimento seja extremamente reduzida. Como uma regra prática, estima-se que a velocidade de propagação de uma trinca oscila entre 20 à 50 milímetro por ano (MANUAL DNIT/IPR – 720, 2006).

O buraco é considerado defeito se não afeta o funcionamento normal do tráfego na via, e falha se afeta parcialmente ou totalmente o funcionamento normal do tráfego na via. Neste trabalho foi considerado defeito e falha conforme mostra a falha Figura 5.4.

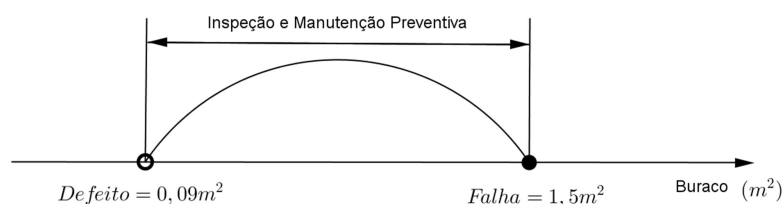


Figura 5.4 – Definição de Defeito e Falha de um buraco

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

5.2.2 Hipóteses do Modelo

O modelo DTM proposto neste trabalho consiste na determinação do período ótimo de inspeção e manutenção preventivo do pavimento asfáltico urbano, com custo mínimo possível, com as seguintes premissas:

1. Uma via pavimentada é um sistema multi – componente, sujeito a vários tipos de falhas;
2. Os buracos do pavimento asfáltico surgem a uma profundidade fixa de 5 centímetro;

3. Os Defeitos do pavimento asfáltico são buracos com limite máximo aceitável de 0,09 metro quadrado e Falhas são buracos com limite mínimo de 1,5 metros quadrados, considerado perigoso para tráfego;
4. O pavimento é inspecionado a cada unidade de Tempo T , a um custo de C_i por inspeção;
5. A variação do custo $C_v(\cdot)$ é linear em relação a metros quadrados, a partir do custo fixo F ;
6. O custo médio de inconveniência de um buraco é C_i (custo de deixar um defeito falhar);
7. O custo médio de corrigir uma falha é $C_f(m^2)$, e o custo médio de prevenção é $C_p(m^2)$;
8. As inspeções são perfeitas, ou seja, os defeitos presentes são perfeitamente identificados nas inspeções;
9. Os defeitos identificados são corrigidos imediatamente;
10. O ponto inicial de surgimento de um defeito é uniformemente distribuído no tempo desde a última inspeção e independente de Delay Time “ h ”;
11. Os defeitos surgem a uma taxa “ λ ” constante;
12. Os defeitos apenas surgem quando o pavimento está em operação (Tráfego).

5.2.3 Custo Esperado por Inspeção

Se a taxa de chegada de defeito λ é constante, então, a função de distribuição do Delay Time segue uma distribuição exponencial, isto é:

$$f(h) = \lambda e^{-\lambda h} \quad 5.1$$

Segundo Jones *et al.* (2009), se a taxa de chegada de defeito é constante, então, a probabilidade de um defeito falhar é dada pela Equação 5.2.

$$b(T) = \int_0^T \left(\frac{T-h}{T} \right) \lambda e^{-\lambda h} dh \quad 5.2$$

Este integral pode ser inscrito na forma simplificada

$$b(T) = \lambda \int_0^T e^{-\lambda h} dh - \frac{\lambda}{T} \int_0^T h e^{-\lambda h} dh \quad 5.3$$

Calculando a integral do primeiro termo pela regra da mudança de variáveis de “ h ” para “ $-\lambda h$ ” e o segundo pela regra de integração por parte obteve:

$$b(T) = 1 + \frac{e^{-\lambda T}}{\lambda T} - \frac{1}{\lambda T} \quad 5.4$$

Substituindo $b(T)$ na Equação 2.14 do custo Esperado proposta por Jones et al. (2009), quando a taxa de chegada do defeito é homogênea com inspeção perfeita, pela Equação 5.4 obtém-se a seguinte expressão do custo esperado por inspeção:

$$C(T) = \frac{\left[T\lambda \left\{ C_f \left(1 + \frac{e^{-\lambda T}}{\lambda T} - \frac{1}{\lambda T} \right) + C_p \left(\frac{1}{\lambda T} - \frac{e^{-\lambda T}}{\lambda T} \right) \right\} + C_i \right]}{T + d} \quad 5.5$$

Onde $C(T)$ é uma função do custo esperado, que depende do tempo T de inspeção e:

$$C_f(m^2) = C_v(Falha) + F + C_i \quad 5.6$$

$$C_p(m^2) = C_v(Defeito) + F \quad 5.7$$

Onde $C_v(Falha)$ é custo variável para corrigir uma falha e $C_v(Defeito)$ é custo variável para corrigir um defeito, F é o custo fixo e C_i custo de inconveniência (custo das multas por deixar um defeito falhar). Pela hipótese 5 a variação de C_v é dada pelo gráfico da Figura 5.5 e o Custo em metros quadrado (m^2) de um buraco é dada pelo gráfico da Figura 5.6.

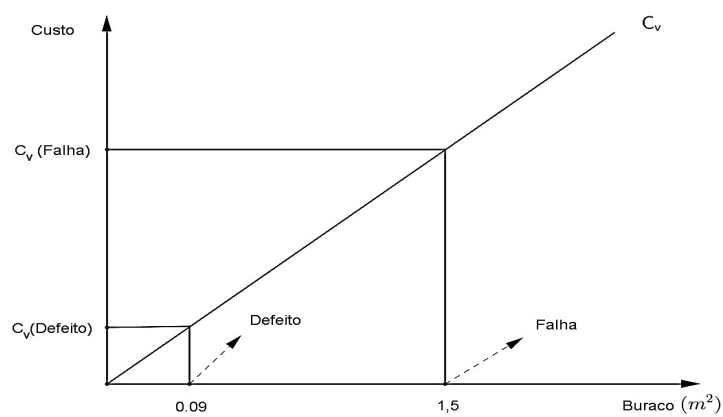


Figura 5.5 – Custo variável

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

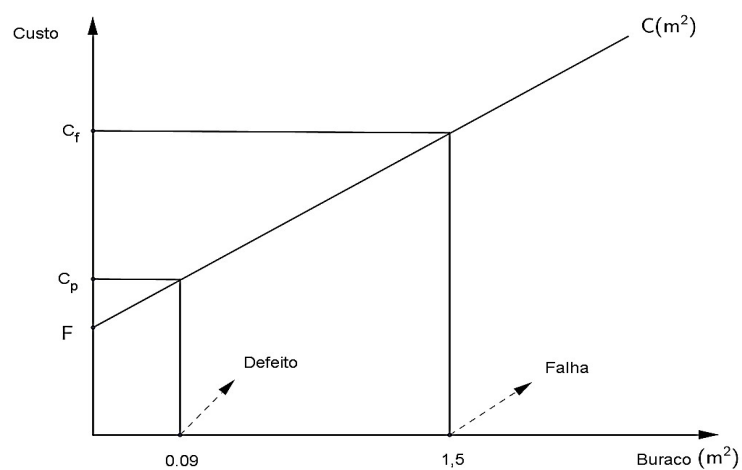


Figura 5.5 – Custo por um metro quadrado de buraco

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

6 ESTUDO DE CASO

A combinação de chuvas e nível superficial dos lençóis freáticos acelera o revestimento das vias da cidade de Recife, para abertura de buracos, desgaste rápido e constante do pavimento. As intervenções irregulares por empresas de manutenção, às vezes ajudam no aumento da quantidade de buracos nas ruas e avenidas. Neste capítulo é apresentado um estudo de caso referente a pavimento das vias da cidade de Recife, com três mil quilômetros das vias pavimentadas na sua maioria com pavimento asfáltico e outras não pavimentadas. Foi selecionada como amostra Avenida Caxangá, uma das vias mais importantes nas arteriais da cidade de Recife, que é um dos corredores de tráfego de mais de 10 bairros e municípios das regiões metropolitanas, conhecida como uma das via mais longa em linha reta no Brasil.

6.1 OBJETO DO ESTUDO: AVENIDA CAXANGÁ

De acordo com Melo *et al.* (2003), a Avenida Caxangá, antes de sua pavimentação foi a via de acesso responsável pela expansão da cidade na direção oeste, funcionando como um elo entre a Zona da Mata Norte e o Centro. Sua construção começou em 1940, mas só foi concluída e inaugurada em agosto de 1966. Com cerca de aproximadamente 6,1 km de extensão, o maior corredor urbano de transporte coletivo em linha reta do Estado de Pernambuco, começa no Bairro da Madalena, perto de Museu da Abolição e termina na Ponte Marechal Castelo Branco no Rio Capibaribe no Bairro de Caxangá, como ilustra a Figura 6.1 e, portanto, é uma das vias de escoamento de trânsito do Recife caracterizada pela circulação acelerada de pessoas e bens. Possuem duas faixas de rolamento, cada uma com 10 metros de largura, intercaladas por um canteiro central e faixa exclusiva para ônibus com quatro metros de largura.

