

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUIZ CARLOS DOMICIANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO PARA
RODEIROS DE LOCOMOTIVAS**

JUIZ DE FORA
2014

LUIZ CARLOS DOMICIANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO PARA
RODEIROS DE LOCOMOTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. D.Sc. Fernando M. A. Nogueira

JUIZ DE FORA
2014

Domiciano, Luiz Carlos.

Estudo Comparativo de Políticas de Manutenção para Rodeiros de Locomotivas / Luiz Carlos Domiciano. -- 2014.
104 p.

Orientador: Fernando M. A. Nogueira

Coorientador: Luiz Henrique D. Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2014.

1. Inferência Estatística. 2. Política de Manutenção. 3. Simulação. 4. Engenharia de Manutenção. I. Nogueira, Fernando M. A., orient. II. Alves, Luiz Henrique D., coorient. III. Título.

LUIZ CARLOS DOMICIANO

**ESTUDO COMPARATIVO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO PARA
RODEIROS DE LOCOMOTIVAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em ____ de _____ de 2014.

BANCA EXAMINADORA

D.Sc., Fernando M. A. Nogueira
Universidade Federal de Juiz de Fora

D.Sc., Luiz Henrique Dias Alves
Universidade Federal de Juiz de Fora

D.Sc., Roberto Malheiros Monteiro Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Nenhum dos desafios enfrentados, nenhuma das conquistas e nada do que foi construído tem sentido se não pelas pessoas que dão sentido à minha vida, que importam a mim mais que tudo. Agradeço profundamente à minha mãe, Olímpia, com a qual aprendi sobre a prática do amor incondicional e da resiliência diante das dificuldades que nos são impostas pela vida; a meu pai Luiz, que me desafiou a praticar a empatia e repensar meus ideais e valores mais importantes; a meu irmão Dudu, que foi um farol pelo qual me guiei, a quem tomei por exemplo no caráter, no comportamento e até mesmo nos gostos; a meu irmão Juninho, que temperou minha personalidade e visão de mundo com a humanidade que todo humano deveria ter; à minha irmã Dayane, meu melhor exemplo sobre como o propósito com amor podem mudar toda uma vida.

Sou grato e cada vez mais apaixonado pela minha esposa Fabiana, com a qual decidi compartilhar meu amor e minha vida. Meu “muito obrigado” a meus colegas de faculdade, que parecem ter sido escolhidos a dedo há 5 anos atrás, para uma experiência da qual nunca nos esqueceremos; aos meus professores, mestres, que me fizeram acreditar ainda mais no papel transformador da educação; e aos meus ex e atuais colegas de trabalho e de profissão, para os quais quero continuar dando meu melhor, e contribuir sempre para seu crescimento.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo consolidar uma metodologia para a identificação de quais são os critérios que constituem uma política de manutenção para rodeiros de locomotiva para melhores custos por quilometro rodado. Com esse propósito, a partir da fundamentação teórica que envolve o tema e do uso extenso das bases de dados de medições de campo dos rodeiros de locomotivas GE-AC44MIL que operam na malha ferroviária de Minas Gerais e Rio de Janeiro, pela MRS Logística S/A, são modeladas, no *software* Minitab, as taxas de desgaste probabilísticas e determinísticas necessárias para a simulação, no *software* Arena, dos resultados de custos para diferentes combinações de políticas de manutenção de rodeiros. São identificadas, finalmente, as bases a partir das quais torna-se possível, se não necessário, o aprofundamento e aprimoramento do atual trabalho em pontos chave para garantir sua real aplicação e conseqüente geração de valor.

Palavras-chave: Inferência; Política de Manutenção; Engenharia de Manutenção; Simulação

ABSTRACT

This work aims to consolidate a methodology for identifying what are the criteria that constitute a maintenance policy for locomotive wheel sets for better cost per kilometer. For this purpose, from the theoretical foundation that involves the subject and the extensive use of field measurements of databases of wheel sets of GE-AC44MIL locomotives operating in the rail network of Minas Gerais and Rio de Janeiro, by MRS Logística S/A, probabilistic and deterministic wear rates necessary for the simulation in *software* Arena are modeled in the *software* Minitab, for results about costs of wheel sets for different combinations of maintenance policies. Finally, the starting point from which it is possible, if not necessary, the deepening and improvement of the current work at key points are identified, to ensure their effective implementation and consequent value creation.

Keywords: Inference; Maintenance Policy; Maintenance Engineering; Simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Identificação dos Rodeiros da Locomotiva (por posição)	23
Figura 2 - Input de Dados de Medição no Oracle cMRO	23
Figura 3 - Gabarito para Medição dos Parâmetros de Controle do Rodeiro	24
Figura 4 - Procedimento para Medição de Bandagem do Rodeiro	24
Figura 5 - Procedimento para Medição de Espessura do Friso	25
Figura 6 - Ferramenta para Fresamento de Rodeiro de Locomotiva.....	27
Figura 7 - Alteração no Perfil do Rodeiro por Reperfilamento com Sulco Testemunha	27
Figura 8 - Efetividade de Custo de um Sistema	30
Figura 9 - Curva da Banheira para Caracterização de Taxas de Falhas do Ciclo de Vida	35
Figura 10 - Função de Probabilidade Cumulativa Lognormal	37
Figura 11 - Gráfico da Função de Risco Lognormal.....	38
Figura 12 - Gráfico de Densidade de Probabilidade Gama.....	38
Figura 13 - Gráfico de Probabilidade Cumulativa Gama.....	39
Figura 14 - Gráfico de Função de Risco Gama	40
Figura 15 - Distribuição de Probabilidade Exponencial	40
Figura 16 - Função Cumulativa de Probabilidade Exponencial.....	41
Figura 17 - Função de Confiabilidade Exponencial	41
Figura 18 - Função de Risco Exponencial.....	42
Figura 19 - Função de Densidade de Probabilidade Weibull.....	43
Figura 20 - Função de Risco Weibull (Fonte: NELSON, 1982).....	44
Figura 21 - Base de Dados de Medição de Rodeiros	51
Figura 22 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas de Desgaste de Bandagem.....	54
Figura 23 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas de Desgaste de Espessura	54
Figura 24 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas de Desgaste de Altura.....	55
Figura 25 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas Tratadas (Bandagem)	56

Figura 26 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas Tratadas (Espessura)	56
Figura 27 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas Tratadas (Altura)	57
Figura 28 - Operação de Locomotivas AC44MIL em Dupla Seta (Fonte: VIANNA, 2012)	60
Figura 29 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados de BD1	61
Figura 30 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados BD2	62
Figura 31 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados BD3	63
Figura 32 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados EF1	64
Figura 33 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados EF2	65
Figura 34 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados EF3	66
Figura 35 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados AF1	67
Figura 36 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados AF2	68
Figura 37 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados AF3	69
Figura 38 - Modelo de Simulação em Arena para Política de Manutenção de Referênci	72
Figura 39 - Processo <i>Assign</i> "NOVO" no Arena para medidas de rodeiro novo	72
Figura 40 - Processo <i>Assign</i> "OPERAC_PROB" para simulação do desgaste dos parâmetros do rodeiro decorrentes de 1000 km de operação	73
Figura 41 - Processo <i>Decide</i> "SUBSTITUIÇÃO" para decisão de substituição de rodeiros	73
Figura 42 - Início da Árvore de Simulação para Políticas de Manutenção de Rodeiros	74
Figura 43 - Árvore de Decisão e Registro de Substituição de Rodeiros ...	75
Figura 44 - Árvore de Decisão e Registro para Fresamento por Altura de Friso	76
Figura 45 - Processo <i>Decide</i> para decisão de fresamento de rodeiro por altura de friso	76
Figura 46 - Alteração nos parâmetros após fresamento por altura de friso segundo política 001	77

Figura 47 - Processo <i>Decide</i> para necessidade de equalização de rodeiros com o rodeiro 1.....	77
Figura 48 - Alteração nos parâmetros após fresamento para equalização com rodeiro 1	78
Figura 49 - Árvore de Decisão e Registro para Fresamento por Espessura de Friso	79
Figura 50 - Árvore de Decisão e Registro para Inversão de Rodeiros	79
Figura 51 - Critério de Decisão para Inversão de Rodeiros	80
Figura 52 - Trecho Final de um Passo de Simulação	80
Figura 53 - Resultado para Melhor Altura de Friso para Fresamento.....	82
Figura 54 - Resultado para Melhor Espessura de Friso Inicial para Fresamento	83
Figura 55 - Resultados para Melhor Espessura de Friso Final Após Fresamento	84
Figura 56 - Resultado para Melhores Políticas em Relação à Prática de Inversão de Rodeiros.....	86
Figura 57 - Diagrama Esquemático da Malha Ferroviária MRS Logística S/A (Fonte: MRS, 2008)	90
Figura 58 - Árvore de Decisão de Manutenção para Rodeiros de Locomotivas	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referências de Limites para Fresamento de Rodeiros (Fonte: MRS Logística S/A, 2007).....	26
Tabela 2 - Sumário Estatístico das Séries de Dados por Posição e Parâmetro	58
Tabela 3 - Sumário Estatístico das Séries de Dados Ajustados por Posição e Parâmetro.....	59
Tabela 4 - Resultados para Melhor Altura de Friso por Simulação Determinística...	83
Tabela 5 - Resultados para Melhor Espessura de Friso Inicial por Simulação Determinística.....	84
Tabela 6 - Resultados para Espessuras de Friso Finais em relação a Espessuras Iniciais	85
Tabela 7 - Resultados para Espessuras de Friso Finais e Iniciais por Simulação Determinística.....	85
Tabela 8 - Resultado para Inversão de Rodeiros por Simulação Determinística	86
Tabela 9 - Políticas de Manutenção Alternativas para Simulação de Custo/km Rodado.....	91

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	19
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. A ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO	22
2.1 POLÍTICA E MÉTODOS DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS DE LOCOMOTIVAS E SEUS FUNDAMENTOS	22
2.1.1 CARACTERÍSTICAS DO MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO DOS RODEIROS	23
2.1.2 PARÂMETROS DE MANUTENÇÃO DOS RODEIROS.....	26
2.2 EFETIVIDADE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM COMPONENTE PELA ÓTICA DA DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE	28
3. ANÁLISE ESTATÍSTICA E DE OTIMIZAÇÃO	31
3.1 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA A ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DE VARIÁVEIS ALEATÓRIAS	31
3.1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE.....	33
3.1.2 DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL	35
3.1.3 DISTRIBUIÇÃO GAMA	38
3.1.4 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL	40
3.1.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	42
3.1.6 TESTE DE ADERÊNCIA DE ANDERSON-DARLING	44
3.2 A PESQUISA OPERACIONAL COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE RESULTADOS	45
3.3 MODELOS DE COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE RODEIROS POR DISTÂNCIA DE ROLAMENTO.....	46

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS	50
4.1 DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE DESGASTE PARA ALTURA, BANDAGEM E ESPESSURA DE FRISO DOS RODEIROS	50
4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DAS LOCOMOTIVAS AC44MIL DA MRS LOGÍSTICA S/A .	50
4.1.2 TRATAMENTO DA BASE DE DADOS HISTÓRICA DE MEDIÇÃO DE RODEIROS EM MICROSOFT EXCEL® E ANÁLISE DE DADOS COM MINITAB®	51
4.2 SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS DE LOCOMOTIVAS	70
4.2.1 MODELAGEM DE TOMADA DE DECISÃO DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS NO ARENA®	70
4.2.2 SIMULAÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO COM TAXAS DETERMINÍSTICAS E PROBABILÍSTICAS	80
5. RESULTADOS.....	82
6. CONCLUSÃO	87
7. REFERÊNCIAS	88
8. ANEXOS.....	90
8.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA MALHA FERROVIÁRIA MRS LOGÍSTICA S/A	90
8.2 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO ALTERNATIVAS PARA SIMULAÇÃO.....	91
8.3 ÁRVORE DE DECISÃO DE MANUTENÇÃO PARA SIMULAÇÃO NO ARENA®.....	94
8.4 DECLARAÇÃO DA EMPRESA.....	95
8.5 TERMO DE AUTENTICIDADE	96

1. INTRODUÇÃO

O aumento na competitividade de cadeias de produção concorrentes entre si em todo o mundo vem ocorrendo por meio da adoção de técnicas, métodos e processos capazes de aumentar a produtividade das empresas (ALVES, 2000). Isso é possível tanto quando se amplia a produção de bens e serviços, bem como quando se reduzem os custos de recursos e insumos necessários à sua produção. O investimento em processos capazes de “fazer mais por menos” se justifica por benefícios que além de atenderem à necessidade de lucro das empresas - quando os produtos chegam ao consumidor final com um preço pelo qual ele pode pagar -, também tornam mais sustentáveis suas operações, reduzindo os impactos ambientais e/ou sociais decorrentes de suas atividades (DING, 2013).

A partir desse contexto, associado à oportunidade de trabalho no Planejamento de Manutenção de Locomotivas da MRS Logística S/A, que foi identificada a oportunidade de elaboração um modelo para otimização da tomada de decisão de manutenção de rodeiros das locomotivas, com o objetivo de minimização do custo por quilometro rodado do rodeiro. Com sua manutenção atualmente baseada em medidas reativas e em um trabalho de planejamento baseado em altas margens de erros (VIANNA, 2012), os rodeiros são atualmente direcionados para correção quando, já dentro de oficina, são identificadas medidas críticas para operação, condições tais que acarretam um nível de assertividade empírica que chega a apenas 17% em relação às reais necessidades de manutenção.

Os resultados do presente trabalho foram obtidos integralmente por meio dos estudos e trabalho nas bases de dados de medições de rodeiros da referida empresa, ao longo de um ano de operação ferroviária das locomotivas GE-AC44, que circularam no ciclo do minério, na ferrovia do aço e linha do centro, entre Minas Gerais e Rio de Janeiro. Porém, serão decorrentes de uma metodologia capaz de ser aplicada em qualquer outra empresa ferroviária do mundo, que se proponha a aumentar a previsibilidade da manutenção de rodeiros e, em um segundo momento, instituir políticas para otimização de sua vida útil.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As atuais referências técnicas para tomada de decisão sobre a manutenção de rodeiros na empresa na qual o estudo foi realizado são totalmente baseadas em uma documentação técnica editada pela engenharia de manutenção, na qual constam os limites de

aceitação do rodeiro para operação, além das referências para fresamento de rodeiros e inversão (prática apenas recentemente adotada, com o objetivo de estender a vida útil do rodeiro). Tais medidas foram, até então, obtidas a partir de dados empíricos sobre referências de segurança, a partir das quais já ocorreram acidentes durante a operação das locomotivas, e dizem respeito às dimensões de espessura do friso, altura do friso, e largura da bandagem (VIANNA, 2012). A dimensão de diâmetro do rodeiro é a ainda utilizada para comparação entre rodeiros, entre os quais há um limite de diferença de altura que pode causar desgaste acelerado.

A associação das referências de gatilhos de manutenção citados com uma tomada de decisão de manutenção do rodeiro predominantemente reativa, além de com uma tentativa de planejamento de manutenção baseado em projeções com altas margens de segurança fazem com que, hoje em dia, não exista uma previsibilidade segura sobre quais são as demandas de manutenção para rodeiros das locomotivas. Além disso, tal processo de manutenção tem como resultado prático baixa previsibilidade da necessidade de manutenção dos rodeiros, principalmente para horizontes maiores do que 30 dias, tanto pela inexistência de uma ferramenta dedicada a isso, quanto pela baixa confiabilidade do processo de medição de rodeiros, que é atualmente indireta (VIANNA, 2012).

A pesquisa operacional, por outro lado, tem a missão de, conforme define Marins (2011), oferecer “um elenco interessante de áreas, modelos e algoritmos que permitem ao gestor tomar decisão em problemas complexos, onde deve ser aplicada a ótica científica.” O presente projeto tem esse objetivo, qual seja o de tornar mais científica uma decisão de manutenção de rodeiros, que proporcione um custo otimizado, dado o nível de desempenho requerido. Para isso, tem-se como meta projetar qual será o custo do ciclo de vida dos rodeiros para cada modelo de decisão, o que deverá incluir o custo de aquisição do ativo, de operação, operação e manutenção, além do custo da disposição (associado ao custo direto de substituição do rodeiro). Na medida em que o custo do ciclo de vida de um ativo é altamente afetado por sua confiabilidade, que por sua vez decorre de aspectos tais como a frequência de falha e tempo para reparo, e estas são função de tomadas de decisão de manutenção do ativo (MOBLEY, 2008), a modelagem de tais decisões para fins de otimização de custos é plausível.

1.2 JUSTIFICATIVA

O processo de desgaste de rodeiros está recebendo atualmente cada vez mais atenção de fabricantes e operadores. Ambos trabalham no sentido de aumentar a distância de operação total do rodeiro antes que qualquer medida de manutenção, seja de reperfilamento (que reduz a vida do rodeiro), seja de substituição (que encerra a vida do rodeiro), venha a ser adotada. Também devido à intensa competição no mercado e a busca por custos e eficiência operacional cada vez melhores, uma ferramenta capaz de simular o desgaste de rodas seja altamente lucrativa (DING, 2013).

A importância e os benefícios advindos do estudo e desenvolvimento de um modelo de otimização de manutenção de rodeiros de locomotivas e de um modelo de predição de desgaste confiável já são comprovados a partir do conhecimento sobre os altíssimos orçamentos anuais dedicados à reposição de rodeiros que chegam a seu fim de vida em todas as ferrovias do mundo. O mercado de rodeiros de locomotivas, por si só, favorece ao alto poder de barganha dos fornecedores, que são de número bastante reduzido em todo o mundo, principalmente em função da alta tecnologia empregada na produção dos rodeiros, e da ampla curva de conhecimento necessária a um potencial novo entrante nesse mercado (ALVES, 2000). Tais condições tornam as ferrovias mais susceptíveis a altos *lead times* para fornecimento de rodeiros – que hora chegam a 180 dias -, além de possíveis desabastecimentos.

Por outro lado, a qualidade da manutenção dos rodeiros é uma das maiores responsáveis pela longevidade dos trilhos nos quais operam, que além de também representarem alto custo de manutenção para a ferrovia, são críticos para a segurança da operação dos trens. A excessiva redução da espessura de friso do rodeiro (potencial causadora de fratura do friso) e o aumento da altura do friso afetam significativamente as características dinâmicas do veículo ferroviário, tais como estabilidade, segurança e conforto de passageiros, bem como capacidade de carga de trilhos e rodas (LI *et al*, 2010), além de poderem ser responsáveis por descarrilamentos da locomotiva (principalmente em passagens de nível), e consequentes falhas operacionais intoleráveis (na medida em que podem interromper por várias horas a operação no trecho no qual ocorre o acidente, e gerar danos que vão muito além do próprio rodeiro e trilho).

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente estudo procurou responder a respeito de quais são as melhores práticas entre possíveis políticas de manutenção de rodeiros de locomotivas, com a utilização da simulação dos resultados da operação dos rodeiros sujeitos às diferentes árvores de decisão pertinentes às políticas de manutenção. A abordagem foi feita posteriormente à análise estatística do banco de dados de medição de rodeiros fornecida pela operadora ferroviária.

Adotou-se o foco sobre as locomotivas da MRS Logística S/A da fabricante GE, modelos AC44MIL e C44MIL, para cada uma de suas seis posições de rodeiro, na fase da análise estatística, e para as três primeiras posições (pertinentes ao primeiro *truck*), na fase de simulação dos resultados das políticas de manutenção. Tal restrição foi escolhida em função destes dois modelos terem características de operação e portes muito similares, sendo inclusive tipicamente posicionados juntos em blocos de locomotivas em dupla seta no fluxo *heavy haul* (que se inicia na Ferrovia do Aço até o Porto de Guaíba, no ramal do Rio de Janeiro, e termina pela Ferrovia do Centro, de volta aos pátios de carga), o que também justificou o foco em apenas um *truck*, já que ambos têm características de desgaste muito similares. Além disso, não foi do interesse deste trabalho comparar as características destes rodeiros em relação às de outros modelos de locomotivas, que operam em condições e fatores de carga totalmente diversas.

Por fim, apesar do foco em uma realidade “local”, a metodologia que foi adotada para tal estudo é, conforme já comentado, reproduzível para quaisquer outras locomotivas em condições operacionais preferencialmente uniformes, das quais possam ser obtidos os dados históricos de medição de rodeiros.

1.4 OBJETIVOS

Uma das responsabilidades primárias de um engenheiro de produção especialista em manutenção é identificar e analisar falhas e desvios de um ativo em relação ao seu desempenho ótimo (MOBLEY, 2011). O presente estudo tem por objetivo geral a bem sucedida aplicação de uma metodologia para análise e melhoria das melhores práticas de manutenção de rodeiros de locomotivas, no que tange aos procedimentos de reperfilamento e inversão de rodeiros de locomotivas.

Mais especificamente, tem-se como objetivo primário a simulação dos resultados de custo por quilômetro rodado dos rodeiros para várias combinações de políticas de manutenção dos parâmetros de altura e espessura de friso, e espessura de bandagem, e a consequente identificação dos melhores padrões dentre as políticas comparadas, dadas as premissas a serem adotadas. Como objetivo secundário ainda o aprimoramento da análise estatística dos dados de medição de rodeiros, para obtenção de suas taxas de desgaste, baseadas na quilometragem operada, e não em função do tempo de operação (dias, semanas ou meses, por exemplo).

Os resultados almejados a partir de tais objetivos passam desde pelo aumento da confiabilidade e disponibilidade das locomotivas em relação a seus rodeiros, quanto à garantia da segurança operacional de locomotivas, pelo impedimento de ocorrência de condição crítica para a operação.

A viabilidade da análise em questão existe na medida em que mudanças nas políticas não influenciem as premissas adotadas para sua análise, tais como as taxas de desgaste que serão obtidas. O perfil de desgaste de rodeiros, conforme determinado pela modelo de Archard, é diretamente proporcional à distância de rolamento do rodeiro e à força normal (carga), e inversamente proporcional à dureza superficial do material (função da constituição metalográfica e das técnicas para fabricação e manutenção do rodeiro), tal como na equação 1:

$$v = K \frac{PxS}{H} \quad (1)$$

onde P é a força normal, S é a distância de rolamento, H é a dureza superficial do material e K é o coeficiente de desgaste, obtido de forma independente para cada dimensão do rodeiro e condição operacional, tanto a partir de testes de laboratório, quanto por extensivas medições de campo (LI, 2010 & JENDEL, 2002). Apesar da não utilização do modelo de Archard no presente estudo, em função da intenção de elaboração de uma ferramenta mais amigável ao contínuo processo de planejamento e programação de manutenção e com menores custos computacionais, as premissas citadas foram respeitadas ao longo de todo o trabalho.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Um grande número de diferentes técnicas e metodologias já foram utilizadas tanto para a geração dos dados quanto para a análise dos mesmos em modelos de predição de desgaste de rodas de locomotivas. Desde medições de campo até a simulações com equipamentos especialmente projetados e preparados para reproduzir a operação de rodeiros já foram utilizados para geração dos dados de desgaste, que são assumidamente relacionados com o trabalho existente no contato roda-trilho. Independentemente do experimento, porém, é senso comum o cruzamento dos resultados com os resultados de medições de campo, para avaliação e confirmação da validade do modelo (BRAGHIN, 2005).

Nesse processo, a escolha da missão dos rodeiros (tempo de operação) é crítica para o nível de qualidade da predição, além do número de variáveis consideradas para determinação de sua vida ou comportamento (se por um lado é ideal a inclusão de todas as variáveis condicionantes de desgaste do rodeiro durante sua operação, por outro tais variáveis devem também ser mantidas em número reduzido a fim de reduzir o esforço computacional) (BRAGHIN, 2005).

Com o objetivo proposto, será usada uma base de dados já disponível com os registros de medição de 12 meses de operação, limitada principalmente em função de mudança de condições operacionais (mais precisamente, implantação do sistema de lubrificação de trilhos em curvas), que alteraram significativamente o perfil de desgaste de rodeiros, tornando indesejável a utilização de dados anteriores a tais mudanças.

A análise estatística da base de dados será feita com a utilização do *software* Minitab, com o qual foram identificadas as taxas de desgaste pertinentes a cada uma das dimensões denominadas por Braghin (2005) de parâmetros de controle, quais sejam a espessura do flange (S_f), altura do flange (A_f) e espessura da bandagem (S_b). As taxas de desgaste (em mm por km rodado) foram definidas para cada posição de rodeiro das locomotivas abordadas, uma vez que rodeiros de ataque – das posições 1 e 6 – são caracterizados por maior desgaste do que os em operação na posição guiados – posições 2 e 5 -, por exemplo. Tal como citado por Li (2010), estudos realizados desde 1985 com métodos diversos para obtenção de modelos de predição de desgaste mostram que, dada uma metodologia definida (como a doravante utilizada no presente estudo), não há diferenças significativas de comportamento dos rodeiros entre modelos de locomotivas ou vagões, mas sim, principalmente, em função de alteração de condições operacionais e carga de trabalho.

O tratamento do resultado parcial das taxas de desgaste dos parâmetros de controle citados acima quanto à existência de *outliers* (pontos fora da curva) foi feito por meio da identificação do perfil da curva de taxa de desgaste em relação à quilometragem acumulada, a partir da definição de *whiskers* em torno da mediana a partir de 1,5 vezes o intervalo interquartil dos dados (caso o perfil identifique pontos muito extremos distantes da média).

De posse das taxas de desgaste “tratadas”, fez-se a projeção de paradas para manutenção dos rodéis, em função da política de manutenção atualmente utilizada pela operadora ferroviária. Por se tratar de um processo estocástico, no qual o estado e a decisão futura depende apenas do estado (medição) presente, adota-se como alternativa ideal a utilização de Programação Dinâmica não determinística com horizonte infinito (Processo de Decisão Markoviano), a partir da qual, se pode obter os limites de operação ótimos para uma política de manutenção que minimiza custo por quilômetro rodado (NOGUEIRA, 2014). Porém, observa-se que, em função da grande quantidade de estados possíveis na combinação dos parâmetros de altura, bandagem e espessura dos três rodéis de um mesmo *truck* (estima-se cerca de 1 trilhão de estados), torna-se impraticável a adoção de tal método em função do incalculável esforço computacional envolvido.

Ainda idealmente, há a alternativa de utilização das matrizes de transição entre estados para cada política de manutenção definida a ser comparada, as quais uma vez calculadas a longo período (a partir do *software* Matlab, por exemplo), fornecem subsídios para avaliação do custo esperado de cada política de manutenção e, conseqüentemente, a identificação daquela que melhor se aproxima da ótima (NOGUEIRA, 2014). Porém, principalmente caso sejam consideradas taxas de desgaste probabilísticas para os parâmetros de altura, bandagem e espessura de friso, tem-se novamente um número de estados possíveis extremamente elevado, o que ainda inviabiliza tal análise a partir de uma ótica de otimização.

A utilização da simulação de eventos discretos se mostrou a melhor alternativa para essa etapa, na medida em que pode reproduzir o desempenho aproximado de uma determinada política / árvore de decisão a partir tanto de taxas de desgaste determinísticas, quanto probabilísticas (NOGUEIRA, 2014). A avaliação destes resultados, e dos custos pertinentes a eles, foi feita de forma comparativa entre as políticas de manutenção abordadas, a fim de se identificar qual dentre as políticas estudadas representa o melhor custo por quilômetro rodado dos rodéis e, principalmente, da efetividade de utilização dessa metodologia para esse propósito.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

As definições a respeito das motivações para a abordagem do assunto proposto no presente estudo, bem como a metodologia adotada, o escopo e os objetivos finais são tratados no capítulo 1.

Ao longo do Capítulo 2 é feito o levantamento a respeito das bases de engenharia de manutenção nas quais se assentarão o estudo de políticas de manutenção de rodéis, tanto em relação às atuais práticas na empresa MRS Logística S/A, quanto em relação às melhores práticas de mercado observadas.

O Capítulo 3 discorre, por sua vez, a respeito das ferramentas e técnicas estatísticas, de otimização e simulação de dados que serão úteis para o tratamento das bases de dados empíricos e análise das políticas de manutenção alternativas doravante exploradas. São consolidados, portanto, os conceitos relacionados às distribuições de probabilidades candidatas aos modelos de desgaste de rodéis, e os fundamentos de otimização e simulação de processos markovianos.

O desenvolvimento do estudo das taxas de desgaste e políticas de manutenção é conduzida no Capítulo 4, no qual são exploradas as bases de dados de 12 meses de operação ferroviária afim de se identificar os perfis de desgaste de bandagem, espessura de friso e altura de friso para as locomotivas GE-AC44MIL e, em um segundo momento, simuladas 120 políticas de manutenção alternativas para melhor resultado de custo por quilometragem rodada.

Em seguida, no Capítulo 5, consolida-se os resultados das simulações nos gráficos e tabelas que resumem quais são os melhores critérios para tomada de decisão de manutenção de rodéis, dadas as premissas adotadas. Por fim, no Capítulo 6, conclui-se acerca do proveito do presente estudo no intuito de definir uma metodologia válida para crítica das políticas de manutenção de rodéis em quaisquer ferrovias analisadas, que possuam base de dados suficiente, e dos pontos de melhoria e aprofundamento para estudos futuros que tomem este como ponto de partida.

2. A ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO

O processo de desgaste de rodeiros está recebendo atualmente cada vez mais atenção de fabricantes e operadores ferroviários em todo o mundo. Ambos trabalham no sentido de aumentar a distância de operação total do rodeiro antes que qualquer medida de manutenção, seja de reperfilamento (que reduz a vida do rodeiro), seja de substituição (que encerra a vida do rodeiro), seja adotada. Também devido à intensa competição no mercado e busca por menores custos e melhor eficiência operacional, uma ferramenta capaz de simular tal desgaste de rodas se prova ser altamente lucrativa (DING, 2013).

Ferramentas de análise microscópica têm sido amplamente exploradas para predição de desgaste das rodas, aumentando o nível de detalhamento e complexidade de tais análises. Até a atualidade, todas elas tem se limitado ao aspecto do desgaste superficial, ou seja, a mudança no perfil da roda resultante de deformação plástica tem sido negligenciada (JENDEL, 2002). Essa tendência ocorre tanto em função da dificuldade de modelagem das deformações plásticas sem que se incorra em esforços computacionais e gastos de tempo muito altos, além da premissa (razoável) de que o maior contribuinte para alteração do perfil do rodeiro é o desgaste superficial, ao invés da deformação plástica. No presente estudo, a calibração dos parâmetros de mudança do perfil do rodeiro, em função de medidas de campo abrange ambos os fenômenos, ou seja, o modelo de desgaste contemplou os efeitos de mudança do perfil de roda, independentemente de suas causas.

Para entendimento acerca dessa e outras particularidades de um modelo para otimização da política de manutenção de rodeiros de locomotivas, aborda-se a seguir o referencial teórico que servirá de fundamento para os resultados do projeto.

2.1 POLÍTICA E MÉTODOS DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS DE LOCOMOTIVAS E SEUS FUNDAMENTOS

O processo de manutenção de rodeiros e seus métodos estão atualmente padronizados em, pelo menos, grande parte das operadoras ferroviárias do mundo, dada a importância dos mesmos. Na operadora ferroviária na qual foi conduzido o presente estudo, essa padronização é garantida por dois documentos que regulam o processo de medição e registro dos rodeiros, e o processo de reperfilamento do mesmo (VIANNA, 2012), conforme abordado a seguir.

2.1.1 Características do Monitoramento de Condição dos Rodeiros

O processo de medição e registro de rodeiros tem por objetivo básico o monitoramento de condição dos rodeiros, e consiste em um dos métodos atualmente usados para manutenção preditiva destes. As ferramentas básicas incluem o gabarito de medição (AAR Steel Wheel Gauge) e sua tabela de conversão (que caracteriza a medição indireta feita pelo gabarito), além do ERP Oracle, onde as informações sobre medição de rodeiro são registradas.

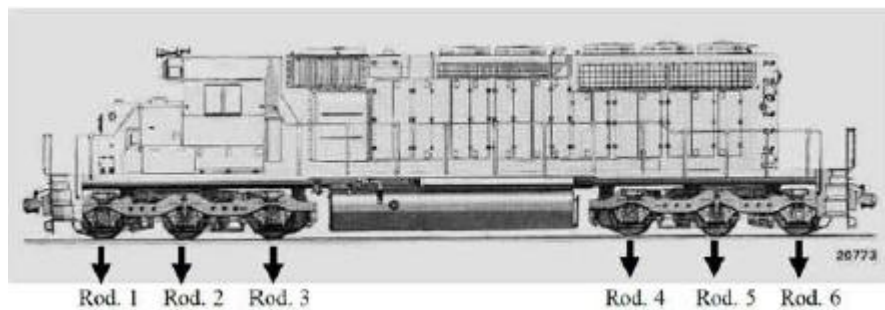


Figura 1 - Identificação dos Rodeiros da Locomotiva (por posição)
(Fonte: VIANNA, 2012)

O referencial para identificação do rodeiro tanto quando da medição quanto no registro no sistema, conforme exibido na figura 2, é o que se encontra na figura 1, na qual os rodeiros 1, 3, 4 e 6 são identificados como rodeiros de ataque, e os rodeiros 2 e 5, chamados de rodeiros guiados.

Número da Ordem de Serviço	Nome da Unidade	Posição	* Bandagem (Direta)	* Bandagem (Esquerda)	* Espessura Friso (Direta)	* Espessura Friso (Esquerda)	Altura Friso (Direta)	Altura Friso (Esquerda)	* Diâmetro (Direta)	* Diâmetro (Esquerda)	Diâmetro
051803267	803422	LC_RODEIRO_636,5	37,5	31	32	32	27	27			1018
051803267	803422	LC_RODEIRO_576	36	27	32	32	27	27			1008
051803267	803422	LC_RODEIRO_436	36	28,5	32	32	27	27			1008
051803267	803422	LC_RODEIRO_343	42,5	31	32	32	27	27			1028
051803267	803422	LC_RODEIRO_241,5	43	31	32	32	27	27			1028
051803267	803422	LC_RODEIRO_137,5	39	31	32	32	27	27			1018

Figura 2 - Input de Dados de Medição no Oracle cMRO
(Fonte: Vianna, 2012)

A figura 3 exemplifica o procedimento para medição de altura do friso do rodeiro, utilizando-se o gabarito:



Figura 3 - Gabarito para Medição dos Parâmetros de Controle do Rodeiro
(Fonte: MRS Logística S/A. 2007)

Em relação ao parâmetro de altura, é determinado o limite máximo de 35,0mm, a partir da qual o rodeiro deve ser encaminhado para a oficina de fresa para seu reperfilamento ou substituição. O limite máximo definido pelos fabricantes como de risco operacional é de 38,1 mm, medida na qual a circulação entre as oficinas deve ser feita com os rodeiros de risco colocados na posição de “guiados” (2 ou 4) e com restrição de velocidade.

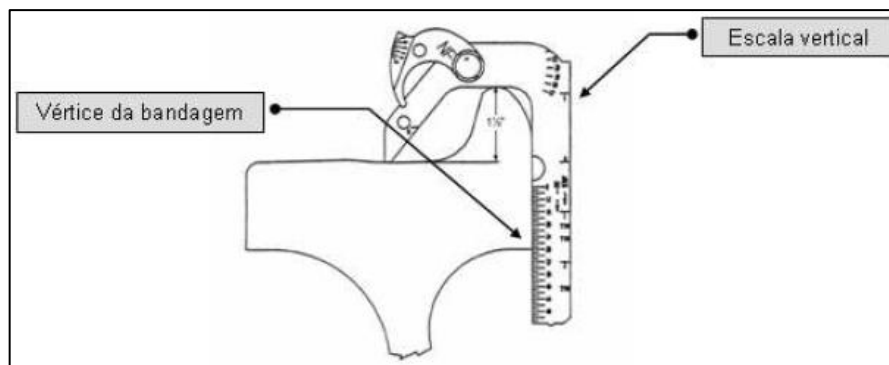


Figura 4 - Procedimento para Medição de Bandagem do Rodeiro
(Fonte: MRS Logística S/A, 2007)

Para o parâmetro de altura de bandagem, é adotado como limite de condenação em oficina a medida de 26,5 mm, sendo o limite operacional de risco para operação de 1”, ou 25,4 mm.

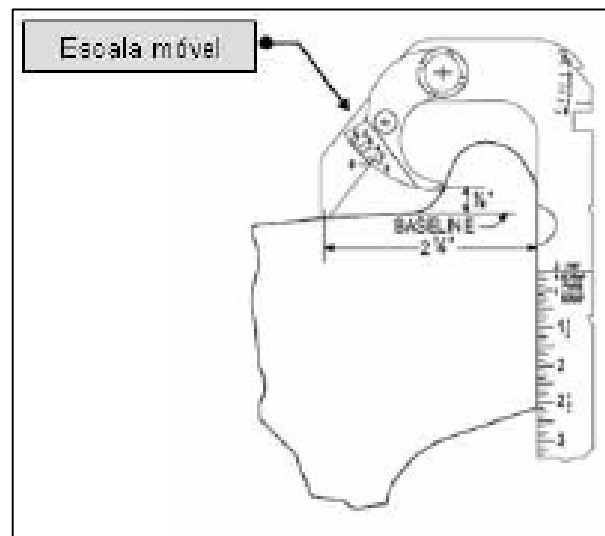


Figura 5 - Procedimento para Medição de Espessura do Friso
(Fonte: MRS Logística S/A, 2007)

Já para a medida de espessura dos frisos, o limite mínimo que representa risco operacional é de 21,0 mm, sendo que a partir de 22,0 mm o rolo é direcionado para a fresa e a partir de 25,0 mm a manutenção já é orientada a realizar a **inversão** de posição dos rolos. Na inversão de rolos, os rolos nas posições 1, 3, 4 e 6 (de ataque) são comparados com os rolos das posições 2 e 5 (guiados) quanto às suas espessuras de friso. Caso algum dos rolos de ataque tenham espessura de friso inferior a 25,0 mm e algum dos rolos guiados tenha espessura superior a 28,0 mm, tais rolos são invertidos. Tal procedimento é sabidamente um meio para a extensão da vida do rolo, fazendo com que cada rolo fique exposto um tempo praticamente uniforme às maiores taxas de desgaste pertinentes à posição de ataque (MRS, 2007).

A medição de diâmetro da roda também é executada no mesmo procedimento. Para o presente estudo, tal medida foi desconsiderada como referência para condenação de roda, uma vez que está diretamente relacionada à medida de bandagem do rolo (tal como o raio está diretamente relacionado ao diâmetro de um círculo).

Os parâmetros de diâmetro ou de bandagem entre os lados de um mesmo rolo e entre rolos são considerados como um gatilho de manutenção. A diferença máxima de diâmetro entre rodas do mesmo eixo de um rolo é estabelecida em 4,0 mm. Em um mesmo *truck*, adotando como medida de diâmetro de um rolo a média do diâmetro entre as duas rodas, a diferença máxima entre o menor e o maior diâmetro é de, no máximo, 17,0 mm. Por fim, a diferença entre o menor diâmetro de um *truck* e o maior diâmetro de outro *truck* pode ser de, no máximo, 30,0 mm. Em qualquer caso que exceda tais especificações, é necessária

adequação do rodeiro, seja por reperfilamento do mesmo, seja por substituição. Tais restrições são devidas a controle de patinação dos rodeiros, que tanto podem gerar aumento do desgaste dos rodeiros durante a operação, quanto risco operacional.

2.1.2 Parâmetros de Manutenção dos Rodeiros

Identificada a necessidade de manutenção do rodeiro, o escopo de manutenção é definido em função da medida de espessura de bandagem, que deve ter no mínimo 31,0 mm de espessura para suportar um novo reperfilamento. Caso a medida de espessura de bandagem esteja inferior a 31,0 mm, o rodeiro deve ser substituído. A tabela 1 resume os parâmetros de limite para reperfilamento do rodeiro em função das medidas de bandagem e de espessura de friso de entrada para fresamento, quando da última vida do rodeiro.

Tabela 1 - Referências de Limites para Fresamento de Rodeiros
(Fonte: MRS Logística S/A, 2007)

Bandagem de entrada	Friso de entrada	Material retirado na fresa (diâmetro)	Material retirado na bandagem (raio)	Bandagem de saída	Friso saída (valor mínimo)
Até 36 mm	21 mm	16 mm	08 mm	28 mm	27 mm
Até 35 mm	22 mm	14 mm	07 mm	28 mm	27 mm
Até 34 mm	23 mm	12 mm	06 mm	28 mm	27 mm
Até 33 mm	24 mm	10 mm	05 mm	28 mm	27 mm
Até 32 mm	24 mm	08 mm (calo)	04 mm (calo)	28 mm	26 mm
Até 31 mm	25 mm	06 mm (calo)	03 mm (calo)	28 mm	26 mm

A figura 6 mostra a ferramenta de fresamento utilizada para reperfilamento do perfil da roda do rodeiro, conforme especificação internacionalmente normatizada pela AAR:



Figura 6 - Ferramenta para Fresamento de Rodeiro de Locomotiva
(Fonte: VIANNA, 2012)

Após o procedimento da fresamento / reperfilamento do rodeiro, é necessário que as medidas sejam novamente identificadas e registradas no sistema, como gatilho para uma nova vida do rodeiro. A presença do “sulco testemunha” é a garantia de que apenas a quantidade de material necessária para reconstituição do perfil necessário foi efetivamente removida. A figura 7 exhibe a comparação entre um perfil desgastado (antes do reperfilamento) e um perfil reconstituído (depois do reperfilamento):

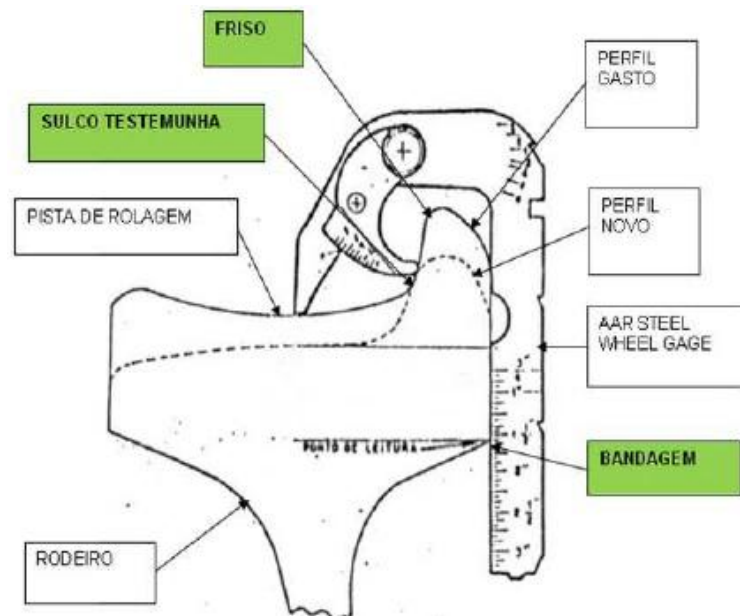


Figura 7 - Alteração no Perfil do Rodeiro por Reperfilamento com Sulco Testemunha
(Fonte: VIANNA, 2012)

2.2 EFETIVIDADE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA DE UM COMPONENTE PELA ÓTICA DA DISPONIBILIDADE E CONFIABILIDADE

O entendimento sobre efetividade de custo de um componente e de seu ciclo de vida depende da compreensão de conceitos que foram usados tanto relacionados a esse tema, quanto a todo o presente trabalho. O primeiro deles é o de **confiabilidade**¹, que retrata uma característica de um item, expressa pela probabilidade do item desempenhar suas funções requeridas, sob determinadas condições, por um período de tempo determinado. Para fazer sentido, uma definição numérica de confiabilidade (0,9, por exemplo) precisa ser acompanhada da definição de função requerida, condições operacionais e duração da missão (BIROLINI, 2003).