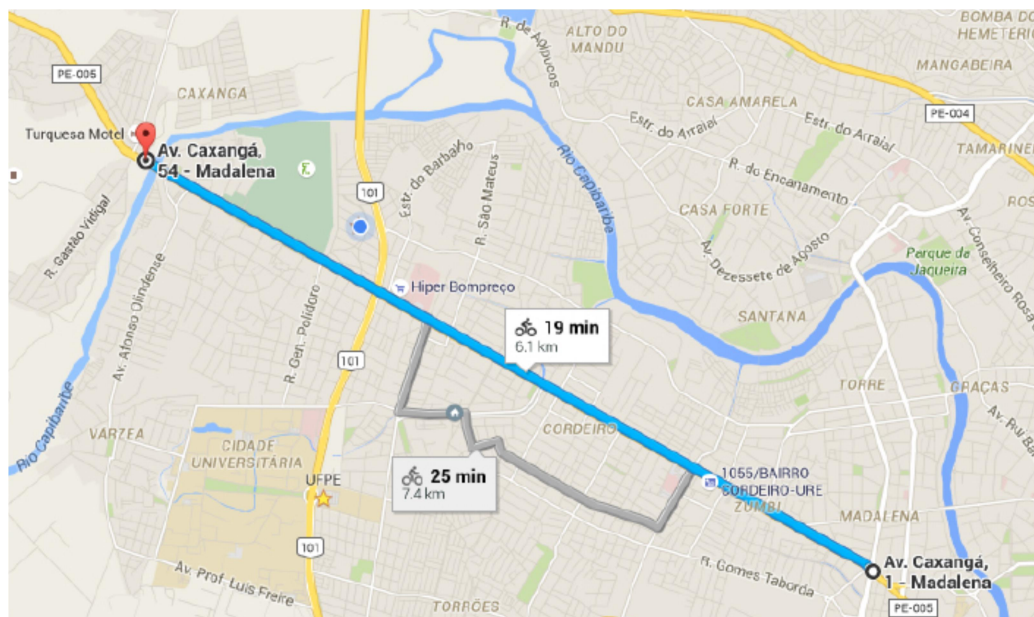


Figura 6.1 – Extensão da Avenida Caxangá

Fonte: Map Data Google (2015)

Na época do Estado Novo, durante a gestão do prefeito Novaes Filho, a Avenida foi pavimentada com paralelepípedos rejuntados com cimento sobre concreto, alargada por meio de aterros e protegida por obras-de-arte. Hoje, um dos corredores de tráfego de veículos e de transportes coletivos mais importantes da zona oeste da cidade, permitindo maior fluidez no trânsito, de mais de 40 mil veículos diários e é o principal acesso para diversos bairros, entre os quais Madalena, Zumbi, Cordeiro, Ipatinga, Engenho do Meio, Cidade Universitária, Várzea, Caxangá, Bongi, San Martin, e de municípios das regiões metropolitanas como São Lourenço, Camaragibe e outros (GASPAR, 2009).

6.2 EMPRESA E POLÍTICA DE MANUTENÇÃO DAS VIAS DE RECIFE

A Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana - Recife (EMLURB) foi criada em 26 de abril de 1979 para cuidar da preservação da cidade, pelo executivo Municipal, com fundamento na Lei nº 13.535, dotada de personalidade jurídica de direito privado, com patrimônio próprio, autonomia administrativa e financeira, regida pelo seu Regimento Interno e Estatuto Social. Vinculada à Secretaria de Infraestrutura e Serviços Urbanos da Prefeitura, sua atuação é estratégica para o dia a dia do município, sendo responsável, entre outros serviços, pela manutenção e conservação do sistema viário, com a implantação da rede de

drenagem e a execução de pavimentação. A EMLURB também desenvolve atividades de revitalização paisagística das praças e parques, atua na manutenção de pontes, lagos, canteiros centrais e áreas isoladas e cuida do funcionamento da iluminação pública na cidade, sendo responsável pela troca de lâmpadas, reatores e outros equipamentos. Com relação ao gerenciamento da limpeza urbana, o órgão promove em milhares de ruas e avenidas a coleta de lixo, varrição, capinação, lavagem e pintura de meio-fio (<http://www.recife.pe.gov.br/emlurb/>).

Os dados coletados neste trabalho foram fornecidos pelo Departamento de Drenagem e Pavimentação da EMLURB, em planilhas de atuação dos anos 2013 – 2015, referente à “Operação Tapa-Buraco” da Avenida Caxangá, solicitados pelo ofício circular Nº 04/2015-PPGEP dirigida ao presidente da EMLURB, submetido no dia 20/08/2015, com número de protocolo 413 580-DPR (Em Anexo) e tabela de preços para contratação de obras e serviço de engenharia de 2014 (EMLURB, 2014), duas entrevista com o diretor executivo de Pavimentação da EMLURB, uma entrevista com o supervisor da “Operação Tapa Buraco” incluindo uma visita na execução de Tapa Buraco. Foram verificados os tipos de serviços que EMLURB realiza nas vias incluindo a via em estudo que são:

1. ***Asfalto Pré-misturado a Frio;***
2. ***Operação Tapa-Buracos*** – realizada quando da ocorrência de buracos, devido à ação do tráfego, chuvas,...etc, esta política é corretiva, põe tem como objetivo tapar os buracos.
3. ***Lama Asfáltica*** – tratamento aplicado visando a sobrevida do revestimento,
4. ***Recapeamento asfáltico com concreto betuminoso;***
5. ***Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CBUQ)*** – quando do desgaste acentuado, com aparecimento dos agregados graúdos, panelas, fissuras e aplicada uma nova camada de revestimento;
6. ***Revestimento em Paralelepípedo*** – reposição com polígonos regulares.

6.2.1 Operação Tapa-Buracos

De acordo com EMLURB só com operação Tapa-Buraco, até Agosto de 2015 já havia sido gasto R\$ 5,2 milhões tapando cerca de 7.580 buracos, e no ano 2014 foram gastos R\$

13.558.631,15 tapando cerca de 23.497 buracos. Esta política é resumida em 3 etapas de ação, *Identificação dos Buracos, Planejamento e Tapa-Buraco*:

- *Identificação dos Buracos* – As vias da cidade de Recife são divididas em áreas, cada área tem um fiscal que responsável pelas inspeções. Para identificação dos buracos, o fiscal tem passado em uma via uma vez em cada 8 a 9 dias, para fazer o levantamentos dos buracos bem como a sua localização, também os moradores podem identificar os buracos e comunicar a empresa, e depois um fiscal é enviado para fazer o levantamento no local;
- *Planejamento* – Depois da identificação do buraco entra a fase do planejamento, para quantificar os custos necessários. Esta etapa dura em média 20 dias dependendo da gravidade do buraco. Se o problema for grave em uma via importante da cidade, então a solução é imediata, isto é, em 5 dias no máximo é enviada uma equipe de manutenção para tapar o buraco.
- *Tapa-Buraco* – Essa última etapa, é de ação de tapar o buraco, mostrado da Figura 6.2, depois do planejamento é enviada uma equipe composta de 5 servente e um supervisor para correção do defeito, que podem durar alguns dias dependendo dos buracos que são tapados.

1ª Fase: Delimitar a area a ser recortada em um quadrado



2ª Fase: Recortar o revestimento a ser removido



3ª Fase: Remover o revestimento que foi recortado

4ª Fase: Efetuar a limpeza da área utilizando vassouras ou compressor.



5ª Fase: Tapar o Buraco



5ª Fase: Compactar



Figura 6.2 – Sequência da Operação Tapa-Buraco
 Fonte: Manual Prático de Operação Tapa Buraco (2011)

6.3 ANÁLISE DE DADOS

Os dados apresentados nas Figuras 6.3 e 6.4 foram coletados no Departamento de Drenagem e Pavimentação da EMLUBR, fornecidos pelas planilhas de atuação dos anos 2013 – 2015, referente ao projeto “Operação Tapa-Buraco” da Avenida Caxangá, de 29 meses, começando em Março de 2013 à agosto de 2015. Durante este período foi gasto um total de R\$ 813.083,39 (incluso custo de mão de obra, equipamentos, material e transporte) com tapa de 14.244,89 metros quadrados de buracos com profundidade fixa de 5 centímetros. Segundo as entrevistas feitas com o diretor executivo do sector de pavimentação da EMLURB e supervisor da “Operação Tapa Buraco”, a operação Tapa Buraco não têm medidas fixa mínima (defeito) e máxima (falha) dos buracos a ser executados, portanto, para aplicar o modelo proposto considerou-se que a “Operação Tapa Buraco” considera que um buraco é perigoso para trafegabilidade da via (falha) a partir dos 1,5 metros quadrados e os buracos são identificados no estado inicial (defeito) com 0,09 metro quadrado.