Função requerida especifica a tarefa de um **item ou componente**, e é o ponto de partida para qualquer análise de confiabilidade, na medida em que define também **falha**. As **condições operacionais** possuem uma importante influência em confiabilidade e, por isso, precisam ser definidas com cuidado. A duração da missão (tempo de operação) é geralmente considerada pelo parâmetro de tempo (t), e a função de confiabilidade é então definida como $R(t)$. Neste trabalho esse parâmetro é adaptado para quilometragem, conforme está definido adiante.

Uma **falha** ocorre quando um item deixa de desempenhar sua função requerida. O **modo de falha** é o sintoma (efeito local) pelo qual a falha é observada. A **causa** pode ser intrínseca (fraquezas ou desgaste) ou extrínseca (utilização, projeto, produção ou uso). Causas extrínsecas levam a falhas sistemáticas, que são determinísticas e devem ser consideradas como defeitos. Falhas aparecem sempre em função do tempo, mesmo que em tempos curtos. **Efeito** é a consequência da falha e pode ser considerado de forma diferente dependendo do nível em que se observa a falha. **Mecanismo de falha** é o processo físico, químico ou outro que resulta na falha. As falhas ainda podem ser classificadas como repentinas (catastróficas) ou **graduais** (de **degradação**).

A **taxa de falhas** de uma grande população com itens estatisticamente independentes e idênticos frequentemente exhibe uma “curva da banheira”, com as 3 fases: falhas **precoces**

¹ Uma distinção entre confiabilidade predita e estimada é importante, na medida em que a primeira é calculada com base na confiabilidade estrutural do item, e na taxa de falha dos componentes, e a segunda é obtida a partir de avaliação estatística de testes de confiabilidade ou de dados de campo obtidos em condições ambientais e operacionais conhecidas.

(atribuídas a fraquezas em materiais, componentes ou processos de produção defeituosos, aleatoriamente distribuídas); falhas com **taxa de falha constante** (período no qual as falhas são pertinentes a uma distribuição de Poisson e frequentemente catastróficas); falhas por **desgaste** (atribuídas a idade avançada, desgaste, fadiga, etc.) (BIROLINI, 2003). Falhas precoces não são determinísticas e aparecem geralmente distribuídas de forma aleatória em relação ao tempo sobre os itens. São eliminadas por meio de amaciamento ou pesquisa por estresses estruturais, por exemplo. A presença de um período com taxa de falhas constante $\lambda(t) = \lambda$, é realista para muitos equipamentos e sistemas, e útil para cálculos, tal como procura-se adotar no presente trabalho. A propriedade de perda de memória, que caracteriza esse período, leva a um processo homogêneo de Poisson para a ocorrência de falhas e a um processo Markoviano para o comportamento de tempo entre falhas de um item reparável se também taxas constantes de tempo para reparo puderem ser assumidas. Uma taxa de falha crescente após um grande período de tempo é típico para a maior parte dos itens e aparece em função de fenômeno de degradação por desgaste.

Birolini (2003) define, ainda, que **manutenção** consiste no grupo de atividades executadas em um item com o obtido de reter ou retornar o mesmo a um estado especificado (funcional). (...) Para simplificação de cálculos, é geralmente assumido que o elemento no diagrama de confiabilidade para o qual uma manutenção tenha sido feita é considerado *tão bom quanto novo* após a execução da manutenção. Esse pressuposto é válido para todo o equipamento ou sistema no caso de taxa de falha constante, e também é adotado para a simulação de resultados de manutenção de rodeiros no presente estudo.

Disponibilidade é um indicador abrangente, que expressa a porção de entrega do equipamento para serviço, normalmente designado por A. Avaliações de disponibilidade são normalmente difíceis, na medida em que suporte logístico e fatores humanos devem ser considerados em adição a confiabilidade e mantenedibilidade². A disponibilidade pode ser calculada como:

$$A = \text{MTTF} / (\text{MTTF} + \text{MTTR}). \quad ^3 \quad (2)$$

² Mantenedibilidade é definido como a capacidade ou facilidade com que um equipamento sobre manutenção, e é diretamente proporcional ao tempo médio para reparo de um item.

³ Essa forma de cálculo é conhecida como disponibilidade mecânica, na qual MTTF significa tempo médio para falha e MTTR, tempo médio para reparo.

O amplo conceito de **efetividade de custo** de um componente extrapola o aspecto de custo do ciclo de vida do componente, que foi estudado no presente trabalho, e também serve de horizonte de continuidade do mesmo. Efetividade de Custo é, segundo Birolini (2003), a medida da habilidade de um item de atender a uma demanda de serviço, com a melhor utilização possível da razão de custo do ciclo de vida. Esse indicador depende diretamente da garantia de qualidade do produto e da dependabilidade (conceito coletivo para desempenho em disponibilidade e seu fatores de influência, quais sejam humanos, logísticos e de vida útil). Tais conceitos, juntamente com a composição do custo do ciclo de vida do componente, encontram-se na figura 8:

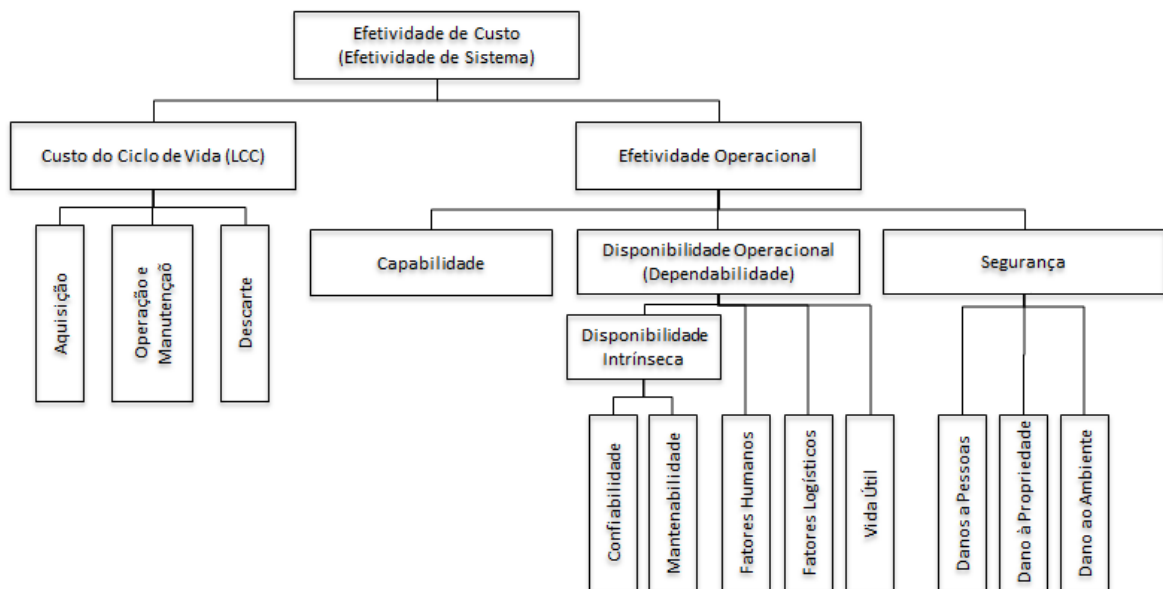


Figura 8 - Efetividade de Custo de um Sistema
(Adaptado de: BIROLINI, 2003)

O custo do ciclo de vida de um produto, que é o foco da apreciação de custo do presente trabalho, é a soma do custo de aquisição, de operação e manutenção, e de disposição de um item (BIROLINI, 2003). A experiência mostra que cerca de 80% dos custos do ciclo de vida de um item são gerados por decisões precoces na fase de projeto do item. Por outro lado, a autonomia de crítica ao projeto de rodéiro de locomotiva é, em geral, pertinente ao fabricante da locomotiva e ao fornecedor de rodéiro. No presente trabalho, adotou-se o foco nas oportunidades que existem na parcela do custo do ciclo de vida do rodéiro relacionada à

sua manutenção⁴, bem como na parcela de vida útil do rodeiro que juntos caracterizam o custo por quilometragem rodada.

3. ANÁLISE ESTATÍSTICA E DE OTIMIZAÇÃO

3.1 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS PARA A ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE COMPORTAMENTO DE VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

O método estatístico é útil para o entendimento de variabilidade (várias observações não produzem o mesmo resultado – a exemplo da taxa de desgaste de rodeiros, que não é comum entre rodeiros e até mesmo entre sucessivas medições de um mesmo rodeiro). O pensamento estatístico visa incorporar essa variabilidade às tomadas de decisão, pela identificação e, em última instância, minimização das fontes de variabilidade do fenômeno observado (MONTGOMERY, 2003). O raciocínio que parte de uma amostragem para uma população é denominado, conforme define Montgomery (2003), de inferência estatística. Tal metodologia pode resultar em erros (denominados de erros de amostragem). Entretanto, se a amostra é selecionada corretamente, esses riscos podem ser quantificados e um tamanho de população ideal pode ser determinado.

A maior parte dos estudos estatísticos presume que a informação ou o banco de dados disponível é obtido por amostragem simples da população de interesse (no caso deste estudo, medições aleatórias de rodeiros em diferentes pontos de sua vida). Nelson (1982) pontua que, na prática, nem sempre isso se verifica, tanto pela ocorrência de medições incorretas, quanto por amostras pouco significativas ou representativas da população, além de problemas no manuseio e registro dos dados. Informações ruins podem ser indevidamente processadas em análises estatísticas importantes, o que torna necessário, inclusive para o presente estudo, uma avaliação prévia da qualidade dos dados disponíveis e seu tratamento para remoção de “sujeira”, caso necessário.

A unidade de definição de falha também deve ser definida (km, l, h, etc.) (NELSON, 1982). Em um estudo prévio sobre as técnicas relacionadas à manutenção de rodeiros na operadora logística para a qual este estudo é direcionado, Vianna (2012) identifica a necessidade de uma abordagem quantitativa das taxas de desgaste de rodeiros que fosse

⁴ O valor esperado do custo de reparo total C_{cm} durante um tempo acumulado de operação T de um item com taxa de falha λ e custo por reparo c_{cm} é, segundo Birolini (2003): $C_{cm} = \lambda T c_{cm} = (T/MTBF) c_{cm}$.

relacionada à quilometragem percorrida pelos mesmos, como evolução à tradicional unidade diária até então utilizada. No presente estudo, todas as taxas de desgaste foram estatisticamente mapeadas sobre uma base de quilometragem rodada.

Segundo Nelson (1982), existem tipos de informação acerca de dados de falha, que devem receber tratamentos distintos em função de sua qualidade: dados completos (obtidos de fontes que monitoram o objeto até o fim de sua vida útil); censurados à direita (obtidos de amostras cuja falha ainda não ocorreu, que sabidamente se encontra após o momento atual – tratadas como unidades suspensas ou sobreviventes); censurados pelo tempo (caso o tempo de operação seja o limitador para a obtenção dos dados analisados); censurados por falha (quando os dados são congelados após a ocorrência de um certo número de falhas na amostra, com o tempo aleatório); e dados multicensurados, sujeitos a mais de uma das restrições comentadas.

Quando da estimação de parâmetros que descrevam certo comportamento da base de dados, são determinados intervalos de confiança que indicam o nível de incerteza da estimativa (NELSON, 1982). Alternativamente, o teste de hipótese pode ser conduzido a fim de comparar os dados de uma amostra com uma hipótese formulada a respeito deles. No intuito de identificar um estimador não enviesado, é imperativo que seja identificado o estimador com menor variância possível. Considerando-se todos os estimadores de um parâmetro qualquer, o estimador com menor variância é chamado de estimador não enviesado de mínima variância (MVUE / ENEMV) (MONTGOMERY, 2003). No presente estudo, dados parcialmente completos e censurados à direita são trabalhados quanto aos parâmetros que descrevem o comportamento de desgaste por quilômetro rodado de rodeiros em três “dimensões de controle”, tanto por meio dos parâmetros da curva de probabilidade mais aderente aos mesmos, quanto por teste de hipótese, utilizando-se o *software* Minitab®, conforme detalharemos adiante.

É possível ajustar uma curva teórica à função de distribuição cumulativa dos dados empíricos, tais como os utilizados neste trabalho, a fim de que a curva teórica possa estimar a função de distribuição cumulativa da população. Nelson (1982) define que a distribuição precisa ser escolhida em função de experiência e do entendimento do fenômeno em questão. Na representação gráfica em diagramas de probabilidade (específicos para cada tipo de distribuição), se os pontos plotados tendem a seguir uma linha reta, então a distribuição escolhida poderá ser adequada. Porém, duas pessoas analisando os mesmos gráficos podem entender os resultados de forma diferente. Desvios moderados da referência linear podem

acontecer em função da aleatoriedade das amostras. Por outro lado, uma representação gráfica válida com um número suficiente de dados tende a seguir uma linha reta.

A respeito dos parâmetros obtidos a partir de distribuições de probabilidade, de todas as possíveis, algumas são mais comumente usadas para análise de ciclos de vida, conforme observa Nelson (1982), tais como a Normal, a LogNormal, a Gama, a Exponencial, a Weibull e de Valor Extremo. A seguir, aborda-se sobre as distribuições LogNormal, Gama, Exponencial, e de Weibull, que seriam potencialmente utilizadas na fase de execução do presente estudo, acerca de suas funções de densidade de probabilidade, de distribuição cumulativa (que é uma representação da fração da população que falha até aquele momento), de confiabilidade (aponta a probabilidade de “sobrevivência” após um determinado momento), e de risco (também conhecida como taxa instantânea de falha no momento “y”, taxa de risco, taxa de mortalidade ou força de mortalidade), além dos fundamentos do teste de aderência que será utilizado para a identificação da distribuição de probabilidade preferida para descrição do fenômeno de desgaste.

3.1.1 Considerações Gerais Sobre Distribuições de Probabilidade

No âmbito de análise de dados de vida contínuos, Nelson (1982) fornece as características das distribuições de probabilidade mais relevantes. De um modo geral, a **função de densidade de probabilidade** $f(y)$ é o modelo matemático para o histograma da população, que deve satisfazer às propriedades de ser maior ou igual a zero ($f(y) \geq 0$), e somar um ($\int_{-\infty}^{\infty} f(y) dy = 1$).

A **função de distribuição cumulativa** (*cdf*) $F(y)$ pode ser escrita como:

$$F(y) = P(Y \leq y) = \int_{-\infty}^y f(u) du, \text{ sendo } -\infty < y < \infty \quad (3)$$

representando, portanto, a probabilidade de que um item falhe até determinado instante, ou a fração da população total que falha até determinado instante.

A **função de confiabilidade** $R(y)$ retrata, conforme já exposto, a probabilidade (a fração da população) que “sobrevive” após um determinado momento, e é calculada como:

$$R(y) = P(Y > y) = \int_y^{\infty} f(y) dy = 1 - F(y), \quad \text{com } -\infty < y < \infty \quad (4)$$

ou seja, o complemento da função de distribuição cumulativa.

Além da **média** ou vida esperada ($E Y = \int_{-\infty}^{\infty} y f y dy$) como “índice” característico de uma distribuição de probabilidade, a **mediana** ou percentil 50 ($P = F(y_p)$) é uma medida de tendência central preferível à média em situações na quais *outliers* presentes na base de dados são significativos em “viciar” a média para cima ou para baixo. Muito em função das técnicas de medição de campo indiretas quanto de condições para registro das medições de campo, o presente estudo pode estar sujeito a variações excessivas tais como as descritas, que tornam necessária a utilização de mediana como parâmetro de tendência central, caso necessário.

A variância é uma medida da amplitude ou da variabilidade da distribuição

$$\begin{aligned} Var Y &= \int_{-\infty}^{\infty} (y - E Y)^2 f y dy \text{ ou } Var Y & (5) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} y^2 f y dy - E Y^2, \text{ com } -\infty < y < \infty \end{aligned}$$

a partir da qual é avaliada a necessidade de utilização da média ou mediana.

Por fim, a função de risco é a que, conforme define Nelson (1982), a taxa de falha instantânea no momento “y”, ou seja, mede a proporção $\Delta h(y)$ que chega ao momento “y” e falha, dado o intervalo de tempo Δ entre “y” e “y+ Δ ”. Qualquer função que obedeça às condições de:

$h y \geq 0$ para $-\infty < y < \infty$ e $\lim_{y \rightarrow -\infty} \int_{-\infty}^y h y dy = 0$ e $\lim_{y \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^y h y dy = \infty$, ou seja, ser sempre positiva e ser zero quando y tender para $-\infty$, e ∞ quando y tender para $+\infty$, pode ser considerada um função de risco de uma distribuição de probabilidade.

Uma função de risco é uma outra forma de representar uma distribuição de probabilidade. As propriedades acima são equivalente àquelas para as funções cumulativa e de densidade de probabilidade. Uma função de risco maior nos primeiros momentos de vida corresponde a mortalidade infantil, e aumento da taxa de risco ao longo da vida corresponde a falha por desgaste. Nelson (1982) orienta que em algumas situações, é mais conveniente trabalhar com a função de risco do que com a função cumulativa da distribuição. Por exemplo, quando plotando dados de vida multiplamente censurados, é mais fácil trabalhar com taxa cumulativa de falha do que com probabilidade cumulativa. A função de risco cumulativa, portanto, pode ser escrita como:

$$H(y) \equiv \int_{-\infty}^y h(y) dy, -\infty < y < \infty \quad (6)$$

A tradicional e já citada “curva da banheira” fornece um entendimento sobre a dependência da taxa de falha (doravante considerada como taxa de desgaste) de componentes em relação ao tempo, a partir de pressupostos altamente questionáveis, mas aplicáveis em contextos sujeitos a muitas variáveis e/ou aleatoriedades. De acordo com o que, além de Birolini (2003), é definido por Hall (2003), os principais pressupostos incluem a tipificação das falhas em três classes: 1) falhas prematuras, geralmente atribuídas a erros de projetos ou problemas de manufatura ou montagem; 2) falhas de iniciação aleatória, cujas probabilidades de ocorrência são caracterizadas por uma distribuição exponencial de probabilidade de ocorrência: $P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, onde λ representa uma taxa de falha constante. 3) Falhas por desgaste associadas com processos cumulativos de danos, características do fim de vida do componente. Quando da utilização da curva de Weibull, o parâmetro β (de forma) caracteriza ou tipifica o modo de falha em questão: quando menor que 1, caracteriza falhas prematuras; quando maior que 1, caracteriza falhas do fim de vida, e quando se aproxima de 1, identifica falhas com taxa de falha constante (HALL, 2003). Na figura 8 abaixo, as taxas de falha em questão estão representadas pela letra λ . Quanto mais alto o parâmetro de forma, mais bem definido é o tempo de ocorrência de um número significativo de falhas, ou seja, mais se sabe sobre o ciclo de vida completo do componente.

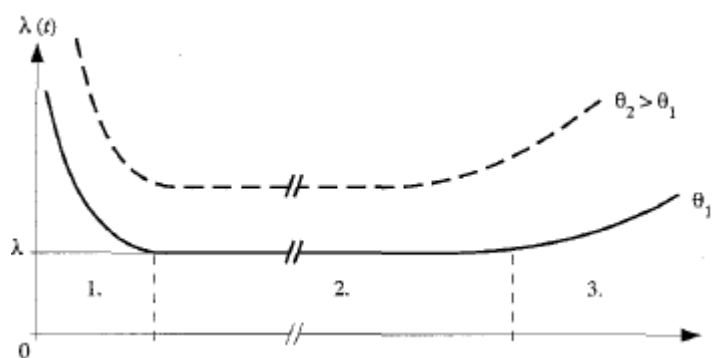


Figura 9 - Curva da Banheira para Caracterização de Taxas de Falhas do Ciclo de Vida
(Fonte: BIROLINI, 2007)

3.1.2 Distribuição Lognormal

Conforme apontado por Nelson (1982), a distribuição LogNormal empiricamente se ajusta a muitos tipos de dados adequadamente, em função de sua grande variedade de formas.

É uma distribuição frequentemente utilizada para dados econômicos, de resposta de material biológico a estímulos, e alguns tipos de dados de vida, tais como fadiga de metal e vida de isolamentos elétricos.

A densidade de probabilidade Lognormal por ser expressa como:

$$f_y = \frac{0,4343}{2\pi^{\frac{1}{2}} y \sigma} \exp\left(-\frac{\log y - \mu}{\sigma}\right)^2 \quad (7)$$

onde μ é a média do log e pode adotar qualquer valor (é a média do log da vida, e não a média da vida). O parâmetro σ é chamado de desvio padrão do log e deve ser positivo (é o desvio padrão do log da vida, e não o desvio padrão da vida). Tais valores não representam tempos, tais como em outras distribuições, mas sim são adimensionais. Na figura 9, observa-se que na densidade de probabilidade, o valor do desvio σ determina a forma da curva e o valor da média μ determina o ponto da metade da distribuição e sua dispersão.