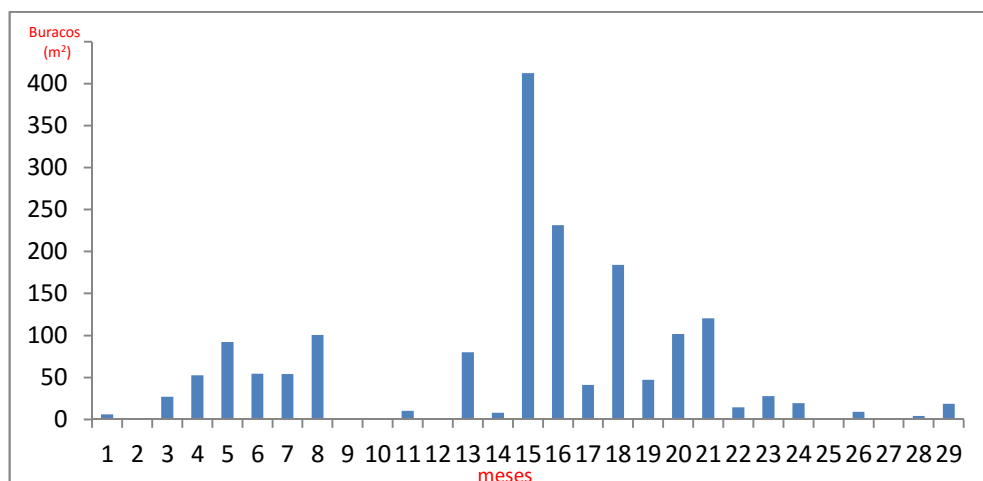


Figura 6.3 – Dados coletados dos Buracos

Fonte: EMLURB (2015)

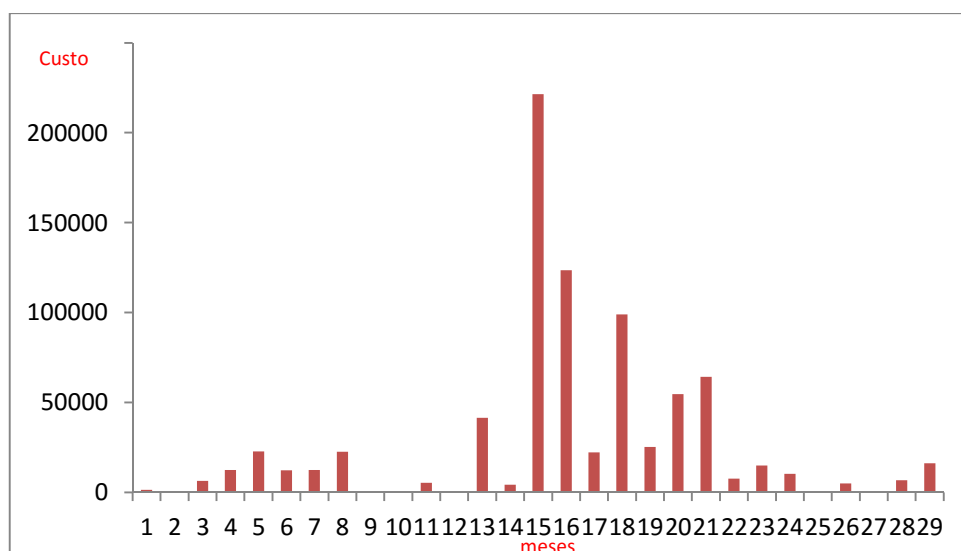


Figura 6.4 – Dados coletados de Custo de Tapa Buracos

Fonte: EMLURB (2015)

6.4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT/IPR-720, 2006), estima-se que a velocidade de propagação de uma trinca oscila entre 20 à 50 milímetros por ano em todos pavimentos asfálticos, tratando-se de pavimentos asfálticos urbanos, esta pesquisa considerou a velocidade de propagação de uma trinca de 50 milímetros por ano, isto é, 5 centímetro (igual a profundidade do buraco) por 365 dia, isto é, a propagação de uma

trinca é igual à $5/365=0,0137$ centímetro por dia. Sendo que a profundidade de um buraco é fixada em 5 centímetro na “Operação Tapa-Buraco”, então, a taxa de chegada do defeito é de $\lambda = 0,0137$.

Segundo a tabela de preços para contratação de obras e serviços de engenharia de 2014 da EMLURB (EMLURB, 2014) um metro cubico (m^3) do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), para camada de rolamento, incluindo a aplicação e compactação, usado na “Operação Tapa Buraco” custa R\$ 663,16 (incluso os custo de equipamento, mão de obra, transporte e material). Um metro cubico de CBUQ com 5 centímetro (cm) de profundidade corresponde a tapar 20 metros quadrados (m^2) de buracos ($1 m^3 / 0,05 m = 20 m^2$) na “Operação Tapa Buraco”. Isto é, a “Operação Tapa Buraco” gasta R\$ 663,16 tapando $20 m^2$ de buracos. Então, o custo variável $C_v(\cdot)$ de um buraco com $1,5 m^2$ (falha) é R\$ 49,737 ($C_v(falha) = 49,737$) e com $0,09 m^2$ (defeito) é R\$ 2,98422 ($C_v(defeito) = 2,9842$). As fiscalizações são feitas no período de 8 a 9 dias, com duração de um dia ($d = 1$) por fiscalização.

Por insuficiência de dados o custo fixo R\$ 200 ($F = 200$), custo de inspeção R\$ 70 ($C_i = 70$) e custo por inconveniência R\$ 3000 ($C_i = 3000$) foram arbitrados segundo as informações obtidas nas entrevistas. Portanto:

$$C_f(m^2) = C_v(Falha) + F + C_i = 49,737 + 200 + 3000 = 3249,737 \quad 6.1$$

$$C_p(m^2) = C_v(Defeito) + F = 2,9842 + 200 = 202,9842 \quad 6.2$$

Substituindo os parâmetros da Equação 5.5 pelos respectivos valores, o valor de custo esperado por inspeção é dada pela Equação 6.3 a seguir:

$$C(T) = \frac{\left[0,0137T \left\{ 3249,737 \left(1 + \frac{e^{-0,0137}}{0,0137T} - \frac{1}{0,0137T} \right) + 202,9842 \left(\frac{1}{0,0137T} - \frac{e^{-0,0137T}}{0,0137T} \right) \right\} + 70 \right]}{T + 1} \quad 6.3$$

O modelo gera os resultados representados na Figura 6.5 e Tabela 6.1.