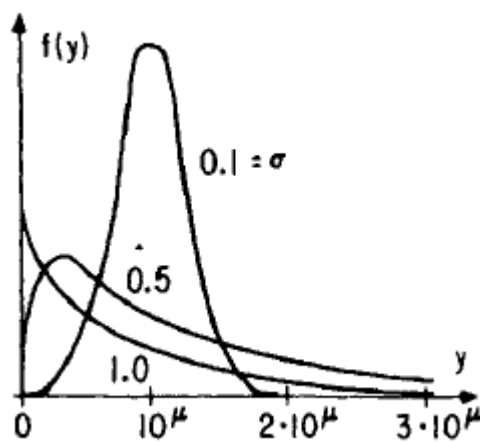


Figura 9 - Densidade de Probabilidade Lognormal
(Fonte: NELSON, 1982)

A distribuição cumulativa lognormal é representada por:

$$F_y = \Phi\left(\frac{\log y - \mu}{\sigma}\right), y > 0 \quad (8)$$

onde Φ é a função de distribuição de probabilidade cumulativa normal padronizada, cujos valores são tabelados. A função de confiabilidade lognormal pode ser expressa como:

$$R_y = 1 - \Phi \frac{\log y - \mu}{\sigma}, y > 0 \quad (9)$$

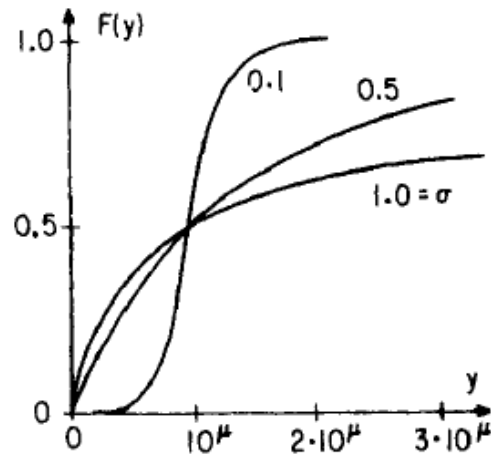


Figura 10 - Função de Probabilidade Cumulativa Lognormal
(Fonte: NELSON, 1982)

A função de risco de falha para a distribuição lognormal é:

$$h_y = \frac{0,4343}{y\sigma} \frac{\varphi \frac{\log y - \mu}{\sigma}}{1 - \Phi \frac{\log y - \mu}{\sigma}}, y > 0 \quad (10)$$

da qual temos como representação gráfica a figura abaixo, que mostra que o risco de falha para componentes retratados pela distribuição lognormal no tempo zero é zero, sendo que esse risco cresce para um máximo e então decresce de volta para zero. Apesar de para muitos produtos, o risco de falha não voltar para zero ao longo da vida, a função de risco lognormal descreve adequadamente seu comportamento para o início de vida.

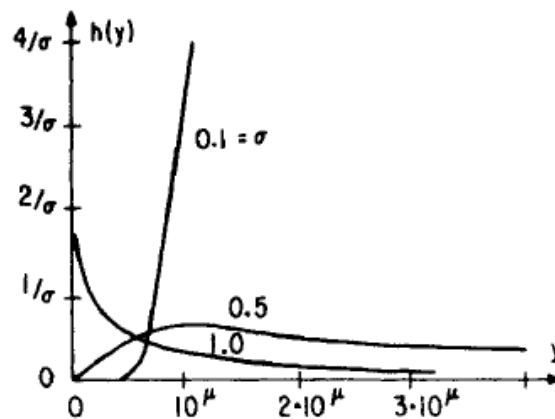


Figura 11 - Gráfico da Função de Risco Lognormal
(Fonte: NELSON, 1982)

3.1.3 Distribuição Gama

A distribuição de risco gama possui comportamento que a torna adequada para a descrição de vida de muitos produtos. Um caso especial da distribuição gama é a distribuição chi-quadrado, que também possui muitos usos na análise de dados e teoria estatística, inclusive para teoria de filas.

A função de densidade de probabilidade gama é

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \frac{y^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\frac{y}{\alpha}}, \quad y > 0 \quad (11)$$

onde α é o parâmetro de escala, e precisa ser positivo, e β é o parâmetro de forma e também precisa ser positivo. A figura 12 retrata a densidade de probabilidade da distribuição gama em sua forma gráfica:

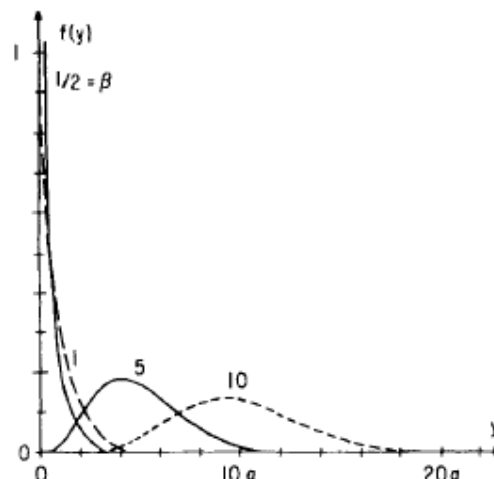


Figura 12 - Gráfico de Densidade de Probabilidade Gama

(Fonte: NELSON, 1982)

A função de probabilidade cumulativa gama é

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^y \frac{y^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\frac{y}{\alpha}} dy \quad (12)$$

para a qual tem-se como representação gráfica:

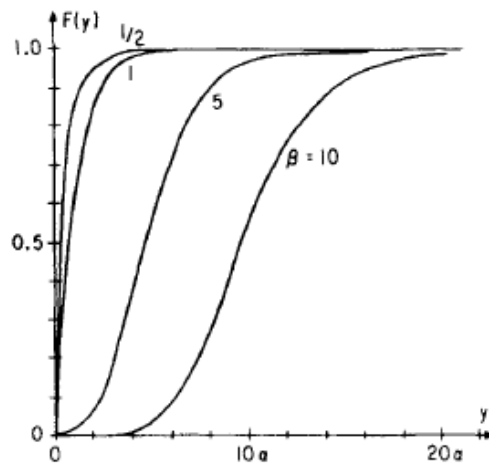


Figura 13 - Gráfico de Probabilidade Cumulativa Gama
(Fonte: NELSON, 1982)

A função de risco para a distribuição gama é

$$h(y) = \frac{\frac{1}{\Gamma(\beta)} \frac{y^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-\frac{y}{\alpha}}}{1 - \Gamma\left(\frac{y}{\alpha}, \beta\right)} \quad (13)$$

O gráfico que representa a função de risco gama está na figura abaixo:

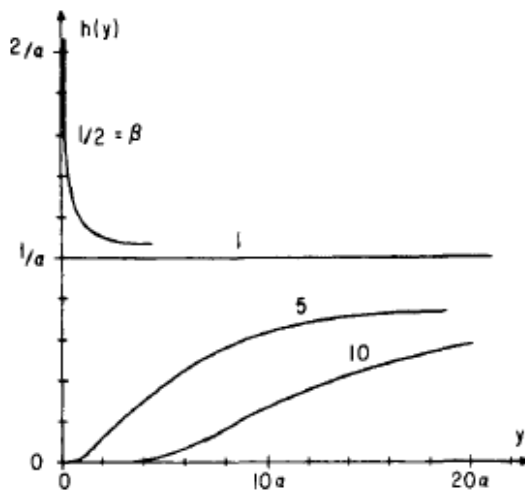


Figura 14 - Gráfico de Função de Risco Gama
(Fonte: NELSON, 1982)

3.1.4 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é caracterizada pela constância da taxa de falha em todos os pontos da curva ao longo do tempo. Por isso, uma de suas principais aplicações, segundo NELSON (1982), a descrição do tempo entre falhas de produtos reparáveis, tais como rodeiros de locomotivas. Porém, essa distribuição caiu progressivamente em desuso para situações que requerem uma distribuição de probabilidade mais complexa, para diferentes fases da vida de um componente, inclusive por poder ser retrata de forma muito similar pela própria distribuição de Weibull (quando β – parâmetro de forma – é igual a 1).

A densidade de probabilidade exponencial é escrita como

$$f y = \frac{1}{\theta} e^{(-\frac{y}{\theta})} \tag{14}$$

onde θ é a média, ou $f y = \lambda e^{(-\lambda y)}$, onde λ é a taxa de falhas, com $y \geq 0$. O gráfico da figura 15 retrata a função de distribuição de probabilidade exponencial:

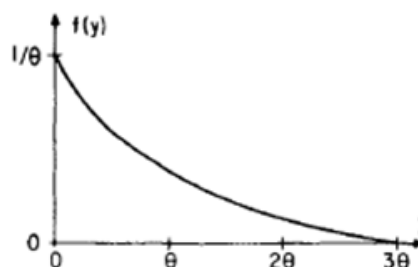


Figura 15 - Distribuição de Probabilidade Exponencial

(Fonte: NELSON, 1982)

A função cumulativa de probabilidade exponencial, retratada na figura 16, pode ser escrita como:

$$F(y) = 1 - e^{-\lambda y}, y \geq 0 \quad (15)$$

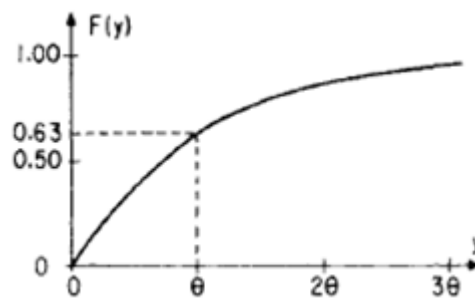


Figura 16 - Função Cumulativa de Probabilidade Exponencial
(Fonte: NELSON, 1982)

A função de confiabilidade (complementar à função cumulativa) exponencial \$R(y)\$ é definida como sendo:

$$R(y) = e^{-\lambda y}, y \geq 0 \quad (16)$$

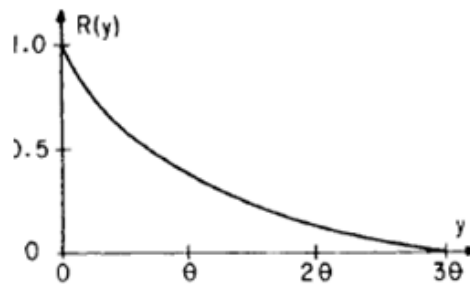


Figura 17 - Função de Confiabilidade Exponencial
(Fonte: NELSON, 1982)

Por fim, a função de risco \$h(y)\$ é descrita como:

$$h(y) = \frac{\frac{1}{\theta} e^{-\frac{y}{\theta}}}{e^{-\frac{y}{\theta}}} = \frac{1}{\theta} = \lambda \quad (17)$$

ou seja, equivalente à taxa de falha da distribuição, sendo a função de risco cumulativa:

$$H(y) = \lambda y = \frac{y}{\theta}. \quad (18)$$

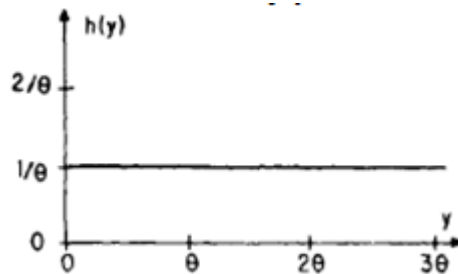


Figura 18 - Função de Risco Exponencial
(Fonte: NELSON, 1982)

3.1.5 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é útil em uma grande gama de aplicações, particularmente para vida de produtos, como distribuição da força de certos materiais, análise de produtos com algum tipo de “elo mais fraco”, entre outras. Uma das razões de sua popularidade é sua grande variedade de formas, o que faz com que seja extremamente flexível em se ajustar a bases de dados empíricos. Se uma variável aleatória Y possui uma distribuição de Weibull, então $\ln(Y)$ possui uma distribuição de valor extremo, que é utilizada para analisar dados da distribuição de Weibull de forma mais simples (NELSON, 1982), conforme será visto na próxima seção.

A função de densidade de probabilidade Weibull pode ser escrita como:

$$f(y) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} y^{\beta-1} e^{-y/\alpha^\beta}, y > 0 \quad (19)$$

Nesta função, o parâmetro β é chamado de parâmetro de forma e é positivo. O parâmetro α é o parâmetro de escala e também é positivo, além de ser chamado de “vida característica”, na medida em que é sempre o $100 \times (1 - e^{-1}) = 63,2^\circ$ percentil. α possui a mesma unidade de y , por exemplo, horas, meses, ciclos, etc. enquanto β é um número adimensional. O parâmetro β determina a densidade de probabilidade, enquanto α determina o desvio /amplitude da distribuição. A distribuição é definida apenas para y positivo, tornando a distribuição de Weibull, portanto, apropriada para distribuições de vida. A função de densidade de probabilidade Weibull é graficamente representada na figura 19.

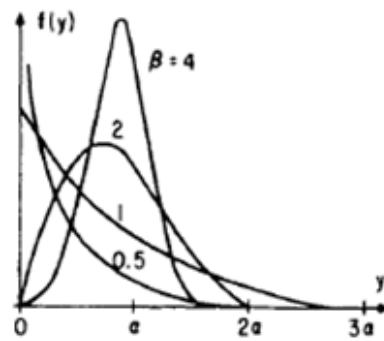


Figura 19 - Função de Densidade de Probabilidade Weibull
(Fonte: NELSON, 1982)

Para o caso especial em que $\beta=1$, a distribuição de Weibull é a exponencial. Esse é um dos motivos pelos quais as aplicações nas quais a exponencial é aplicável foram substituídas pela distribuição de Weibull. Para $\beta=2$, a Weibull é a distribuição de Rayleigh. Para um maior valor do parâmetro de forma (β), como maior que 10, a forma da distribuição é próxima à da distribuição de menor valor extremo. Ainda, para valores de Beta entre 3 e 4, a forma da distribuição de Weibull é muito próxima à da curva normal (vide imagem acima).

A função de distribuição cumulativa é:

$$F(y) = 1 - e^{-\frac{y^\beta}{\alpha}}, y > 0 \quad (20)$$

podendo também ser representada por:

$$F(y) = 1 - e^{-\lambda y^\beta}, \text{ onde } \lambda = \frac{1}{\alpha^\beta} \quad \text{ou} \quad (21)$$

$$F(y) = 1 - e^{-\frac{y^\beta}{\theta}}, \text{ onde } \theta = \frac{1}{\lambda} = \alpha^\beta.$$

A função de confiabilidade Weibull é, portanto,

$$R(y) = e^{-\frac{y^\beta}{\alpha}}, y > 0. \quad (22)$$

Por fim, a função de risco $h(y)$ Weibull é

$$h(y) = \frac{\beta}{\alpha} \frac{y^{\beta-1}}{\alpha}, y > 0 \quad (23)$$

sendo crescente para beta maior que 1 (para componentes sujeitos a desgaste) e decrescente para beta menor do que 1, sendo constante (exponencial) quando beta é igual a 1. A habilidade para descrever taxas de falha crescentes ou decrescentes contribuiu para fazer da distribuição de Weibull popular para análise de dados de vida. Sua representação gráfica encontra-se na figura abaixo:

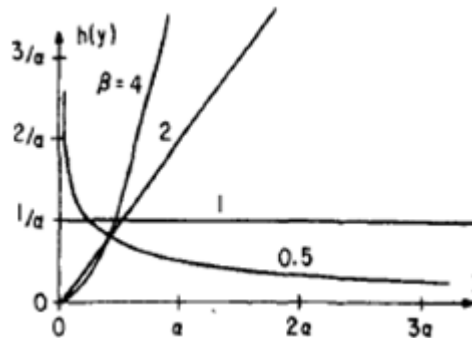


Figura 20 - Função de Risco Weibull
(Fonte: NELSON, 1982)

3.1.6 Teste de Aderência de Anderson-Darling

A fim de que se saiba qual é o nível de confiança de um ajuste de uma distribuição de probabilidade a determinada série de dados, é fundamental a quantificação de aderência da distribuição de probabilidade à base. No teste de Anderson-Darling, parte-se de duas hipóteses essenciais, conforme define MONTGOMERY (2003):

H0: $F(x)$ equivale a $F^*(x)$ para $-\infty < x < \infty$, na qual a distribuição condiz com os dados

H1: $F(x)$ difere de $F^*(x)$ para $-\infty < x < \infty$, na qual a distribuição não traduz os dados,

onde $F(x)$ é a transformação integral de probabilidade mostrada na equação

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du \quad (24)$$

que é usada para converter os dados para uma distribuição uniforme se a distribuição testada estiver correta. Então, se x_1, x_2, \dots, x_n , são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas cuja função cumulativa seja $F(x)$, então $F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n)$ são variáveis aleatórias independentes uniformes (0, 1). Essencialmente o teste de ANDERSON-DARLING compara o quão próximo os valores da distribuição $F(x_1), F(x_2), F(x_3), \dots, F(x_n)$ são de uma distribuição uniforme (0,1) em relação à distância esperada da distribuição esperada e a uniforme (0,1) (MONTGOMERY, 2003).

Para um p -valor $> \alpha$ (sendo α o limite de aceitabilidade da função), H_0 é adotada como verdadeira, ou seja, os dados são compatíveis com a distribuição testada, caso contrário, é rejeitada.

3.2 A PESQUISA OPERACIONAL COMO FERRAMENTA PARA OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE RESULTADOS

A Pesquisa Operacional é a metodologia científica aplicada à resolução de problemas complexos que envolvam a tomada de decisão a respeito de alocação de recursos escassos ou otimização de resultados, normalmente tomando como referência modelos matemáticos que reflitam uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada.

A modelagem de um problema envolve dois níveis de abstração, conforme define Morabito (2008): o sistema real (com muitas variáveis, tais como as condições operacionais às quais o rodeiro está sujeito) é abstraído em um modelo conceitual (com as variáveis que mais impactam no resultado estudado, tais como os parâmetros de controle do rodeiro), e este para um modelo matemático ou de simulação. A etapa de formulação define as variáveis e relações matemáticas do modelo; a resolução do problema matemático e a identificação de resultados são características da fase de análise do problema; a partir de tais resultados, o pesquisador faz a interpretação dos mesmos, argumentando suas conclusões; e, por fim, faz-se o julgamento a respeito da aplicabilidade das inferências em relação ao escopo do problema proposto (MORABITO, 2008).

Segundo Marins (2011), o processo de abordagem de um problema com pesquisa operacional envolve a formulação do problema, construção do modelo matemático (relacionado à abstração do modelo conceitual para um modelo de otimização ou simulação), obtenção da solução (por meio de Programação Linear, Programação de Redes, Teoria dos Grafos, Teoria de Filas, além de alguns métodos de simulação ou otimização, tais como Solver, LINDO, Cplex, PróModel e Arena), teste do modelo e da solução obtida (para verificação de aderência do modelo à realidade histórica) e implementação. Um estudo de sensibilidade permite ainda identificar a influência de determinado dado/parâmetro nos resultados do modelo.

No presente trabalho, por meio da metodologia acima, faz-se uso de um modelo de simulação para comparação entre políticas alternativas de manutenção de rodeiros de locomotivas. Para isso, o *software* Arena® da Rockwell foi utilizado para simulação do processo de manutenção de rodeiros.

O ARENA® é um *software* de simulação de processos que se baseia na linguagem SIMAN. Nele, os sistemas são simplificados por um conjunto de estações de trabalho que prestam serviços a clientes (entidades). Cada bloco ou módulo é interconectado a outros e as entidades são conduzidas entre eles segundo uma sequência lógica. Segundo Araujo (2006), a melhor metodologia para criação de um modelo de simulação é: criar um modelo básico (no qual os principais aspectos do processo são retratados); refinar o modelo (incluindo as distribuições de probabilidade segundo as quais as entidades são criadas e/ou atendidas); simular / testar o modelo e analisar resultados (verificando, dentre várias possibilidades, qual melhor se adere à realidade atual e às melhores alternativas existentes para a solução do problema); selecionar a melhor alternativa (em função das variáveis ou indicadores identificados como mais importantes ao funcionamento do sistema).

3.3 MODELOS DE COMPORTAMENTO DE DESGASTE DE RODEIROS POR DISTÂNCIA DE ROLAMENTO

O que o planejador de manutenção sabe a respeito do trabalho é determinado pelo nível com que o trabalho pode ser predito e planejado antes mesmo que comece. Onde há mais informação, é possível um melhor planejamento, melhores estimativas, e usualmente, melhores custos (MOBLEY, 1976). A extensão da estimativa de demanda de manutenção e do investimento necessário para tanto depende, primeiramente, de sua finalidade e dos benefícios que ela proporciona. Alguns propósitos que justificam o investimento em estimativa incluem: possibilidade de avaliação de *backlog* (pendências) de mão-de-obra; previsão de longo prazo; recomendação para compra de equipamentos; avaliação de propostas de métodos de trabalho; decisões sobre fazer ou comprar; programação de caminho crítico; planejamento e controle de custos, entre outros processos (MOBLEY, 1976).

A utilização de forças de fricção entre roda e trilho para execução de curvas e para aceleração e frenagem de uma composição é inerente ao convencional sistema de roda-trilho. Estas por sua vez geram desgastes de rodeiros que respondem por um dos maiores custos de manutenção na operação ferroviária em todo o mundo. Os benefícios de um modelo de predição de desgaste, a exemplo de dezenas que surgiram nos últimos 3 anos, incluem: o balizamento o trabalho de planejamento de manutenção; projeto das rodas e seu perfil podem ser otimizados para limitar o desgaste; frequentemente, com uma ferramenta bem calibrada, custosas medições de campo podem ser evitadas (JENDEL, 2002). Esse tipo de análise por

ser feito rapidamente e de forma efetiva em termos de custos por meio de simulação, em oposição a custosas e extensivas medições de laboratório ou de campo.

Uma ferramenta de simulação de desgaste de perfil de roda a nível geométrico, diferentemente da que nos foi proposto de se fazer no presente estudo, pode consistir de quatro tarefas principais, conforme é determinado por DING (2013): 1) simulação da dinâmica do sistema do veículo/rodeiro (utilizando-se como entrada o sistema de contato roda/trilho + sistema de trilho + sistema do veículo), que gera como saída posições de contato entre roda e trilhos, força normal, etc.; 2) análise do contato de rolamento entre roda e trilho, que gera como saída as pressões de contato entre roda e trilho, velocidades de deslizamento, etc.; 3) cálculo do material removido por desgaste; 4) projeção do perfil da roda em função da ocorrência de desgaste (DING, 2013). Na análise proposta, as fases 1 e 2 são adaptadas para a análise do banco de dados empírico de medições de rodeiros, ao longo de 12 meses de operação, e obtenção das taxas de desgaste por quilômetro rodado para cada parâmetro de controle para, então, utiliza-se da simulação para projeção dos custos por quilômetro rodado de vida de um rodeiro dada uma árvore de decisão de manutenção baseada em uma política de manutenção alternativa.

Ainda a respeito da metodologia de simulação, muito similarmente ao proposto por DING (2013), ROVIRA (2014) conduz a estimativa dos parâmetros de desgaste no contato roda-trilho a partir da solução: 1) do problema geométrico (para identificação e modelagem dos pontos e ângulos de contato entre roda e trilho); 2) do problema da normal (força de contato entre roda e trilho que acarreta na pressão de contato de deslizamento e rolamento); 3) do problema tangencial (que resulta nas trações tangenciais e distribuição de deslizamento nas áreas de contato, além de forças longitudinais e laterais às rodas e trilhos); e 4) da estimação de desgaste. No presente estudo, dadas as restrições de análise pertinentes a uma frota de locomotivas que trabalha em condições operacionais e de carga muito similares, pode-se assumir que tais problemas são constantes neste estudo, e são contemplados no modelo obtido a partir das medições de campo e, portanto, da base de dados empírica.

Ainda segundo Ding (2013), a estratégia de atualização do perfil do rodeiro é um ponto chave para o modelo de predição. Uma estratégia muito conservadora, com grande quantidade de atualizações, pode resultar em um esforço computacional desnecessário. Por outro lado, o aumento do intervalo entre duas medições pode levar a imprecisões no perfil de desgaste final (ou até mesmo divergência nos números). Diferentes estratégias de atualização das medidas de rodeiros foram testadas e comparadas por DING (2013), e a que se mostrou

ser mais eficiente é a baseada na profundidade máxima de desgaste, ou seja, o perfil da roda é atualizado sempre que o desgaste acumulado máximo de profundidade é atingida. Uma análise de sensibilidade mostrou que um limite de 0,1mm é baixo o bastante para garantir uma boa precisão e ao mesmo tempo não leva a esforços computacionais elevados. Tal limite de desgaste será o parâmetro pelo qual será definido o “passo” de simulação do processo de operação dos rodeiros no ARENA®.

No procedimento de simulação em questão, para que o modelo seja aderente à realidade, na medida em que o atual perfil da roda altera o perfil de desgaste futuro, é necessário a utilização de uma atualização de perfil de roda iterativa, onde o perfil atualizado (desgastado) sirva como perfil inicial (input) para o passo de desgaste que vem a seguir (JENDEL, 2002). Os passos de desgaste são repetidos até que a distância de operação desejada seja atingida / aderente à realidade. O comprimento do passo de desgaste (ou de distância percorrida para atualização do perfil da roda) precisa ser limitado, a fim de que o perfil predito não seja divergente ou gere perfis não realistas. O desgaste máximo permitido em profundidade (perpendicular ao perfil da roda) é de 0,1mm, conforme já citado acima e também recomendado por Jendel (2002). Caso a taxa de desgaste varie em função da quilometragem acumulada de operação, sendo alta no início da vida do rodeiro, os passos de desgaste expressos em termos de distância percorrida são menores (cerca de 100 a 500 km) (JENDEL, 2002). Um maior limite (correspondente a cerca de 2500 km) de distância percorrida é introduzido para impedir passos de desgaste muito altos no fim de vida do rodeiro.

Uma situação de tráfego uniforme é umas das condições mais notavelmente importantes quando se está predizendo desgaste de perfil de rodas e trilhos, segundo Jendel (2002). A utilização de grande base de dados de medição para calibração da ferramenta de predição de desgaste também é um diferencial positivo quando da simulação do perfil do rodeiro. Ambas as condições estão presentes no estudo proposto.

A utilização da base de dados limitada aos últimos 12 meses se deve, conforme já comentado, às significativas mudanças nas práticas de manutenção (com a utilização do sulco testemunha quando da usinagem ou fresamento do rodeiro) e nas condições operacionais da frota (com a instalação de sistema de lubrificação em curvas acentuadas). Em relação ao impacto da prática de lubrificação dos trilhos em curvas, Jendel (2002) pontua que, para curvas de raios menores (entre 300 e 400m), a taxa de desgaste de um trilho lubrificado é de 10 a 15 vezes menor do que de um trilho não lubrificado. Para raios maiores (600m), essa

diferença cai para cerca de duas a cinco vezes, o que evidencia, portanto, a importância da lubrificação para as condições operacionais e na alteração das taxas de desgaste do rodeiro em operação.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA E ESTUDO COMPARATIVO ENTRE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS

Conforme já sinalizado anteriormente, a análise das políticas de manutenção de rodeiros dependeu de duas fases de trabalho, a primeira das quais tem como foco a determinação das taxas de desgaste dos parâmetros dos rodeiros das locomotivas AC44MIL, e a segunda a simulação das tomadas de decisão de manutenção em função de políticas de manutenção alternativas para sua posterior comparação e identificação de melhores padrões.

4.1 DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE DESGASTE PARA ALTURA, BANDAGEM E ESPESSURA DE FRISO DOS RODEIROS

4.1.1 Caracterização das Condições Operacionais das Locomotivas AC44MIL da MRS Logística S/A

A malha ferroviária da MRS Logística S/A é constituída por 1.687km de vias entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. O trecho no qual circulam as locomotivas objeto desse estudo é o que se encontra destacado no **Anexo I – Diagrama Esquemático da Malha Ferroviária MRS Logística S/A**, na seção 8.1, que compreende a Ferrovia do Aço, por onde circulam os trens carregados de minério originários da região de Belo Horizonte para os portos no litoral do Rio de Janeiro, principalmente Guaíba e Sepetiba, e a Linha do Centro, por onde retornam do Rio de Janeiro os trens vazios. Esse modelo operacional é conhecido como “carrocel”, uma vez que a circulação é, via de regra, feita em apenas um sentido (anti-horário, de acordo com o mapa).

Além de uma malha com uma acentuada quantidade de curvas, a MRS Logística S/A também convive com trechos de fortes aclives, como o compreendido entre o carregamento de minério em Belo Horizonte e a região da cidade de Bom Jardim, em Minas Gerais, e declives, entre Bom Jardim e Barra do Piraí. Tais características influenciam profundamente no perfil e intensidade de desgaste dos rodeiros das locomotivas, inclusive entre rodas de um mesmo eixo. Uma das principais premissas deste trabalho, porém, é a desconsideração das diferenças de medidas entre rodas de um mesmo eixo, ou seja, será adotada apenas uma medida para cada parâmetro de medição dos rodeiros como característica das duas rodas (direita e esquerda), conforme será observado mais adiante.

4.1.2 Tratamento da Base de Dados Histórica de Medição de Rodeiros em Microsoft Excel® e Análise de Dados com Minitab®

As bases de dados com as quais o estudo foi realizado está disponível na rede de dados da empresa, e pode ser obtida a partir do *software* Discoverer. A primeira das bases é a que possui o histórico de medições de rodeiros de locomotivas para todas as locomotivas MRS, por rodeiro e parâmetro, da qual foram retiradas apenas as medições das locomotivas AC44MIL. Essa baseia-se no *input* de dados feito pelos mantenedores no sistema Oracle® cMRO das medições de campo dos rodeiros, e é composta pelas informações do TAG da locomotiva, Visita e Data nas quais as medições foram executadas, o procedimento no qual a medição foi feita (manutenção preditiva ou de fresamento), TAG de cada rodeiro medido e sua posição na locomotiva (de 1 a 6), além dos registros das medidas encontradas para os parâmetros de espessura de friso, altura de friso e bandagem, conforme imagem abaixo.

Loco	Visita	Exigência	Status	Descrição	Ultima At.	Posição	Rodeiro	Bandag	Bandag	Essesp	Essesp	Altura F	Altura F	Di Cmro	Di Cmro	Número	Instan	Item	Rodeiro	Código	Operação
903140	358800	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_14/fev/14	LC	RODEIRO_1	47,63	47,63	29,67	26,26	31,75	31,75	879,48	879,48	261025	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903147	351663	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_01/jan/14	LC	RODEIRO_6	50,8	50,8	30,11	30,73	28,17	28,17	885,83	882,65	261184	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903141	351872	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_04/jan/14	LC	RODEIRO_4	49,21	50,8	27,18	29,67	34,93	33,35	884,24	885,83	261053	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903149	352775	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_08/jan/14	LC	RODEIRO_5	38,1	36,51	32,11	30,73	28,17	28,17	857,25	857,25	261229	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903135	353243	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_09/jan/14	LC	RODEIRO_4	53,98	53,98	32,11	30,73	29,77	29,77	898,53	898,53	260904	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903100	317608	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_10/jan/14	LC	RODEIRO_1	60,33	63,5	32,11	32,11	31,75	31,75	909,64	908,05	260601	R514003065	LOC.19.19086	K25.012			
903154	353492	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_10/jan/14	LC	RODEIRO_2	39,69	41,28	30,73	32,11	31,75	31,75	863,6	863,6	261279	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903151	353563	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_10/jan/14	LC	RODEIRO_4	36,51	41,28	30,73	30,73	28,17	28,17	863,6	863,6	261329	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903140	353570	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_11/jan/14	LC	RODEIRO_4	49,21	47,63	30,73	28,45	30,18	31,75	879,48	879,48	261028	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903146	353285	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_11/jan/14	LC	RODEIRO_6	33,34	33,34	29,67	32,11	30,18	29,77	852,49	849,31	261157	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			
903156	355148	LC_Medição	Acomp	MD_RODA_14/jan/14	LC	RODEIRO_4	31,75	31,75	32,11	32,11	26,59	26,59	850,9	850,9	261357	R514003057	LOC.19.19086	K25.012			

Figura 21 - Base de Dados de Medição de Rodeiros

A base de dados abrange as medições feitas entre o primeiro dia de julho de 2013, a partir da qual não é observada nenhuma alteração significativa nas condições operacionais que influenciam diretamente nas taxas de desgaste de locomotivas, e o último dia de junho de 2014, a partir do qual o presente estudo se iniciou, compreendendo exatamente um ano de operação. A base consiste de 9.642 medições de rodeiros em todas as seis posições.

Para definição futura das taxas de desgaste, é ainda necessária a base com os registros de quilometragem percorrida por locomotiva, por dia de operação. Para o mesmo período citado acima, foram obtidos os apontamentos de quilometragem registrada no sistema SISLog, que gerencia os ativos e suas operações na MRS Logística S/A, a partir do *software* Hyperion® Analyzer, que consolida tais informações em relatórios. Ao longo de um ano de operação, as locomotivas estudadas operaram, em média, ao longo de 101.419 km de ferrovias, e tiveram em média 49 visitas para medição e/ou fresamento dos rodeiros, nas quais as 6 posições são monitoradas, ou seja, em média, uma medição a cada 2069km de operação.

Na fase de simulação deste trabalho, as tomadas de decisão em oportunidades de medição hipotéticas serão tomadas a cada 1.000km de operação.

Para obtenção das taxas de desgaste dos rodeiros por posição e por parâmetro é necessário relacionar cada medida considerada “atual” à sua medição “anterior”, e calcular a quilometragem percorrida pela locomotiva entre as duas datas de medição. Tal procedimento não se aplica, porém, nas situações em que a medição “anterior” foi motivada por fresamento, uma vez que a diferença de medições (“antes x depois”) apresentada nesse caso não se deve a desgaste, mas sim à manutenção do rodeiro. Do total de medições potencialmente úteis no presente estudo, 24,8% são obtidas a partir de procedimentos de fresamento, que não são adequadas para a obtenção de taxas de desgaste. Nesses casos, no entanto, tais medidas são consideradas como início de uma “nova vida” do rodeiro, a partir da qual as taxas de desgaste serão obtidas.

Um segundo tratamento da base de dados se fez necessária na medida em que pôde ser observada a existência de variações de medições impossíveis de ocorrerem em função da operação dos rodeiros, tais como aumento nos parâmetros de bandagem ou espessura, e redução no parâmetro de altura⁵. Tais situações ocorrem em função de um de três possíveis motivações:

- a) Falha no procedimento de medição do rodeiro, causada por imperícia ou negligência do mantenedor durante o procedimento de medição do rodeiro. As características que evidenciam a existência desse tipo de falha consistem nas diferenças entre os desvios padrão das taxas de desgaste, tal como será abordado adiante, principalmente para os rodeiros das posições 2 e 5, que são aqueles sujeitos às menores taxas de desgaste e criticidade de operação, além de pior posição para medição, uma vez que se localizam no meio do *truck*, entre os outros 2 rodeiros;
- b) Falha no apontamento das medições no sistema, inerente ao processo de apontamento manual que é feito atualmente, a partir do formulário de medição preenchido pelo mantenedor de campo. Tal problema pode ocorrer tanto em função de mal entendimento da grafia da medida tomada pelo mantenedor escrita no formulário, quanto por imperícia do digitador durante a inserção desses dados

⁵ A redução no parâmetro de altura de rodeiro é possível apenas em situações de fratura do mesmo, quais sejam situações que não são objeto deste estudo e, por isso, foram ignoradas.

no sistema, causas a serem sanadas pela adoção de um sistema de medição eletrônico e que automatize tais etapas;

- c) Intervalo entre medições muito baixo, dado o sistema de medição indireto, no qual se lida com uma margem de erro considerável. Em situações nas quais o rodeiro opera pouco entre duas medições e, portanto, se desgasta pouco, a significância da margem de erro inerente ao sistema de medição em relação ao desgaste apresentado pelo rodeiro é maior do que quando as medições são tomadas entre intervalos muito longos de quilometragem e, portanto, com desgastes mais elevados. Dessa maneira, é possível se obter duas medições seguidas incompatíveis entre si, em função de erros que, ainda assim, sejam inerentes à precisão do sistema de medição.

Para minimização de erros nos cálculos das taxas de desgaste, foram ignoradas as duplas de medição nas quais a que era considerada “atual” apresentava algum dos desvios citados, para cada parâmetro. Nessa passagem foram eliminados outros 27,3% dos dados para o parâmetro de bandagem, 34,9% dos dados pertinentes ao parâmetro de espessura de friso e, por fim, outros 20,2% dos dados do parâmetro de altura de friso. Nesse ponto, as taxas de desgaste efetivamente podem ser obtidas, com o uso de 48% do total de dados disponíveis para bandagem, 40,4% dos dados para espessura de friso e 55% dos dados de altura.

As diferenças nas medidas entre os apontamentos considerados “atual” e “anterior” foram obtidos considerando-se a média das medidas das rodas direita e esquerda do mesmo eixo. Tal premissa, já descrita acima, foi adotada em função da considerável redução do esforço computacional necessário para os futuros cálculos caso fossem consideradas as duas rodas separadamente, e da importante simplificação para o entendimento do processo como um todo. Tem, porém, como implicação direta a invalidade dos critérios de manutenção baseados nas diferenças entre medidas de rodas de um mesmo eixo, que naturalmente ocorrem em condições operacionais similares à da MRS Logística S/A, caracterizadas por grande quantidade de curvas e a operação no formato “carrocel”.

A partir da relação entre a diferença entre as medidas “atual” e “anterior” e a quilometragem rodada entre medições, é obtida a taxa de desgaste em mm/km. Em função da grandeza em questão ser extremamente pequena, todas as taxas expressas no presente estudo se referem ao desgaste em mm para cada 1000 km de operação, ou seja, $\text{mm} \cdot 10^3 / \text{km}$. A partir dos cortes e tratamentos já descritos, foram obtidos, para todas as posições, os registros de 3.599 taxas de desgaste para bandagem, 2.477 para espessura e 4.405 para altura de friso. Tais

dados foram submetidos à análise de normalidade por Anderson-Darling, média, desvio-padrão, variância, assimetria, curtose, mediana e os respectivos intervalos interquartis a partir do *software* Minitab. Os resultados podem ser observados nas figuras a seguir:

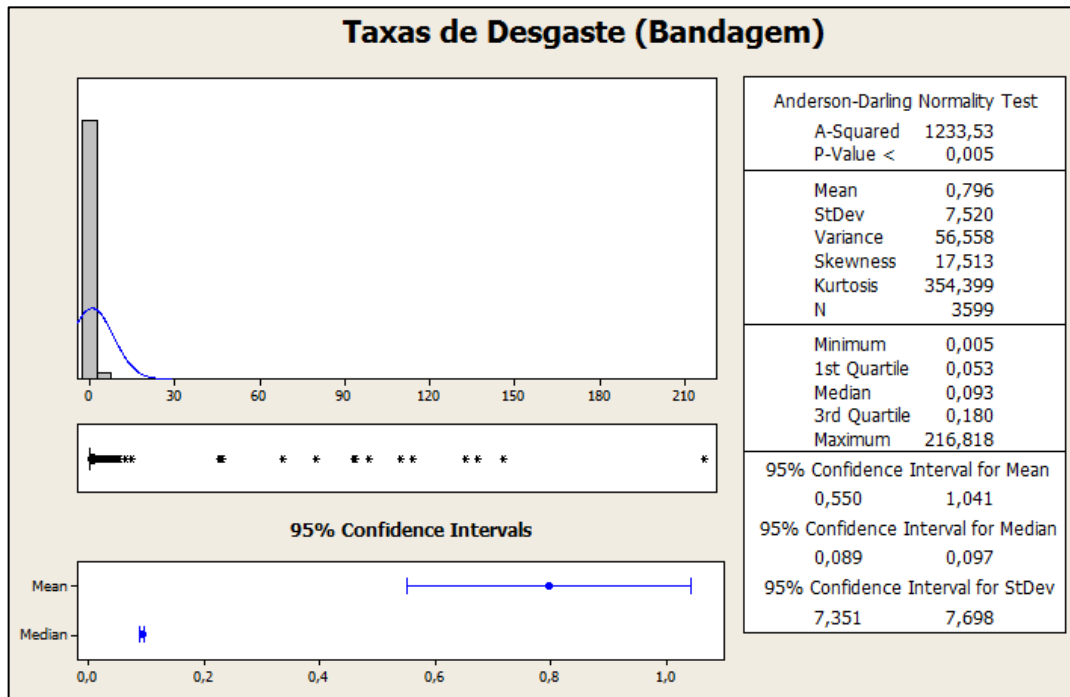


Figura 22 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas de Desgaste de Bandagem

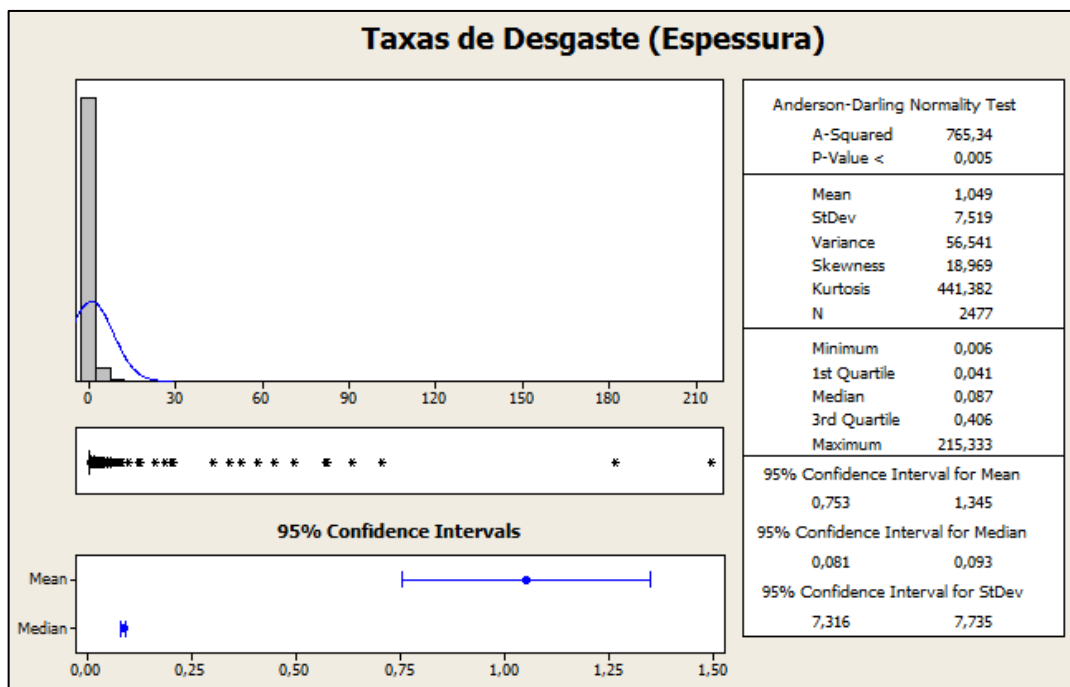


Figura 23 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas de Desgaste de Espessura