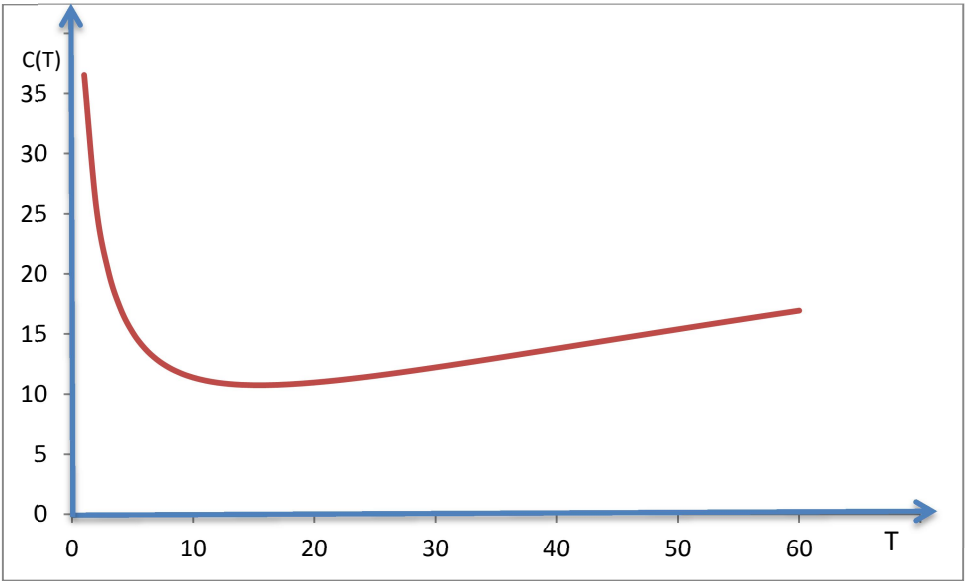


Figura 6.5 – Custo Esperado por Inspeção

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

Tabela 6.1 – Custo Esperado por Inspeção

T	$C(T)$	T	$C(T)$	T	$C(T)$	T	$C(T)$	T	$C(T)$
1	36,53275	13	10,83765	25	11,51752	37	13,31002	49	15,23639
2	25,56503	14	10,77038	26	11,64976	38	13,47002	50	15,3952
3	20,22026	15	10,74103	27	11,78686	39	13,63052	51	15,55345
4	17,12317	16	10,74252	28	11,92813	40	13,79136	52	15,71108
5	15,14867	17	10,76936	29	12,07296	41	13,95241	53	15,86808
6	13,8146	18	10,81722	30	12,22085	42	14,11356	54	16,02439
7	12,87988	19	10,88263	31	12,37135	43	14,27469	55	16,18
8	12,21061	20	10,96281	32	12,52405	44	14,43571	56	16,33486
9	11,72644	21	11,05546	33	12,67863	45	14,59653	57	16,48897
10	11,37626	22	11,1587	34	12,83476	46	14,75707	58	16,64229
11	11,126	23	11,27097	35	12,99219	47	14,91728	59	16,7948
12	10,95207	24	11,39095	36	13,15069	48	15,07707	60	16,9465

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

Os resultados gerados pelo modelo proposto, sugeri uma política de inspeção e manutenção preventiva com período ótimo de 15 dias ($\tau^* = 15$).

6.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é um estudo e análise do impacto provocado na saída do modelo, por variações na entrada. Ou seja, avalia o impacto ocasionado por variações nos dados de entrada ou nos parâmetros do modelo sobre a solução apresentada pelo modelo. Portanto, depois da apresentação dos resultados na Figura 6.5 e Tabela 6.1, segue a fase de estudo para analisar a sensibilidade e robustez do modelo proposto. O estudo foi realizado em três etapas, com aumento e diminuição de 5%, 10% e 15% no parâmetro λ (taxa de chegada de defeito), C_I (custo por inspeção) e $C_p(m^2)$ (custo por manutenção preventiva) os seguintes casos foram considerados:

1ª Etapa: Variação do parâmetro λ

Caso 1: Manter λ inalterados, com custo esperado de $C(T)$;

Caso 2: Diminuir λ em 5%, com custo esperado de $C_1(T)$;

Caso 3: Aumentar λ em 5%, com custo esperado de $C_2(T)$;

Caso 4: Diminuir λ em 10%, com custo esperado de $C_3(T)$;

Caso 5: Aumentar λ em 10%, com custo esperado de $C_4(T)$;

Caso 6: Diminuir λ em 15%, com custo esperado de $C_5(T)$;

Caso 7: Aumentar λ em 15%, com custo esperado de $C_6(T)$.

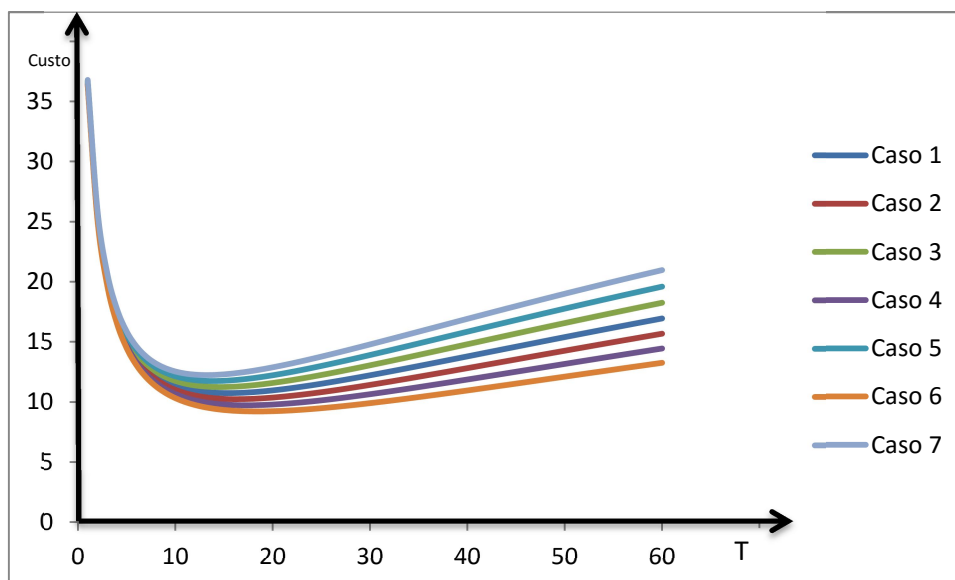


Figura 6.6 – Análise de sensibilidade do parâmetro λ

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

Tabela 6.2 – Análise de sensibilidade do parâmetro λ

T	$C(T)$	$C_1(T)$	$C_2(T)$	$C_3(T)$	$C_4(T)$	$C_5(T)$	$C_6(T)$
1	36,53275	36,44938	36,61683	36,36672	36,7016	36,28477	36,78709
2	25,56503	25,43565	25,69626	25,30814	25,82934	25,18248	25,96427
3	20,22026	20,0545	20,38912	19,89182	20,56105	19,73225	20,73606
4	17,12317	16,92507	17,3256	16,73131	17,53236	16,54191	17,74341
5	15,14867	14,92044	15,38246	14,69779	15,6218	14,48074	15,86666
6	13,8146	13,55764	14,07832	13,30749	14,34879	13,06416	14,62598
7	12,87988	12,59521	13,17251	12,31853	13,47306	12,04989	13,78148
8	12,21061	11,899	12,53133	11,59656	12,86111	11,30332	13,1999
9	11,72644	11,38854	12,07458	11,06095	12,43289	10,74371	12,80131
10	11,37626	11,01263	11,75123	10,6604	12,13745	10,31967	12,53485
11	11,126	10,73712	11,52727	10,36074	11,94085	9,996946	12,36664
12	10,95207	10,53841	11,37917	10,13829	11,81959	9,751834	12,27323
13	10,83765	10,39962	11,29012	9,976158	11,7569	9,567401	12,23788
14	10,77038	10,30838	11,2478	9,861947	11,7405	9,431233	12,24832
15	10,74103	10,25543	11,24299	9,786373	11,76116	9,334025	12,29537
16	10,74252	10,23369	11,26864	9,742337	11,81186	9,268661	12,372
17	10,76936	10,23764	11,31926	9,724319	11,88714	9,229612	12,47278
18	10,81722	10,26295	11,39054	9,727967	11,98267	9,212513	12,5934
19	10,88263	10,30614	11,47902	9,749801	12,09503	9,213875	12,73043
20	10,96281	10,36441	11,58191	9,787005	12,22144	9,230877	12,88111
...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

2ª Etapa: Variação do parâmetro C_1

Caso 1: Manter C_1 inalterados, com custo esperado de $C(T)$;

Caso 2: Diminuir C_1 em 5%, com custo esperado de $C_1(T)$;

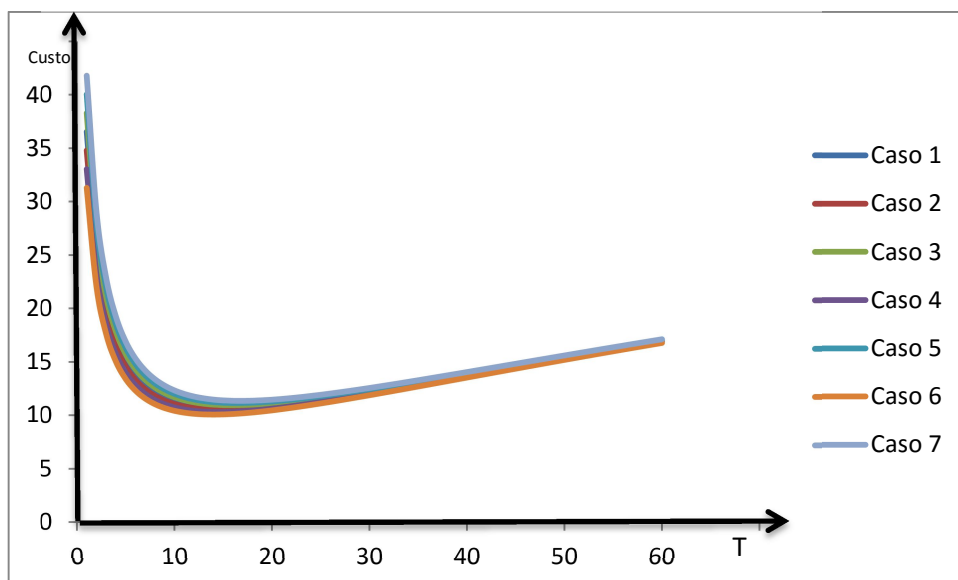
Caso 3: Aumentar C_1 em 5%, com custo esperado de $C_2(T)$;

Caso 4: Diminuir C_1 em 10%, com custo esperado de $C_3(T)$;

Caso 5: Aumentar C_1 em 10%, com custo esperado de $C_4(T)$;

Caso 6: Diminuir C_1 em 15%, com custo esperado de $C_5(T)$;

Caso 7: Aumentar C_1 em 15%, com custo esperado de $C_6(T)$.

Figura 6.7 – Análise de sensibilidade do parâmetro C_1

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

Tabela 6.3 – Análise de sensibilidade do parâmetro C_1

T	$C(T)$	$C_1(T)$	$C_2(T)$	$C_3(T)$	$C_4(T)$	$C_5(T)$	$C_6(T)$
1	36,53275	34,78275	38,28275	33,03275	40,03275	31,28275	41,78275
2	25,56503	24,39836	26,73169	23,23169	27,89836	22,06503	29,06503
3	20,22026	19,34526	21,09526	18,47026	21,97026	17,59526	22,84526
4	17,12317	16,42317	17,82317	15,72317	18,52317	15,02317	19,22317
5	15,14867	14,56534	15,732	13,982	16,31534	13,39867	16,89867
6	13,8146	13,3146	14,3146	12,8146	14,8146	12,3146	15,3146
7	12,87988	12,44238	13,31738	12,00488	13,75488	11,56738	14,19238
8	12,21061	11,82172	12,5995	11,43283	12,98839	11,04395	13,37728
9	11,72644	11,37644	12,07644	11,02644	12,42644	10,67644	12,77644
10	11,37626	11,05808	11,69445	10,7399	12,01263	10,42172	12,33081
11	11,126	10,83433	11,41767	10,54267	11,70933	10,251	12,001
12	10,95207	10,68284	11,2213	10,41361	11,49053	10,14438	11,75976
13	10,83765	10,58765	11,08765	10,33765	11,33765	10,08765	11,58765
14	10,77038	10,53705	11,00371	10,30371	11,23705	10,07038	11,47038
15	10,74103	10,52228	10,95978	10,30353	11,17853	10,08478	11,39728
16	10,74252	10,53663	10,9484	10,33075	11,15428	10,12487	11,36016
17	10,76936	10,57491	10,9638	10,38047	11,15825	10,18602	11,35269
18	10,81722	10,63301	11,00143	10,4488	11,18564	10,26458	11,36985
19	10,88263	10,70763	11,05763	10,53263	11,23263	10,35763	11,40763
20	10,96281	10,79614	11,12948	10,62948	11,29614	10,46281	11,46281
...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

3ª Etapa: Variação do parâmetro C_p

Caso 1: Manter C_p inalterados, com custo esperado de $C(T)$;

Caso 2: Diminuir C_p em 5%, com custo esperado de $C_1(T)$;

Caso 3: Aumentar C_p em 5%, com custo esperado de $C_2(T)$;

Caso 4: Diminuir C_p em 10%, com custo esperado de $C_3(T)$;

Caso 5: Aumentar p em 10%, com custo esperado de $C_4(T)$;

Caso 6: Diminuir C_p em 15%, com custo esperado de $C_5(T)$;

Caso 7: Aumentar C_p em 15%, com custo esperado de $C_6(T)$.

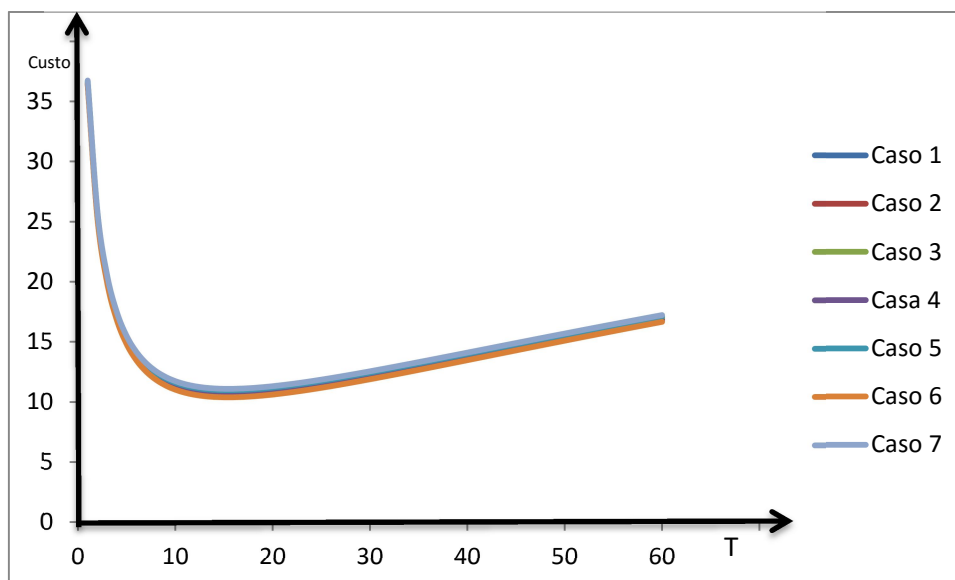


Figura 6.8 – Análise de sensibilidade do parâmetro $C_p(m^2)$

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

Tabela 6.4 – Análise de sensibilidade do parâmetro $C_p(m^2)$

T	$C(T)$	$C_1(T)$	$C_2(T)$	$C_3(T)$	$C_4(T)$	$C_5(T)$	$C_6(T)$
1	36,53275	36,4637	36,6018	36,39466	36,67085	36,32561	36,7399
2	25,56503	25,47359	25,65647	25,38215	25,7479	25,29071	25,83934
3	20,22026	20,1181	20,32243	20,01593	20,4246	19,91376	20,52677
4	17,12317	17,01493	17,23141	16,90669	17,33966	16,79845	17,4479
5	15,14867	15,03668	15,26066	14,92469	15,37265	14,8127	15,48464
6	13,8146	13,70018	13,92901	13,58577	14,04342	13,47136	14,15784
7	12,87988	12,76387	12,99589	12,64786	13,11191	12,53185	13,22792
8	12,21061	12,09355	12,32767	11,97649	12,44474	11,85942	12,5618
9	11,72644	11,60871	11,84418	11,49098	11,96191	11,37325	12,07964
10	11,37626	11,25814	11,49439	11,14001	11,61252	11,02188	11,73065
11	11,126	11,00768	11,24432	10,88936	11,36264	10,77105	11,48095
12	10,95207	10,83372	11,07043	10,71537	11,18878	10,59701	11,30713
13	10,83765	10,71938	10,95591	10,60111	11,07418	10,48284	11,19245
14	10,77038	10,65229	10,88847	10,53421	11,00656	10,41612	11,12465
15	10,74103	10,6232	10,85886	10,50536	10,97669	10,38753	11,09452
16	10,74252	10,625	10,86003	10,50749	10,97755	10,38997	11,09506
17	10,76936	10,65221	10,88651	10,53506	11,00365	10,41791	11,1208
18	10,81722	10,70048	10,93396	10,58373	11,0507	10,46699	11,16744
19	10,88263	10,76633	10,99893	10,65003	11,11523	10,53373	11,23153
20	10,96281	10,84698	11,07864	10,73115	11,19447	10,61532	11,3103
...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: Esta Pesquisa (2016)

6.6 ANÁLISE DE RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO MODELO

Pode-se observar nos resultados da análise de sensibilidade do modelo quando varia o parâmetro taxa de chegada do defeito na Figura 6.6 e Tabela 6.2, o decréscimo e o acréscimo máximo do período de inspeção é de 2 e 3 dias em relação aos resultados obtidos pelo modelo, quando varia o parâmetro custo de inspeção na Figura 6.7 e Tabela 6.3, o decréscimo e o acréscimo máximo do período de inspeção é de 1 e 2 dias, e quando varia o parâmetro custo de manutenção preventiva na Figura 6.8 e Tabela 6.4, o período de inspeção é igual ao período obtido por modelo proposto. Portanto, com esses resultados de análise pode se observar que a variação do período de inspeção obtido na análise de sensibilidade em relação aos resultados gerados pelo modelo é insignificante, isto é, a variação dos parâmetros analisados não afeta gravemente o modelo ou o modelo não se mostra sensível em relação à

variação dos parâmetros de entrada. Por isso, o resultado obtido é robusto e aceitável, o modelo proposto mostra-se viável, com um período ótimo de inspeção e manutenção preventiva do pavimento asfáltico de 15 dias ($\tau^* = 15$).