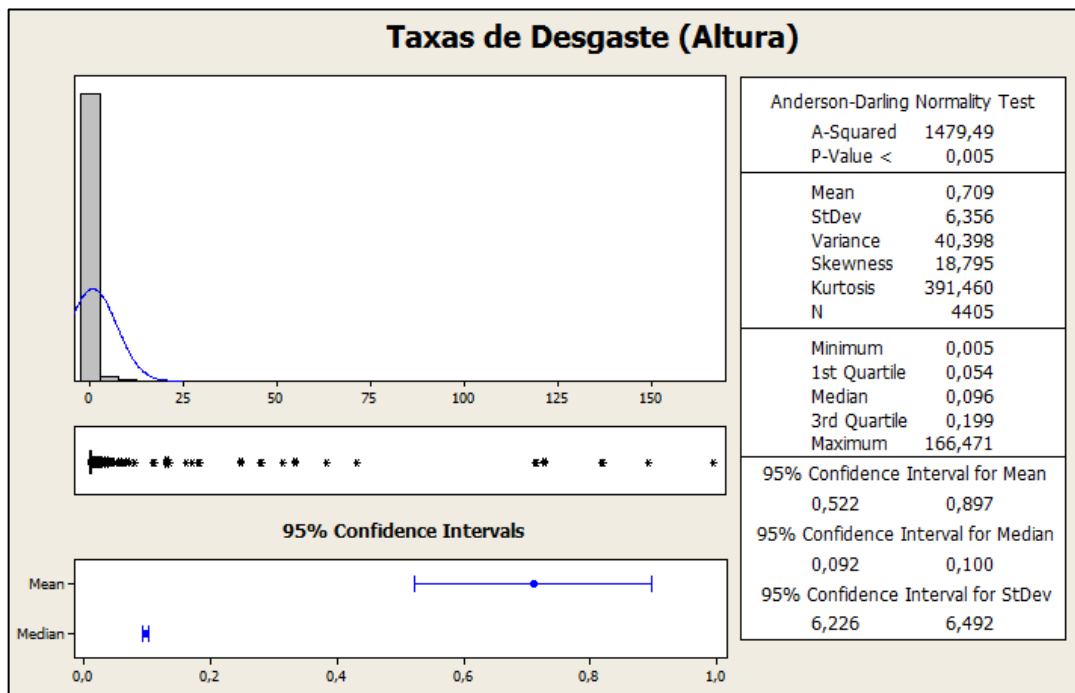


Figura 24 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas de Desgaste de Altura

Conforme se pôde verificar, em todos os casos, há uma diferença muito significativa entre as principais medidas de tendência central, quais sejam a média e a mediana. A média das séries de dados em questão são altamente influenciadas por *outliers* (pontos “fora da curva”) muito maiores do que a maior parte dos dados, tendência que pode ser confirmada pela medida de assimetria dos dados (*skewness*), sempre entre 17,5 e 19,0, o que indica a existência de uma série de dados altamente assimétrica (conforme assinala Montgomery (2003), a série de dados perfeitamente simétrica possui *skewness* de 0, e qualquer série com tal parâmetro maior que 1 ou menor que -1 já é considerada assimétrica).

A ocorrência de pontos fora da curva tão severos tem como causas evidentes as mesmas já sinalizadas anteriormente, relacionadas seja com o mantenedor ou o apontador, seja com o próprio sistema de medição. O tratamento desses pontos extremos é feito a partir da aplicação dos parâmetros utilizados para a construção do gráfico *boxplot* de uma dada série de dados, no qual é utilizada como medida de tendência central a mediana dos dados, e assumidos como *outliers* todos os dados que estejam acima do terceiro quartil acrescido de 1,5 vezes o intervalo interquartil, ou que estejam abaixo do primeiro quartil subtraído de 1,5 o intervalo interquartil.

Com a remoção de tais dados considerados enviesados, foram descartados do total disponível para bandagem, espessura e altura de friso, respectivamente, 7,9%, 7,0% e 8,9% dos dados. Nesse ponto, ficam disponíveis 40,1% do total de dados para a bandagem, 33,4%

dos dados de espessura, e 46,1% dos dados para altura de friso. A análise estatística dessa nova série de dados pode ser verificada nas figuras abaixo.

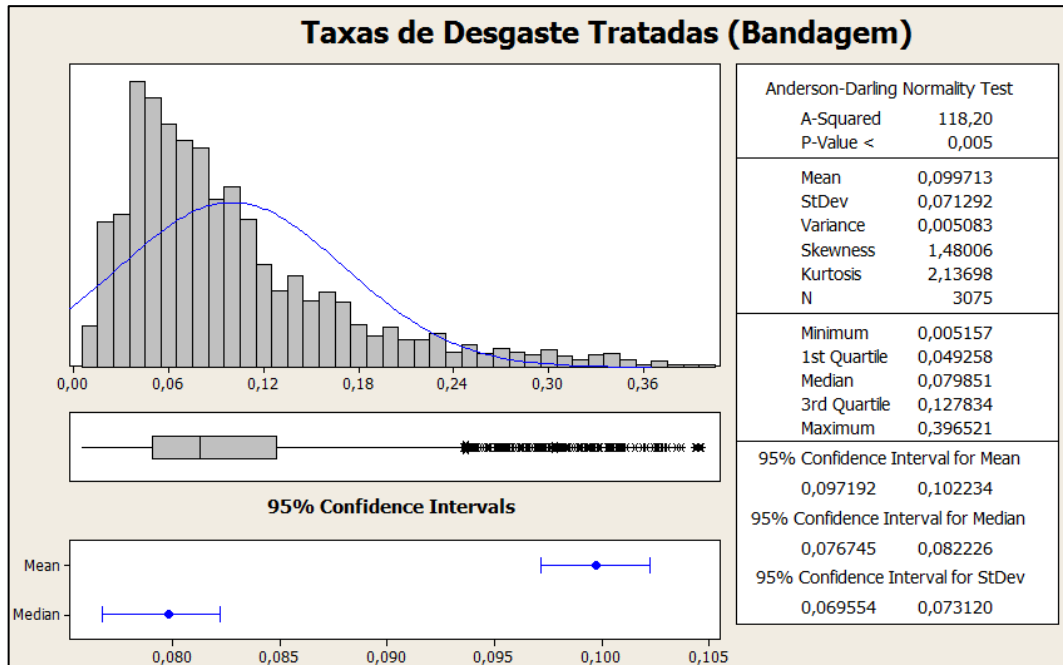


Figura 25 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas Tratadas (Bandagem)

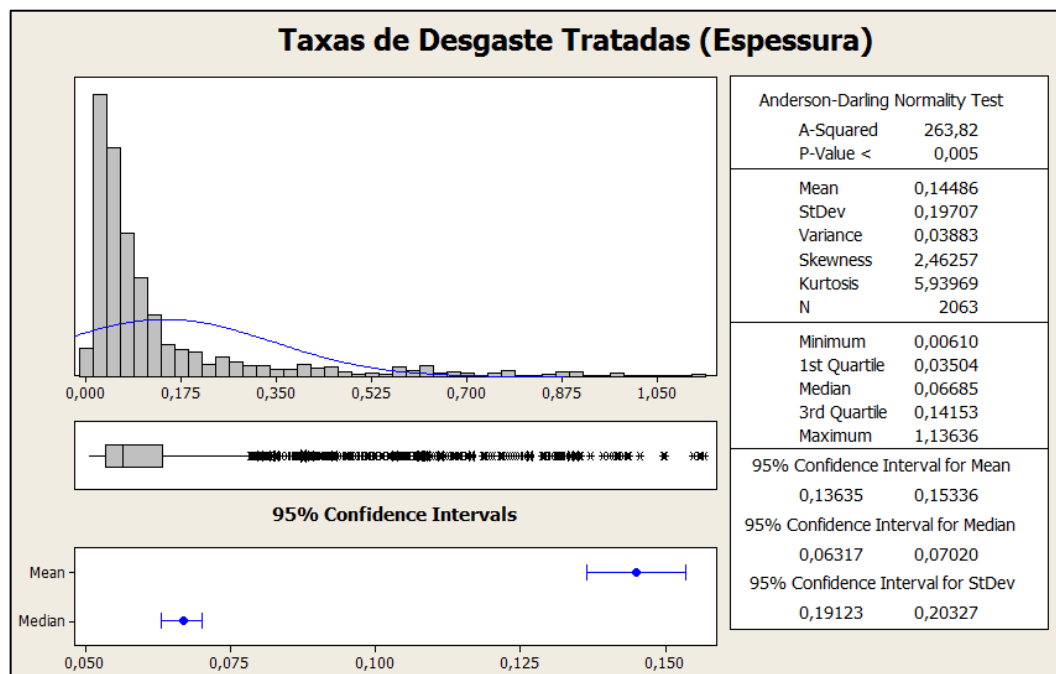


Figura 26 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas Tratadas (Espessura)

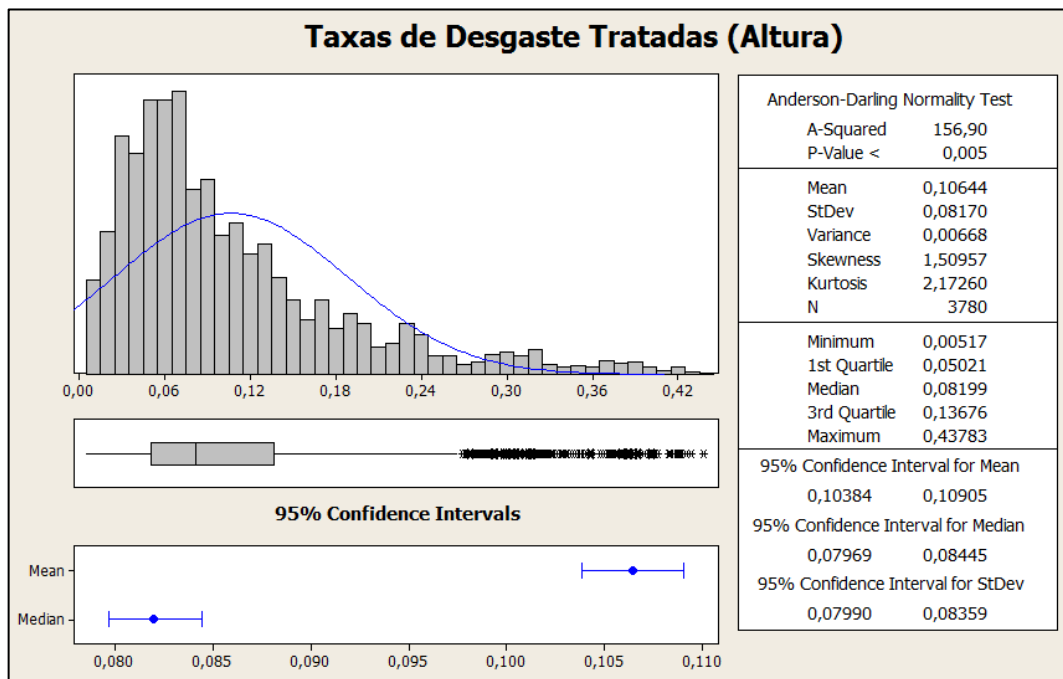


Figura 27 - Sumário Estatístico Descritivo e Gráfico para Taxas Tratadas (Altura)

É possível observar a grande variação no nível de assimetria da distribuição de dados atual, entre 1,4 e 2,5. Tais grandezas são consideradas esperadas, uma vez que não há taxas de desgaste negativas (menores que zero) e taxas que potencialmente são maiores que grande parte dos dados, tal como se observa nos histogramas acima.

Por meio da base de dados agregada para cada parâmetro convenientemente tratada, foi feita a separação da base em séries para cada posição de rodeiro. A partir de então, as taxas de desgaste passam a ser identificadas pelo código do parâmetro e posição correspondente, ou seja, “BD1” para bandagem do rodeiro da posição 1, EF2 para espessura de friso do rodeiro da posição 2 e AF3 para altura de friso do rodeiro da posição 3, por exemplo. Na tabela abaixo, é possível identificar as principais medidas estatísticas a partir das quais são avaliadas cada série de dados.

Tabela 2 - Sumário Estatístico das Séries de Dados por Posição e Parâmetro

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
BD1	536	0	0,09911	0,00286	0,06611	0,00803	0,05080	0,08299	0,12944	0,34198
BD2	504	0	0,10079	0,00348	0,07806	0,00516	0,04578	0,08004	0,12972	0,39652
BD3	507	0	0,09867	0,00307	0,06902	0,00609	0,04981	0,07632	0,12678	0,36755
BD4	524	0	0,10154	0,00323	0,07388	0,00785	0,05168	0,08071	0,12432	0,37485
BD5	479	0	0,09689	0,00325	0,07111	0,00641	0,04384	0,07612	0,12533	0,35434
BD6	525	0	0,10106	0,00303	0,06948	0,00627	0,05125	0,08206	0,13333	0,34904
EF1	424	0	0,10173	0,00545	0,11217	0,00628	0,03491	0,06535	0,11750	0,62617
EF2	316	0	0,1770	0,0140	0,2496	0,0061	0,0316	0,0624	0,1789	1,0626
EF3	318	0	0,1395	0,0106	0,1885	0,0065	0,0348	0,0659	0,1408	0,8897
EF4	329	0	0,1483	0,0103	0,1876	0,0074	0,0375	0,0688	0,1733	0,9058
EF5	292	0	0,1874	0,0152	0,2592	0,0061	0,0338	0,0726	0,2151	1,1364
EF6	384	0	0,13514	0,00867	0,16999	0,00651	0,03657	0,06948	0,13347	0,81566
AF1	640	0	0,10950	0,00307	0,07761	0,00745	0,05580	0,08911	0,14244	0,39111
AF2	599	0	0,09771	0,00299	0,07327	0,00623	0,04573	0,07453	0,12775	0,38955
AF3	650	0	0,11013	0,00343	0,08751	0,00633	0,04857	0,08038	0,14074	0,43783
AF4	651	0	0,10883	0,00321	0,08198	0,00517	0,05263	0,08546	0,13785	0,42900
AF5	602	0	0,10248	0,00355	0,08704	0,00517	0,04389	0,07414	0,12719	0,42185
AF6	638	0	0,10912	0,00321	0,08116	0,00517	0,05216	0,08407	0,14382	0,40601

A necessidade de um novo tratamento da base de dados após a separação por posição de rodeiro fica evidente quando observada a diferença entre os desvios padrão existentes nas séries de dados para todas as posições em relação às séries para a posição 1, principalmente nos parâmetros de espessura de friso e bandagem, destacadas na tabela 2. No caso das medidas pertinentes a espessura de friso essa diferença torna-se ainda mais crítica, na medida em que o desvio padrão para a série de taxas dos rodeiros das posições 2 e 5 são mais que o dobro do desvio padrão da série de taxas dos rodeiros na posição 1. A tentativa de ajuste de uma distribuição de probabilidade a uma série de dados com tal nível de “poluição” pode comprometer significativamente sua aderência e, conseqüentemente, a validade de sua aplicação.

Conforme já levantada acima, sustenta-se a hipótese de uma margem de erro mais significativa para as medições das posições de rodeiro que não sejam as de ataque, uma vez que durante a medição é do conhecimento do mantenedor ser este o rodeiro em condição operacional mais crítica (sujeito às maiores taxas de desgaste) e, por isso, a exatidão de medição dos demais rodeiros fica comprometida em relação à da medição do rodeiro 1. Além disso, é relevante ainda a hipótese de uma dificuldade mais significativa de medição dos rodeiros nas posições 2 e 5, por estarem no meio do *truck*, entre outros dois rodeiros, e necessitarem de uma posição de medição que favoreça erros de paralaxe, por exemplo. As séries de altura de friso são uma exceção, conforme se pode verificar, com desvios muito parecidos entre si, provavelmente em função de serem medidas em uma posição totalmente externa ao rodeiro, ou seja, mais facilmente tomadas.

Considerando que o desvio padrão das séries analisadas é diretamente proporcional a taxas de desgaste mais próximas dos limites superiores anteriormente definidos para remoção

de *outliers*, e dadas as condições citadas acima nas quais tais medidas com menor precisão são feitas, adotou-se como tratamento final da base de dados a remoção dos registros de taxas de desgaste mais elevados até o ponto em que, para cada série de dados por parâmetro de desgaste, todos os desvios padrão sejam igualados aos menores identificados no levantamento anterior. Dessa maneira, todas as séries pertinentes a bandagem serão ajustadas para um desvio padrão de aproximadamente 0,06611 (rodeiro 1), as séries de espessura de friso serão ajustadas para desvio padrão de cerca de 0,11217 (rodeiro 1) e, por fim, as séries de altura para um desvio de 0,07327 (rodeiro 2).

Foram removidos das séries, em relação aos dados até então disponíveis, 1,1% dos relativos à bandagem, 6,2% dos relativos à espessura e 1,6% dos relacionados a altura de friso. Com isso, foram obtidos os resultados na tabela abaixo das séries finais de dados por parâmetro por posição de rodeiro.

Tabela 3 - Sumário Estatístico das Séries de Dados Ajustados por Posição e Parâmetro

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
BD1	536	0	0,09911	0,00286	0,06611	0,00803	0,05080	0,08299	0,12944	0,34198
BD2	492	0	0,09416	0,00298	0,06620	0,00516	0,04543	0,07834	0,12304	0,33829
BD3	504	0	0,09715	0,00295	0,06634	0,00609	0,04969	0,07605	0,12536	0,33820
BD4	515	0	0,09702	0,00291	0,06602	0,00785	0,05098	0,07923	0,11975	0,32837
BD5	473	0	0,09381	0,00304	0,06603	0,00641	0,04367	0,07577	0,12331	0,32787
BD6	521	0	0,09918	0,00291	0,06635	0,00627	0,05118	0,08129	0,12971	0,33817
EF1	424	0	0,10173	0,00545	0,11217	0,00628	0,03491	0,06535	0,11750	0,62617
EF2	279	0	0,09730	0,00673	0,11248	0,00610	0,02802	0,05409	0,11404	0,55586
EF3	300	0	0,10265	0,00653	0,11309	0,00651	0,03350	0,06121	0,11698	0,58005
EF4	308	0	0,10955	0,00649	0,11389	0,00743	0,03460	0,06517	0,12037	0,49801
EF5	258	0	0,10465	0,00715	0,11484	0,00610	0,03127	0,05423	0,12988	0,52980
EF6	366	0	0,10689	0,00597	0,11423	0,00651	0,03614	0,06643	0,12454	0,61350
AF1	635	0	0,10732	0,00293	0,07390	0,00745	0,05561	0,08887	0,14098	0,38009
AF2	599	0	0,09771	0,00299	0,07327	0,00623	0,04573	0,07453	0,12775	0,38955
AF3	631	0	0,10174	0,00294	0,07391	0,00633	0,04786	0,07790	0,13274	0,34902
AF4	641	0	0,10418	0,00291	0,07358	0,00517	0,05168	0,08432	0,13437	0,38454
AF5	586	0	0,09457	0,00304	0,07360	0,00517	0,04274	0,07203	0,12130	0,35750
AF6	628	0	0,10464	0,00293	0,07351	0,00517	0,05185	0,08295	0,14031	0,35465

Para a etapa de simulação dos resultados de políticas alternativas de manutenção serão utilizadas duas formas de taxas de desgaste distintas, que serão comparadas entre si em termos de suas conclusões: uma determinística e uma probabilística⁶.

⁶ Apesar de se estar lidando com um sistema naturalmente probabilístico, ou seja, sujeito a inúmeras variáveis e fatores aleatórios que tornam indefinida a quantidade de desgaste que um determinado rodeiro sofrerá ao longo de sua operação, a utilização de uma taxa de desgaste determinística se justifica por sua aplicação no Sistema de Gestão de Manutenção (Oracle® cMRO) da MRS Logística S/A, no qual não é possível a utilização de uma distribuição de probabilidade para representação da taxa de desgaste, mas sim, apenas seu valor esperado.

A obtenção das taxas de desgaste determinísticas deve ser orientada pelo valor esperado de uma determinada distribuição de probabilidade que melhor se ajuste aos dados analisados. Novamente em função das características do fenômeno que é estudado e, portanto, do perfil de assimetria acentuada dos dados conforme demonstrado nas figuras 25, 26 e 27, foi adotado como valor esperado de taxa de desgaste para cada parâmetro e posição de rodeiro sua mediana, destacada na Tabela 3. Tais valores evidenciam as características de desgaste e operacionais de senso comum na operação ferroviária, em geral mais intensos para os rodeiros nas posições 1 e 6, e mais brandos para os rodeiros das posições 2 e 5.

Para identificação das curvas de distribuição de probabilidade que melhor se ajustam a cada uma das séries de dados será utilizado o *software* Rockwell® InputAnalyzer, que fará a identificação da curva de probabilidade com menor erro quadrático e seus parâmetros no mesmo formato que será utilizado como entrada para a simulação no Arena, e do Minitab, que identificará os parâmetros de aderência da mesma curva em uma interface mais amigável.