Se a “Operação Tapa-Buraco” cumprir com as hipóteses do modelo proposto, então, para minimizar os custos de manutenção da via em estudo, deve propor um período de inspeção e manutenção preventiva de 15 dias, diferente do período de 8 a 9 dias atualmente praticada na via, para inspecionar e levantamento das medidas dos buracos sem contar com a manutenção preventiva. A política proposta consiste em no período de 15 dias o fiscal junto com a equipe de manutenção devem se deslocar na via para fazer a fiscalização e eventual manutenção preventiva se for preciso.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em situação do mundo real, as inspeções não podem revelar todos os defeitos presentes em um sistema, especialmente para sistemas complexos. Além disso, a qualidade das inspeções realizadas depende de técnicas de inspeção usadas, experiência e treinamento dos técnicos. De acordo com Almeida (2013), todos os modelos são errados, mais a ideia de modelagem é buscar um modelo que seja mais útil e próximo do mundo real do problema. Este capítulo visa discutir alguns aspectos básicos relacionado com aceitação do modelo proposto ao problema, como pode se expandir para outras vias da cidade do Recife e outras cidades do País no geral, bem como explicar as suas limitações, e sugerir trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

As abordagens do modelo DTM vieram dar um passo gigantesco nas políticas de manutenção em particular na política de Inspeção, sendo que, hoje é possível aplicação do modelo para diversos problemas. Ao longo desta pesquisa encontrou-se várias aplicações do modelo, mas não foi encontrado nenhum registro do modelo aplicado nos pavimentos. Apesar de ser o mesmo modelo desenvolvido por Jones *et al.* (2009), mas foi aplicado na indústria de Produção do Carbono e foi considerado três critérios Custo, Downtime e Impacto Ambiental. A aplicação do Delay Time requer uma clara definição dos estados de operação *normal*, *defeituoso* e do estado *falho* no sistema, bem como é necessário o conhecimento da função distribuição dos tempos de falhas. Grande parte dos trabalhos que aplicam este modelo, para desenvolver uma política de inspeção, utiliza uma distribuição de probabilidade comum, para determinar a função de distribuição do Delay Time.

Existem várias abordagens do modelo DTM citados, mas esta pesquisa considerou a abordagem do modelo básico com inspeção perfeita e taxa de chegada dos defeitos homogêneo por ser mais adequado para este tipo de problema. E a abordagem considerada por este trabalho, foi selecionada com base no tipo do problema a ser modelada, facilidade de interpretação dos dados para parâmetros de entrada.

O departamento de transporte urbano precisa traçar um planejamento estratégico com a elaboração de uma política de manutenção dos pavimentos de uma cidade, com o

estabelecimento da qualidade aceitável desses pavimentos e, conseqüentemente, a determinação do período da realização dos serviços da fiscalização e manutenção durante um horizonte de tempo. Para isso, o uso de modelos, em especial o modelo proposto DTM, é uma ferramenta útil no traçado dessa estratégia e na tomada de decisões.

No estudo de caso para testar a validade do modelo apresentado nesta pesquisa, os dados referentes a custo variável de prevenção (defeito) e reparo (falha), foram obtidos referentes à tabela de preços para contratação de obras e serviço de engenharia, os mesmos custos são aplicados para todas as vias da cidade de Recife, por que todas as vias da cidade fazem parte da “Operação Tapa-Buraco”. A determinação da taxa de chegada do defeito é aplicável para todos os pavimentos asfálticos, os custos de fiscalização e de inconveniência, e custo fixo são aplicáveis para todas as vias da cidade do Recife. Portanto, o modelo proposto pode ser estendido para outras vias da cidade de Recife.

A “Operação Tapa-Buraco” é uma política de conservação do pavimento urbano, essa política é aplicada em várias cidades Brasileiras, com objetivo de reparar os buracos dos pavimentos em decorrência da ação do tráfego, chuvas, falhas de execução etc, para aplicar o modelo proposto nas outras cidades seria necessário verificar os parâmetros custos de inspeção, de manutenção preventiva e corretiva do modelo proposto para ver se adequa se para outras cidades, caso não, poderá se usar novos valores dos parâmetros para obter novos resultados.

Para a EMLURB aplicar o modelo proposto na “Operação Tapa Buraco”, deve reformular a política de Tapa Buraco praticada atualmente, nos seguintes pontos: definição de limite mínimo aceitável de um buraco que não afeta a circulação normal dos veículos (defeito) em $0,09 \text{ m}^2$ e limite máximo que o buraco compromete o tráfego na via em $1,5 \text{ m}^2$, os defeitos identificados na fiscalização devem ser corrigidos imediatamente, a manutenção de defeitos e falhas deve ser feita, e também deve se aplicar multas à prefeitura ou as empresas responsáveis pela manutenção e conservação das vias no caso de deixar um defeito falhar, as inspeções devem ser preventivas, isto é, inspecionar e fazer manutenção preventiva ao mesmo tempo.

O trabalho limitou-se em modelar um tipo de defeito (buracos) dos pavimentos asfálticos, por ser um defeito considerado mais preocupante nas vias urbano, em particular na cidade de Recife, também foi considerado pelo modelo que o processo de aparecimento do defeito nos pavimentos é homogêneo. O objetivo do trabalho foi de reduzir o custo de

manutenção das vias da cidade de Recife, sem olhar para outros fatores e critérios, como surgimento do defeito nas épocas sazonais e vias com mais tráfego, qualidade do serviço da manutenção, confiabilidade, o tempo de paralização da via (downtime) e outros. Durante a pesquisa, foi difícil fazer entender a linguagem e os parâmetros do modelo para os técnicos de manutenção. Por causa da insuficiência dos dados e dificuldade dos técnicos em entender os parâmetros do modelo, foi obrigado a arbitrar alguns parâmetros (custo de inspeção, custo fixo e custo de inconveniência) de acordo com as diretrizes oferecidas pelos técnicos nas entrevistas. E a insuficiência dos dados para testar o modelo, constituiu a maior dificuldade encontrada nesta pesquisa.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento e aprofundamento do que foi estudado por este trabalho, sugeri-se que possam ser exploradas mais as abordagens do modelo DTM na aplicação dos pavimentos, para definição de uma política de manutenção mais ampla e abrangente, que considera mais de um defeito dos pavimentos, taxa de chegada de defeitos em períodos sazonais e em rodovias com diferentes tipos de tráfego, e com os critérios confiabilidade, tempo de paralização da via para manutenção (downtime), qualidade do serviço da manutenção e o Custo. Sugeri-se também que seja aplicado um método de decisão multicritério para arbitragem dos conflitos entre os critérios. E por causa das dificuldades das empresas e técnicos da manutenção de entender a linguagem do modelo e insuficiência dos dados, sugeri-se que a coleta dos dados seja feita em duas fases: na primeira fase, coletar os dados existentes, e na segunda fase, onde dependendo dos dados encontrados na fase anterior, selecionar pavimentos amostrais (tendo em conta os fatores tráfego e épocas sazonais), para monitoramento durante 12 meses no mínimo, depois um questionário para os técnicos de manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKBAROV, A., CHRISTER, A. I. H. & WANG, W. Problem Identification In Maintenance Modelling: A Case Study. *International Journal Of Production Research*, 46(4): 1031-1046, 2008,
- ALMEIDA, T. A. *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*, São Paulo: Atlas, 2013.
- ALMEIDA, A. T. & SOUZA, F. M. C. *Gestão da Manutenção – Na Direção da Competitividade*. Editora Universitária, UFPE, 2001.
- ALMEIDA, A. T., FERREIRA R. J. P., & CAVALCANTE, C. A. V. A review of the use of multicriteria and multi-objective models in maintenance and reliability, *IMA Journal of Management Mathematics*, 26: 249–271, 2015.
- ALMEIDA, A. T., CAVALCANTE, C. A. V., ALENCAR, M. H., FERREIRA, R. J. P., ALMEIDA-FILHO, A.T. & GARCEZ, T.V. Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis, *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 7207/82, *Definição de Pavimento - Especificação*. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 5462, *Confiabilidade e Manutenibilidade – terminologia*. Rio de Janeiro, 1994.
- BAKER, R. The utility of a maintenance policy, In: 6th IMA INTERNATIONAL CONFERENCE (MIMAR2007), Manchester, United Kingdom, 10-11 September 2007, *Proceedings*. The Lowry Centre, Salford Quays, 2007, 63-67.
- BAKER, R. D. & WANG, W. Estimating the delay time distribution of faults in repairable machinery from failure data, *IMA J. IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, 3(4): 259-282, 1991

- BAKER, R. & WANG, W., 1993, Developing and testing the delay time model, *Journal of Operational Research Society*, 44(4): 361-374, 1993
- BAKER, R. D., SCARF, P. A. & WANG, W. A delay-time model for repairable machinery: maximum likelihood estimation of optimum inspection intervals, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, 8(1): 83-92, 1997.
- BARLOW, R.E. & PROSCHAN, F. *Mathematical Theory of Reliability*, New York: Wiley, 1965.
- BARLOW, R. E., HUNTER, L. C. & PROCHAN, F. Optimum Checking Procedures, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(4): 1078-1095, 1963.
- BASHIRI, M., BADRI, H. & HEJAZI, T. H. Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method, *Applied Mathematical Modelling*, 35: 152-164, 2011.
- BERNUCCI, L. MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P. & SOARES J. B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2006.
- BEN-DAYA, M., DUFFUAA, S. O. & RAOUF, A. *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. London: Springer, 2009.
- BIROLINI, A. *Reliability Engineering: Theory and Practice*. 3^a Edition, New York, Springer-Verlag, 1999.
- BRITO, A. J. M. & ALMEIDA, A. T. Multicriteria decision model for selecting maintenance contracts by applying utility theory and variable interdependent parameters, In: 6th IMA INTERNATIONAL CONFERENCE (MIMAR2007), Manchester, United Kingdom, 10-11 September 2007, *Proceedings*. The Lowry Centre, Salford Quays, 2007, 74-79.
- BROVARNYI, D. P. Road Maintenance Planning Model Based on Neural Networks, *Automation and Remote Control*, 72(6): 1333–1337, 2011.
- CARTER, A. D. S. *Mechanical Reliability*. 2^a Edition, London, Macmillan, 1986.

- CHRISTER, A. H. Modelling inspection policies for building maintenance. *Journal of the Operational Research Society*, 33(8): 723–732, 1982.
- CHRISTER, A. H. Delay-time model of reliability of equipment subject to inspection monitoring, *Journal of the Operational Research Society*, 38(4): 329-334, 1987.
- CHRISTER, A. H. Prototype modelling of irregular condition monitoring of production plant, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry*, 3(3): 219-232, 1992.
- CHRISTER, A. H. Developments in delay time analysis for modelling plant maintenance, *Journal of Operational Research Society*, 50(11): 1120-1137, 1999.
- CHRISTER, A. H. & LEE, C. Refining the delay-time-based PM inspection model with non-negligible system downtime estimates of the expected number of failures, *International Journal of Production Economics*, 67(1), 77-85, 2000.
- CHRISTER, A. H. & REDMOND, D. F. A recent mathematical development in maintenance theory, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 2(2): 97-108, 1989.
- CHRISTER, A. H. & REDMOND, D. F. Revising models of maintenance and inspection. *International Journal of Production Economics*, 24(3): 227-234, 1992
- CHRISTER, A. H., WALLER, W. M. Delay time models of industrial inspection maintenance problems, *Journal of the Operational Research Society*, 35(5): 401-406, 1984a.
- CHRISTER, A. H. & WALLER, W. M. An operational research approach to planned maintenance: modelling P.M. for a vehicle fleet, *Journal of the Operational Research Society*, 35(11): 967-984, 1984b.
- CHRISTER, A. H. & WANG, W. A delay time based maintenance model of a multi-component system, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 6(2): 205-222, 1995.
- CHRISTER, A. H., LEE, C. & WANG, W. A data deficiency based parameter estimating problem and case study in delay time PM modelling, *International Journal of Production Economics*, 67(1): 63- 76, 2000.

CHRISTER, A. H., WANG, W., BAKER, R. D. & SHARP, J. Modelling maintenance practice of production plant using the delay time concept, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 6(1): 67-83, 1995.

CHRISTER, A. H., WANG, W., CHOI, K., & SHARP, J., 1998, Modelling the preventive maintenance element of total productive maintenance: imperfect PM with incomplete repair, *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 9: 355 – 380, 1998.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT, Pesquisa CNT de rodovias: relatório gerencial, Brasília, 2014.

CSENKI, A. Stochastic demand patterns for Markov service facilities with neutral and active periods, In: 6th IMA INTERNATIONAL CONFERENCE (MIMAR2007), Manchester, United Kingdom, 10-11 September 2007, *Proceedings*. The Lowry Centre, Salford Quays, 2007, 68-73.

DESA, M. I. & CHRISTER, A. H., 2001, Modelling in the absence of data: case of study of fleet maintenance in a developing country, *Journal of Operational Research Society*, 52(3): 247 – 260, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 005/2003 – TER, *Defeitos nos pavimentos flexíveis e Semi-Rígidos*, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 006/2003 – PRO, *Avaliação objetiva da superfície de pavimentos asfálticos*, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 007/2003 – PRO, *Levantamento para avaliação da condição de superfície de sub trecho homogêneo de rodovias de pavimento flexível e Semi-Rígido para gerência de pavimentos e estudos e projetos*, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 008/2003 – PRO, *Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos asfálticos*, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 009/2003 – PRO, *Levantamento para avaliação subjetiva da superfície do pavimento asfálticos*, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 060/2004 – PRO, *Inspeção visual nos pavimentos Rígidos*, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 061/2004 – TER, *Defeitos nos pavimentos Rígidos*, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 062/2004 – PRO, *Avaliação Objetiva dos pavimentos Rígidos*, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 063/2004 – PRO, *Avaliação Subjetiva dos pavimentos Rígidos*, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 067/2004 – ES, *Reabilitação, Especificação de serviço nos pavimentos Rígidos*, Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, *Manual de Pavimentação*, 3a edição, Rio de Janeiro, Publicação IPR. 719, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, *Manual de Restauração de Pavimento Asfálticos*, Rio de Janeiro, Publicação IPR. 720, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT, *Manual de Restauração de Pavimento Rígidos*, Rio de Janeiro, Publicação IPR. 737, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-ES 173/86, *Métodos de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade, tipo resposta*. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-PRO 164/94, *Calibração e Controle do Sistema Medidor de Irregularidade da Superfície do Pavimento*, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-PRO 182/94, *Medição da Irregularidade da Superfície de Pavimento com Sistemas Medidores*, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-PRO 229/94, *Manutenção de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento*, Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER 036/95, *Cimento Portland – Recebimento e Aceitação*. Rio de Janeiro, 1995.

DHILLION, B. S. *Engineering maintenance, a modern approach*. New York: CRC Press, 2002.

EMAMI-MEHRGANI, B., NEUMANN, W. P., NADEAU, S. & BAZRAFESHAN, M. Considering human error in optimizing production and corrective and preventive maintenance policies for manufacturing systems, *Applied Mathematical Modelling*, 40(3): 2056-2074, 2016

EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA – EMLURB, *Tabela de preços para contratação de obras e serviços de engenharia*, Recife - PE, 2014. Disponível em: <<http://www.recife.pe.gov.br/emlurb/eosei/tabela.php>> A cessado 20 de Novembro de 2015

FENG, Q. Reliability and condition-based maintenance for multi-stent systems with stochastic-dependent competing risk processes, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 80(9): 2027–2040, 2015

FERREIRA, A. B. H. *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*, Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1994.

FERREIRA, R. J. P., CAVALCANTE, C. A. V. & ALMEIDA, A. T. A preventive maintenance decision model based on a MCDA approach, IN: 6th IMA INTERNATIONAL CONFERENCE (MIMAR2007), Manchester, United Kingdom, 10-11 September 2007, *Proceedings*. The Lowry Centre, Salford Quays, 2007, 29-34

FLAGE, R., 2014, A delay time model with imperfect and failure-inducing inspections, *Reliability Engineering and System Safety*, 124: 1-12, 2014.

- FOGLIATTO, F. S. & RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade E Manutenção Industrial*, 1ª Edição, Brasil, Elsevier, 2009.
- GAN, S., ZHANG, Z., ZHOU, Y. & SHI, J. Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system, *Applied Mathematical Modelling*, 39(19): 6032-6042, 2015.
- GASPAR, L. *Avenida Caxangá, Recife, PE. Pesquisa Escolar Online*, Fundação Joaquim Nabuco, Recife, 2009. Disponível em: <<http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar>>. Acesso em: 10 de Agosto 2015.
- HORA, M. The unglamorous game of managing maintenance, *Business Horizons*, (May–June), 1987.
- JIA, X. & CHRISTER, A. H. Case experience comparing the rcm approach to plant maintenance with a modelling approach, *Case Studies in Reliability and Maintenance*, 477 – 494, 2003.
- JONES, B., JENKINSON, I. & WANG., J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry, *Reliability Engineering and System Safety*, 94:111-124, 2009
- KUO, C. C. & KE, J. C. Comparative analysis of standby systems with unreliable server and switching failure, *Reliability Engineering & System Safety*, 145: 74-82, 2016.
- LOPES, R. S., CAVALCANTE, C. A. V. & ALENCAR, M. H. Delay-time inspection model with dimensioning maintenance teams: A study of a company leasing construction equipment, *Computers & Industrial Engineering*, 88: 341–349, 2015
- LV, W. & WANG, W. Modelling preventive maintenance based on the delay time concept in the context of a case study. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 3: 5-11, 2011.
- MELO, I. D. F. et al., Estudo de áreas urbanas sob risco de alagamento: uma modelagem com realidade virtual, *UFPE. IPAD. Prefeitura de Ipojuca*, 2003
- MOUBRAY, J. *Reliability Centered Maintenance*, 2ª Edition, Woodbine NJ, Industrial Press Inc, 1997.