Na etapa de simulação dos dados serão desconsiderados os rodeiros 4, 5 e 6, pertinentes ao segundo *truck*, tanto para fins de redução do esforço computacional de simulação da árvore de decisão de manutenção em diferentes políticas estudadas, quanto em função de características muito similares de desgaste, dado que as locomotivas em questão frequentemente no arranjo de dupla seta, ou seja, com a locomotiva da cabeça da composição de frente e a comandada de recuo, o que faz com que o desgaste do primeiro rodeiro da locomotiva de frente seja compatível ao do sexto rodeiro da locomotiva de recuo, e assim por diante, tal como exibido na figura abaixo.

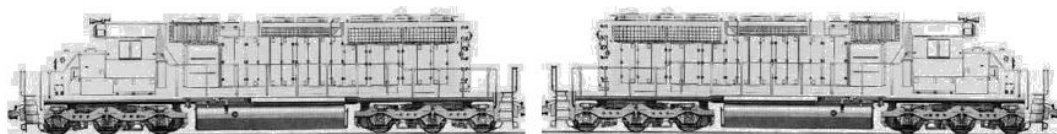


Figura 28 - Operação de Locomotivas AC44MIL em Dupla Seta (Fonte: VIANNA, 2012)

As curvas de probabilidade que melhor se ajustam às séries de dados serão obtidas a partir do *software* InputAnalyzer, que é requisito para geração dos parâmetros da distribuição de probabilidade em formato adequado à utilização no Arena, pela curva com menor erro quadrático em relação aos valores empíricos esperados. O Minitab será usado para teste de aderência da curva de probabilidade em questão, com seu respectivo p-valor.

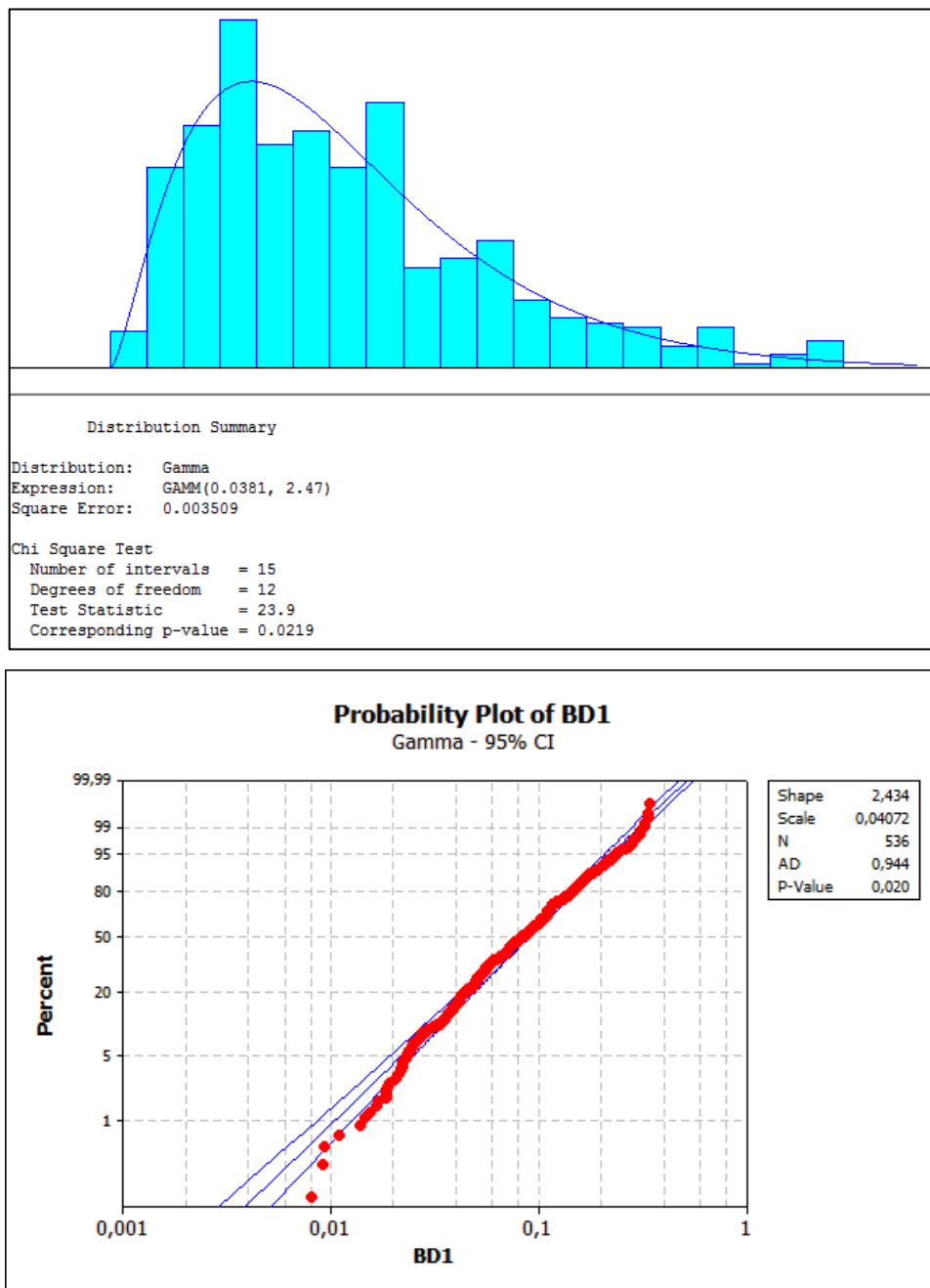


Figura 29 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados de BD1

Aos dados da série BD1 (bandagem do rodeiro da posição 1), a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou foi a Gamma (GAMM(0.0381,2.47)), sendo os parâmetros a escala e a forma, respectivamente. O p-valor para o teste de aderência de Anderson-Darling é maior que 0,005, sinalizando um ajuste satisfatório da distribuição aos dados empíricos.

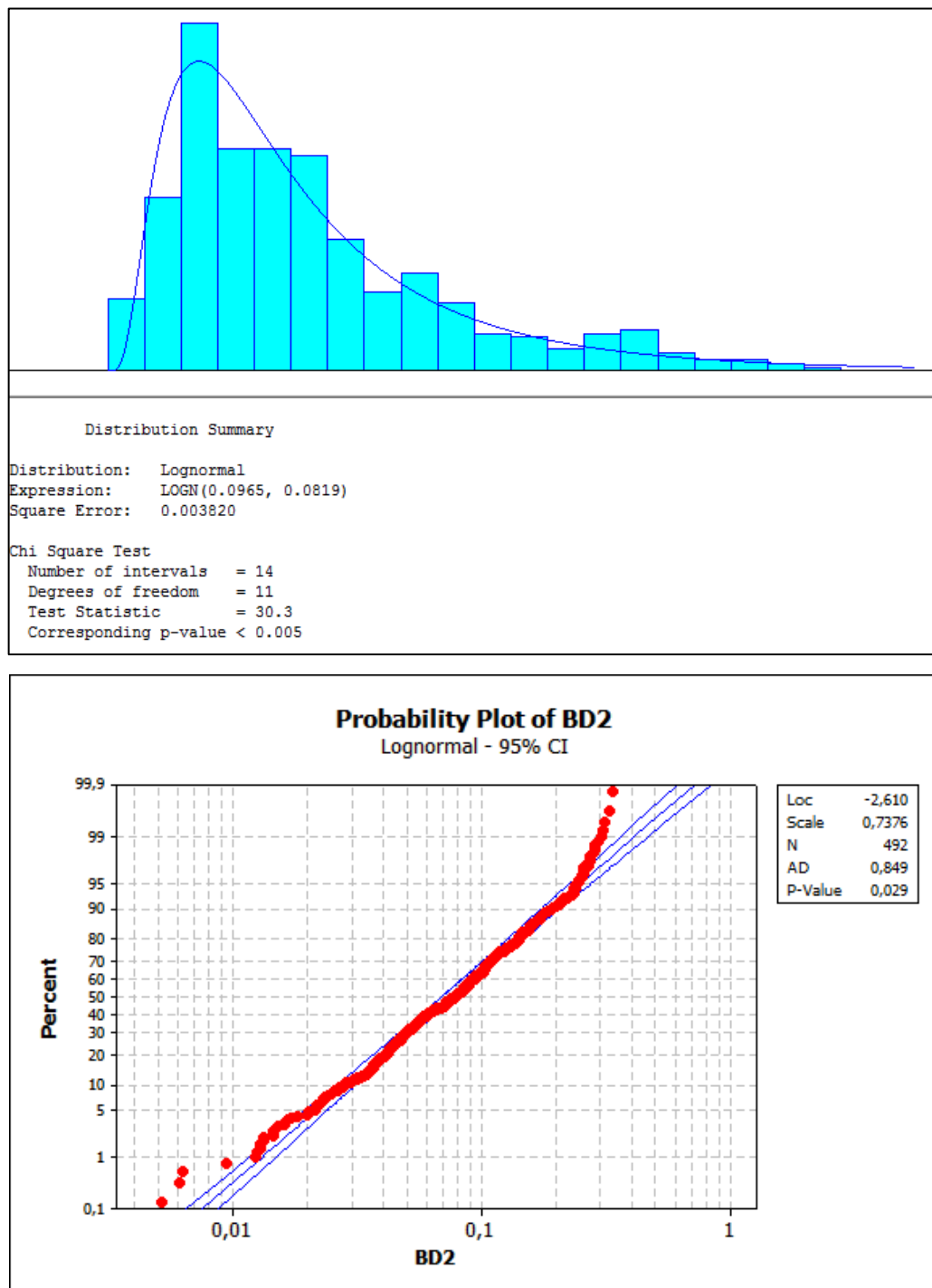


Figura 30 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados BD2

Para a série BD2, melhor se ajustou a distribuição Lognormal, com parâmetros de log da média e log do desvio de respectivamente LOGN(0.0965,0.0819), no formato compatível com o *software* Arena. O p-valor para o teste de aderência deste ajuste também é maior que 0,005, ou seja, a distribuição é representativa dos dados empíricos.

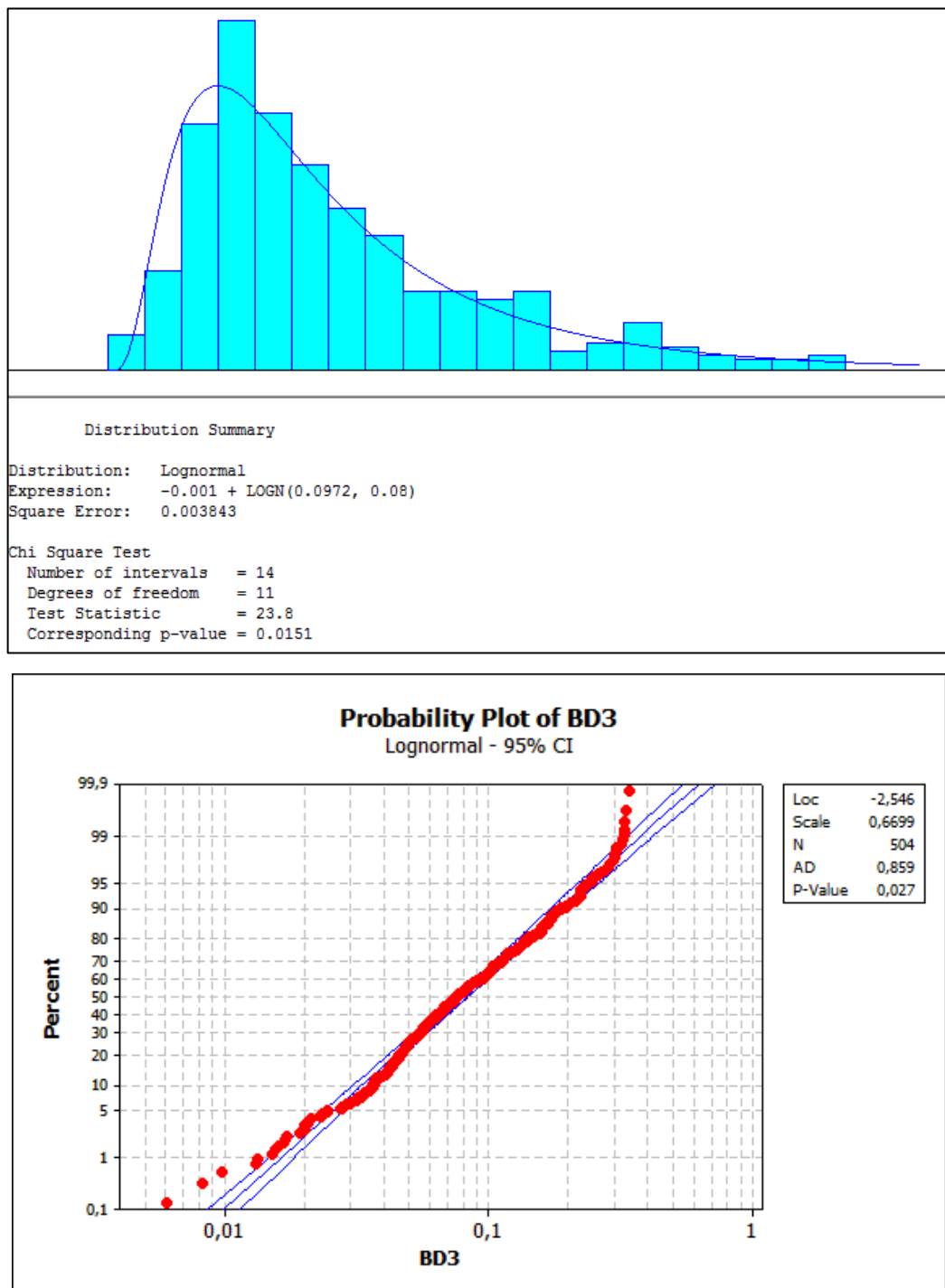


Figura 31 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados BD3

Para a série de dados BD3, a distribuição lognormal melhor se ajustou, com p-valor superior a 0,005. Por outro lado, o teste de Anderson-Darling (AD) indica ajuste satisfatório em relação aos de BD1 e BD2, dado que quanto menor tal medida, melhor a aderência da distribuição. Os parâmetros que serão utilizados no *software* Arena para simulação do desgaste de bandagem do rodeiro 3 são, portanto, $\text{LOGN}(0.0972,0.08)-0.001$.

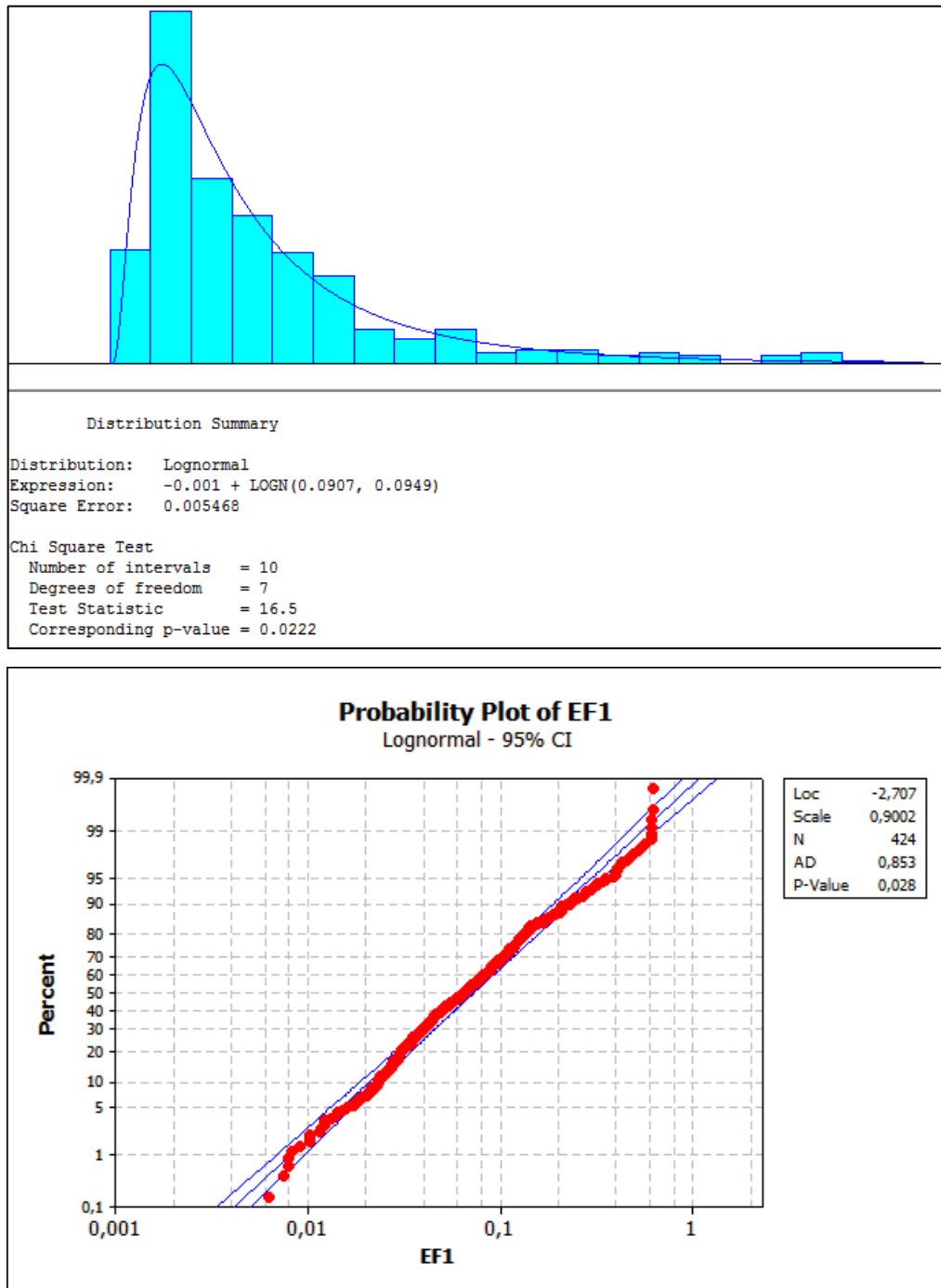


Figura 32 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados EF1

Em relação à espessura de friso do rodeiro da posição 1 (EF1), a distribuição $\text{LOGN}(0.0907, 0.0949) - 0.001$ melhor se ajustou, conforme sinaliza o teste de Anderson-Darling (AD) compatível aos ajustes dos parâmetros já verificados, apesar do p-valor inferior a 0,05.

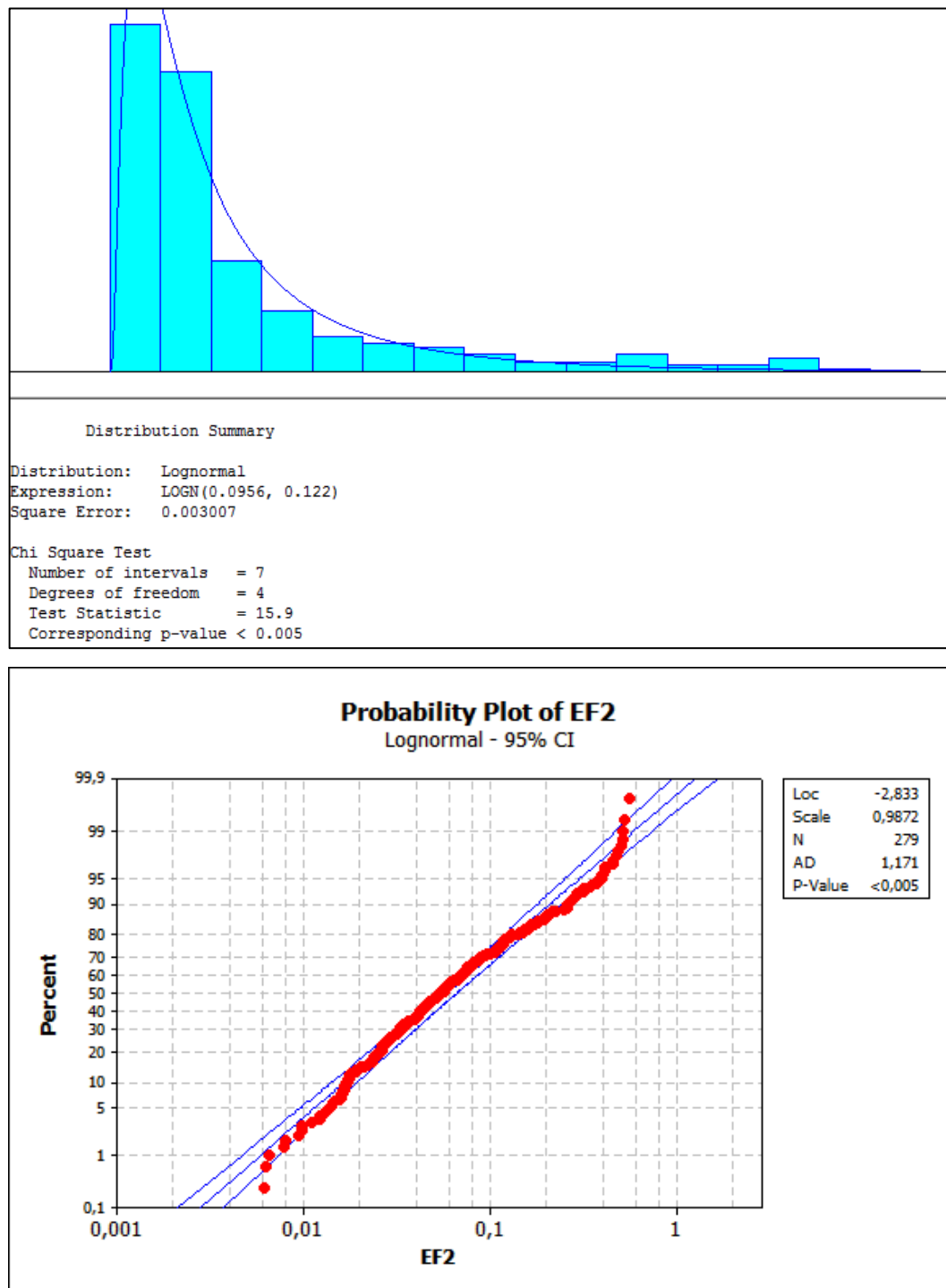


Figura 33 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados EF2

O ajuste de uma distribuição de probabilidade aos dados da série EF2 não foi satisfatório em relação a nenhum dos testes de aderência utilizados. Apesar disso, os parâmetros identificados como os que melhor se ajustaram à série de dados em questão pelo Input Analyzer serão aplicados no exercício de simulação, e posteriormente avaliados quanto a sua adequação à realidade.