MUNFORD, A.G. & SHAHANI, A. K., 1972, A nearly optimal inspection policy, *Operational Research Quarterly*, 23(3): 373-397, 1972.

MUNFORD, A.G. & SHAHANI, A. K. An inspection policy for the weibull case. *Operational Research Quarterly*, 24(3): 453-458, 1973.

OKUMURA, S. An inspection policy for deteriorating processes using delay-Time Concept. *International Transactions in Operational Research*, 4(5-6): 365-375, 1997.

OKUMURA, S., JARDINE A. K. S. & YAMASHINA H. An inspection policy for a deteriorating single unit system characterized by a Delay-Time model, *International Journal of Production Research*, 34(9): 2441-2460, 1996.

PATTON, Jr. & JOSEPH D. Preventive maintenance. *Instrument Society of America*, 1983.

PELLEGRIN, C. A graphical procedure for an on-condition maintenance policy: imperfect inspection model and interpretation. *IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 3(3): 177-191, 1992.

PILLAY, A., WANG, J. & WALL, A. Optimal inspection period for fishing vessel equipment: a cost and down time model using delay time analysis. *Marine Technology SNAME*, 38(2): 122–129, 2001.

PINJALA, S. K., PINTELON, L. & VEREECKE, A. An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies”, *International Journal Of Production Economics*, 104(1): 214-229, 2006.

SHEU, S., TSAI, H., WANG, F. & ZHANG, Z. An extended optimal replacement model for a deteriorating system with inspections, *Reliability Engineering & System Safety*, 139: 33–49, 2015.

SIQUEIRA, I. P. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação*. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2005.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA CAPITAL – SUDECAP, Manual prático de Operação Tapa Buracos, Belo Horizonte: Secretaria Municipal de obras e infraestrutura, 2011.

- TANG, Y., JING J. J., YANG, Y. & XIE, C. Parameter estimation of a delay time model of wearing parts based on objective data, *HPC Mathematical Problems in Engineering*, 2015: p. 8, 2015.
- TAVARES, L. A. *Controle de Manutenção por Computador*. Rio de Janeiro, Técnica, 1987.
- TAVARES, L. A., *Administração Moderna da Manutenção*. Rio de Janeiro: Novo Polo, 1999.
- VAN OOSTEROM, C. D., ELWANYB, A. H., ÇELEBIC, D., & VAN HOUTUM G.J. Optimal policies for a delay time model with postponed replacement, *European Journal of Operational Research*, 232(1): 186-197, 2014.
- VIANA, H. R. G. *Planejamento e controle da manutenção*, 1ª Edição, Rio de Janeiro, Qualitymark, 2002.
- WENBIN, W, ZHAO, F. & PENG, R. A preventive maintenance model with a two-level inspection policy based on a three-stage failure process, *Reliability Engineering & System Safety*, 121: 207–220, 2014.
- WANG, L. et al. The availability model and parameters estimation method for the delay time model with imperfect maintenance at inspection. *Applied Mathematical Modelling*, 35(6): 2855-2863, 2011.
- WANG, W. *Delay Time Modelling*, In: Complex system maintenance handbook, Springer, 345 – 370, 2008.
- WANG, W. An inspection model for a process with two types of inspections and repairs, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2): 526-533, 2009a.
- WANG, W. Modelling planned maintenance with non-homogeneous defect arrivals and variable probability of defect identification. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2(46): 73-78, 2010.
- WANG, W. An inspection model based on a three-stage failure process, *Reliability Engineering and System Safety*, 96(7): 838-848, 2011.

WANG, W. An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling, *Reliability Engineering and System Safety*, 106: 165-178, 2012.

WANG, W. & CHRISTER, A. H. Solution algorithms for a multi-component system inspection model, *Computers and Operational Research*, 30(1): 19-34, 2003.

WERBIŃSKA-WOJCIECHOWSKA S. & ZAJĄC P. Use of delay-time concept in modelling process of technical and logistics systems maintenance performance. Case study. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance And Reliability*, 17 (2): 174–185, 2015

WORLD ECONOMIC FORUM, 2014, *The Global Competitiveness*, Report 2014-2015. Geneva, Switzerland.

ZHAO J., CHAN, A. H. C., ROBERTS, C. & MADELIN, K. B. 2007, Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. *Reliability Engineering and Systems Safety*, 92(1): 65-73, 2007.

ZHANG, X. & GAO, H. Road maintenance optimization through a discrete-time semi-Markov decision process, *Reliability Engineering and System Safety*, 103: 110–119, 2012.

ANEXO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PPGEP - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Recife, 18 de agosto de 2015.

ypr em 20/08/15
413580 - ypr

OFÍCIO CIRCULAR Nº04/2015-PPGEP

Da: Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFPE

Ao: Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana – EMLURB

Presidente: Antônio Barbosa

Diretora: Fernanda Batista

Diretor Executivo de Pavimentação: Elie Tozzi

Solicitamos a Vossa Senhoria autorização para que nosso aluno **ARMANDO MUCHANGA**, portador do CPF 708.144.214-58, regularmente matriculado neste Programa de Pós-Graduação, possa ter acesso às dependências dessa conceituada instituição, necessários para o desenvolvimento de sua Dissertação de Mestrado Acadêmico em Engenharia de Produção desta Universidade, sob a orientação do Prof. Adiel Teixeira de Almeida Filho.

O aluno precisará desta superintendência a disponibilização de dados referentes ao Projeto TAPA-BURACOS da Avenida Caxangá ou outra com extensão aproximado de 5km, desenvolvido nos últimos 2 ou 3 anos, incluindo:

1. Mapa Topográfico da Avenida;
2. Datas de início e término de levantamento dos buracos, o número dos buracos identificadores e se possível a localização dos mesmos e os gastos pelo transporte, pagamento dos técnicos etc, por item de serviço;
3. Datas de início e término da manutenção corretiva dos buracos identificados e o custo da manutenção, por item do serviço;
4. Se possível os dados referente ao custo total e tempo necessário para reconstruir a Avenida.

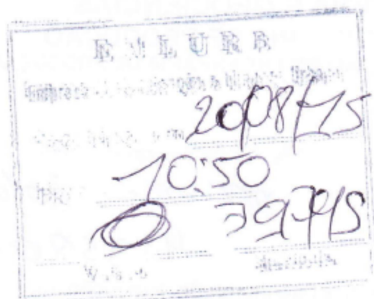
Esclarecemos que a finalidade da coleta é viabilizar a análise dos dados, **que serão utilizados de forma confidencial**, para a elaboração de sua Dissertação.

Certos de contarmos com o apoio de Vossa Senhoria, colocamo-nos à disposição para quaisquer esclarecimentos necessários.

Atenciosamente,

Danielle Costa Morais
Profª Danielle Costa Morais
Coordenadora do PPGEP/UFPE
UFPE Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PPGEP - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Fone: 2126-8728 Ramal 2
e-mail: ppgepscc@gmail.com



À GGP,

Atender, dentro do possível, o pleito.

A#;

Prazo: 02/09/15

Elie Tozzi
EMLURB
Diretor Executivo de Pavimentação
Mat. 71.337-6

À GGP,
Pare análise e despacho.
comp. pto.

20/08/15

Antonio Barbosa de Siqueira Neto
Diretor Presidente

RECIBO Dm
EM 21/08/15
HORA 1
assinatura [assinatura] matricula

À DEP,
Pare análise.

[assinatura]

21.08.15

Fernandha Batista
Diretora de Manutenção
Urbana

DVDP
Recebido
Em, 21/08/15

À GOMT 45.

Juliana,

conversar com o
antes de repassar
as informações.

[assinatura]
25/08/15.

Isabela C. de Albuquerque Melo Gomes
Gerente Geral de Planejamento

À DVPL (tatiene).

Segue informações
colhidas nessa.

Gerência.

Obs: Foi enviado
por email para
tatiene.

Juliana
Juliana Lins Avelar
Gerente Drenagem e Pavimentação RPS 4.3
Matricula 71352-0
08/09/2015

DVDP
Recebido
Em, 08/09/15