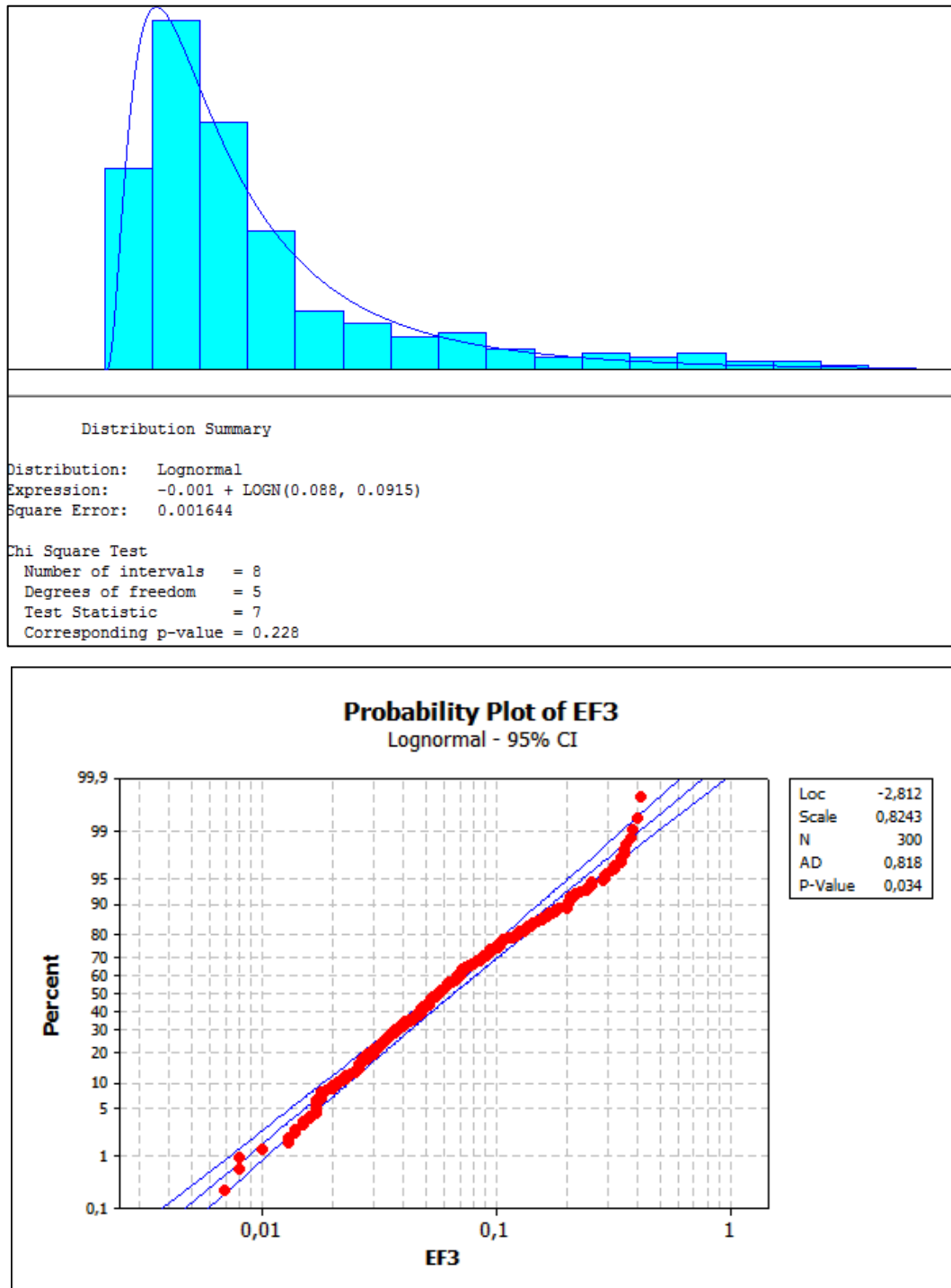


Figura 34 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados EF3

Os dados da série de EF3 se ajustaram mais adequadamente à distribuição Lognormal, com teste de Anderson-Darling compatível ao das demais distribuições já analisadas (0,818). Com isso, os parâmetros de log da média e de log do desvio, respectivamente, no formato a ser utilizado no Arena, são $\text{LOGN}(0.088,0.0915)-0.001$.

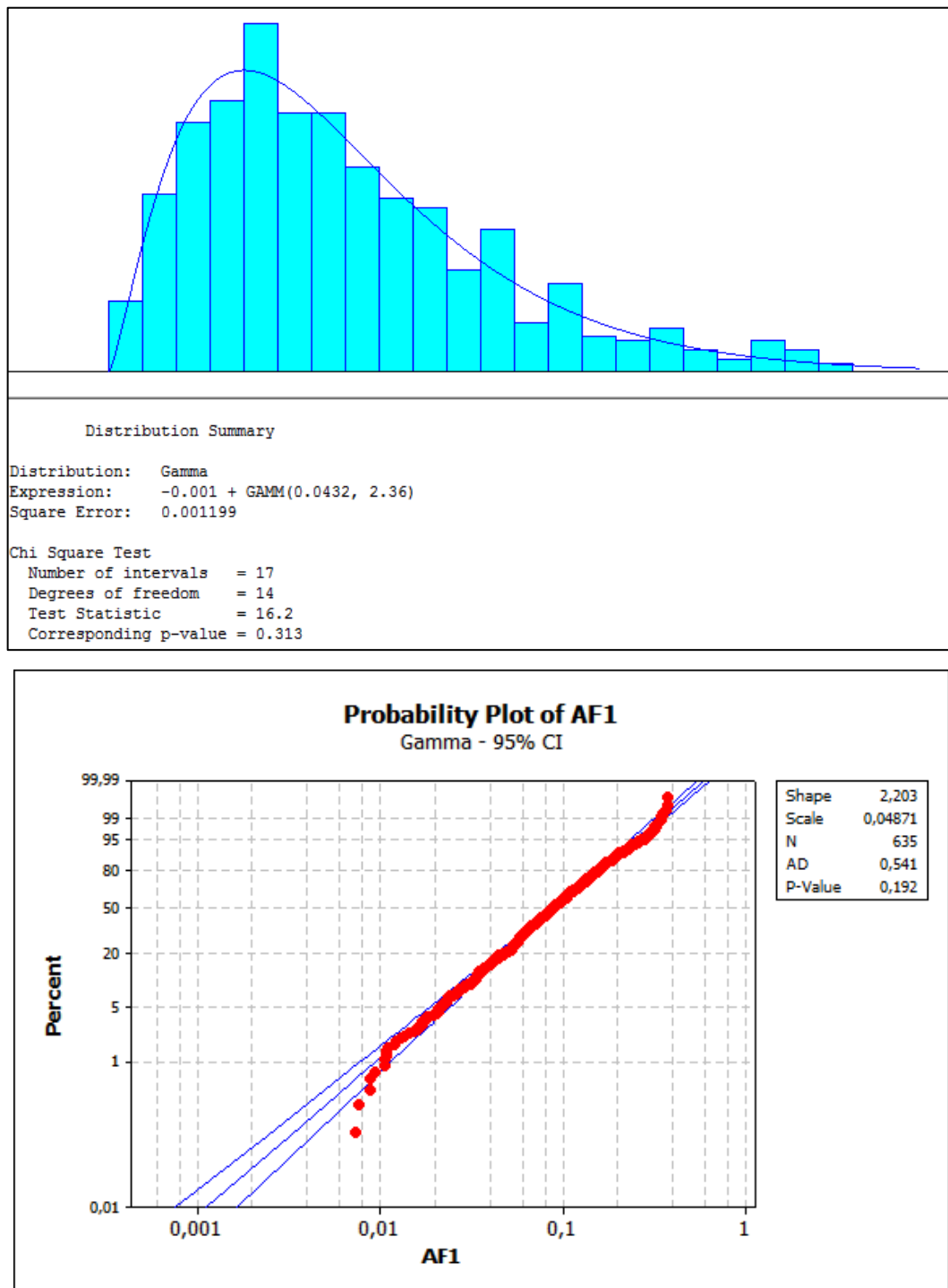


Figura 35 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados AF1

A distribuição GAMM (0.0432, 2.36)-0,001 ajustou-se com um dos melhores níveis de aderência dentre todas as séries de dados, dado o p-valor de 0.192 e teste de Anderson-Darling consideravelmente menor do que os observados para as demais séries.

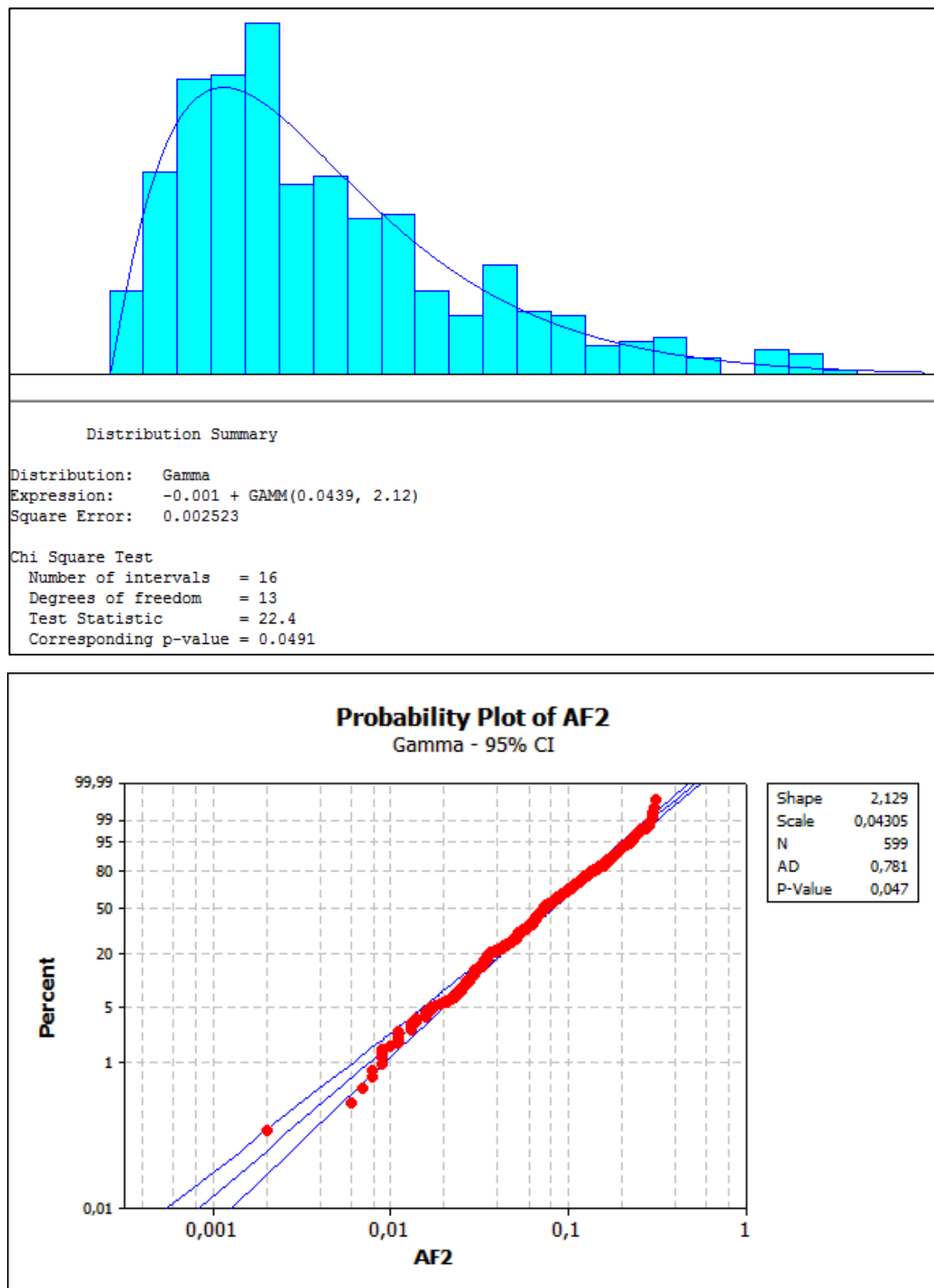


Figura 36 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados AF2

A série de dados para AF2 também foi se ajustou adequadamente à distribuição $\text{GAMM}(0.0439, 2.12)-0.001$, conforme se pode verificar pelo teste de Anderson-Darling de 0.781 e pelo p-valor de aderência da distribuição aos dados empíricos de 0.047.

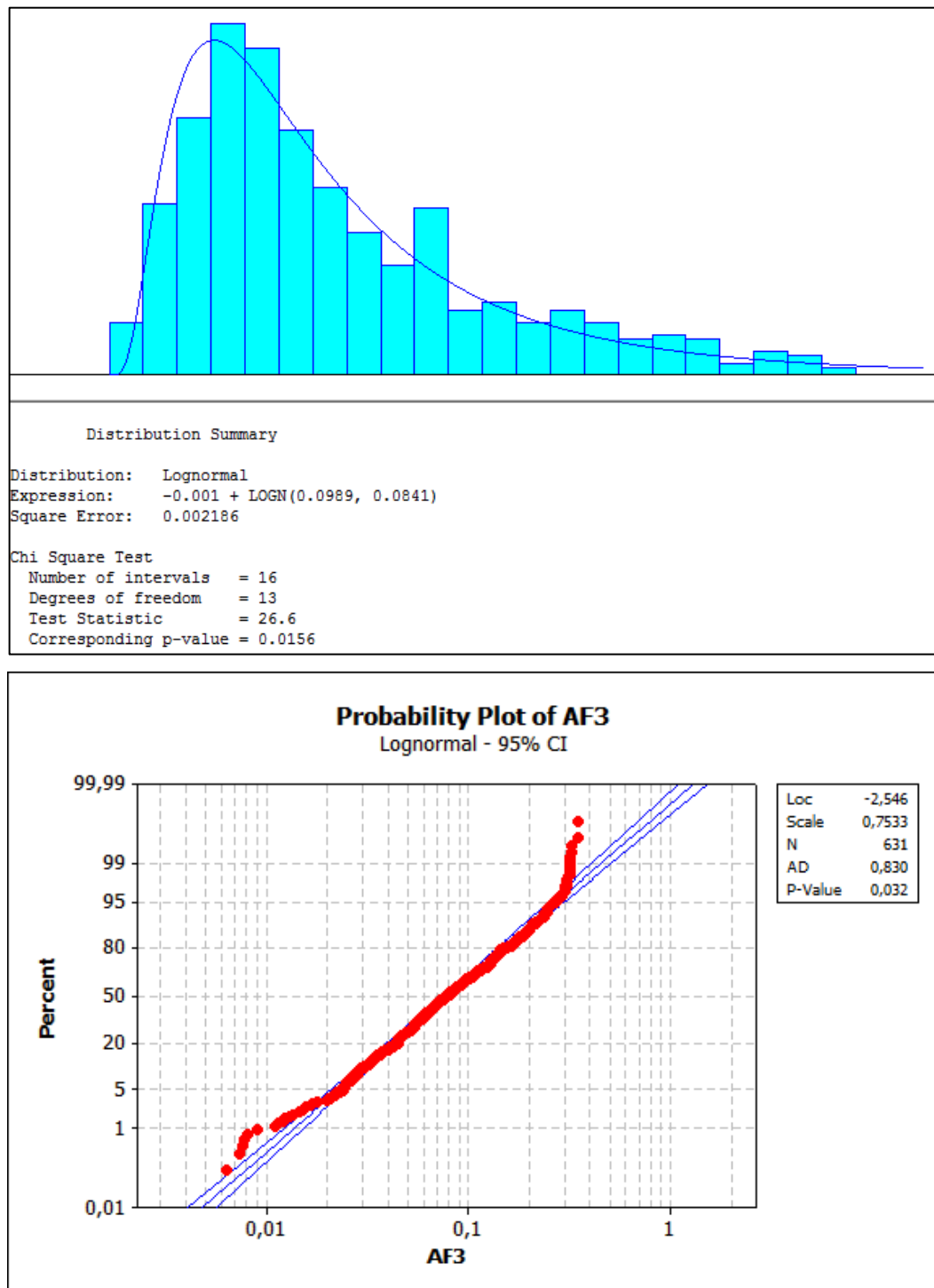


Figura 37 - Resumo de Ajuste da Distribuição de Probabilidade aos Dados AF3

Por fim, para os dados da série AF3, a distribuição Lognormal melhor se ajustou, conforme se pode verificar pelo p-valor e teste de Anderson-Darling compatíveis com os ajustes já estudados, com os parâmetros de $\text{LOGN}(0.0989, 0.0841)-0.001$.

Apesar do objeto de estudo do presente trabalho ser o comportamento de elementos mecânicos sujeitos a desgaste, os quais são usualmente modelados a partir da distribuição de probabilidade de Weibull, optou-se por aplicar as curvas de probabilidade mais indicadas pelo *software* InputAnalyzer, em função dos níveis de aderência mínimos necessários para um nível de confiança considerado “básico” na modelagem do problema. Tais níveis de aderência das tendem aumentar em relação aos dados empíricos na medida em que inclusive as causas de problemas evidenciados nas bases de dados, conforme já tratado, também forem sanadas, o que tornará possível iniciativas de simulação ainda mais precisas em relação à que será obtida no item a seguir.

4.2 SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE RODEIROS DE LOCOMOTIVAS

4.2.1 Modelagem de Tomada de Decisão de Manutenção de Rodeiros no ARENA®

O modelo de decisão para manutenção de rodeiros constitui peça chave para a identificação de resultados que possam ser úteis para a melhoria de políticas de manutenção. A primeira etapa dessa fase consistiu no levantamento das políticas de manutenção que deveriam ser convenientemente estudadas para que, em seguida, fossem modeladas suas tomadas de decisão no *software* Arena e, por fim, seus resultados pudessem ser comparados.

Na determinação dos critérios de manutenção para cada política, foram invariavelmente respeitados os limites de segurança operacional dos rodeiros, tal como já citado, quais sejam um mínimo de 25,4 mm de bandagem, altura máxima de 38,0 mm e espessura mínima de 21,0 mm. Para todas as políticas de manutenção, a altura final de friso após o fresamento é de 28,0 mm, compatível à altura do rodeiro novo, conforme as práticas atuais e padrão de manutenção. As políticas de manutenção a serem estudadas foram, então, identificadas a partir da combinação de critérios críticos para a decisão de manutenção dos rodeiros. Tais critérios em questão são:

- a) Altura de Friso a partir da qual é necessário o fresamento, que foi avaliado para 3 possibilidades: a partir de 35,0 mm; a partir de 36,0 mm ou a partir de 37,0 mm;
- b) Espessura de Friso a partir do qual é necessário o fresamento, que foi avaliado para 4 possibilidades: menor que 25,0 mm, chamado de fresamento econômico; menor que 24,0 mm; menor que 23,0 mm ou menor que 22,0 mm;

- c) Espessura de Friso final após procedimento de fresamento, que foi avaliado para 5 possibilidades: 28,0 mm; 29,0 mm; 30,0 mm; 31,0 mm ou 32,0 mm, compatível à medida do rodeiro novo.
- d) Utilização da opção de inversão de rodeiros, que foi avaliada para 2 possibilidades: políticas com a utilização de inversão, e políticas sem o uso da inversão de rodeiros.

Com a formação de políticas de manutenção alternativas a partir da combinação de cada uma dessas possibilidades citadas acima, foram avaliadas 120 diferentes políticas, tanto no cenário de taxas de desgaste determinísticas, quanto probabilísticas. O resumo descritivo das políticas se encontra no Anexo II, item 8.2.

Em função da utilização de custos hipotéticos para as decisões de substituição de rodeiro (rodeiro novo e mão de obra), fresamento de rodeiro (mão de obra) e inversão de rodeiro (mão de obra) que, apesar de se aproximarem significativamente da realidade, são fictícios, tomou-se a decisão de criar uma política de manutenção “referencial”, como base comparativa para os resultados de custos de manutenção como um todo, na qual apenas substituições são feitas de acordo com os limites de segurança citados anteriormente, ou seja, sem a execução de fresamento ou inversão de rodeiros. Os custos por quilometro rodado resultantes da utilização dessa política hipotética serão usados, portanto, como referência de comparação para os mesmos resultados das demais políticas de manutenção.

É senso comum de que os limites a serem considerados “ideais” de manutenção dos rodeiros sejam dinâmicos, ou seja, dependam da condição em que o rodeiro se encontra em relação às medidas do *truck* como um todo e, no limite, dos rodeiros do outro *truck*. No entanto, ainda assim é pertinente a identificação de um padrão de decisão que deva ser usado como referência para a maior parte das situações, uma vez que leva aos melhores resultados de custo por quilometragem rodada.

O modelo de simulação do Arena para a política de referência citada acima foi construído conforme a seguir:

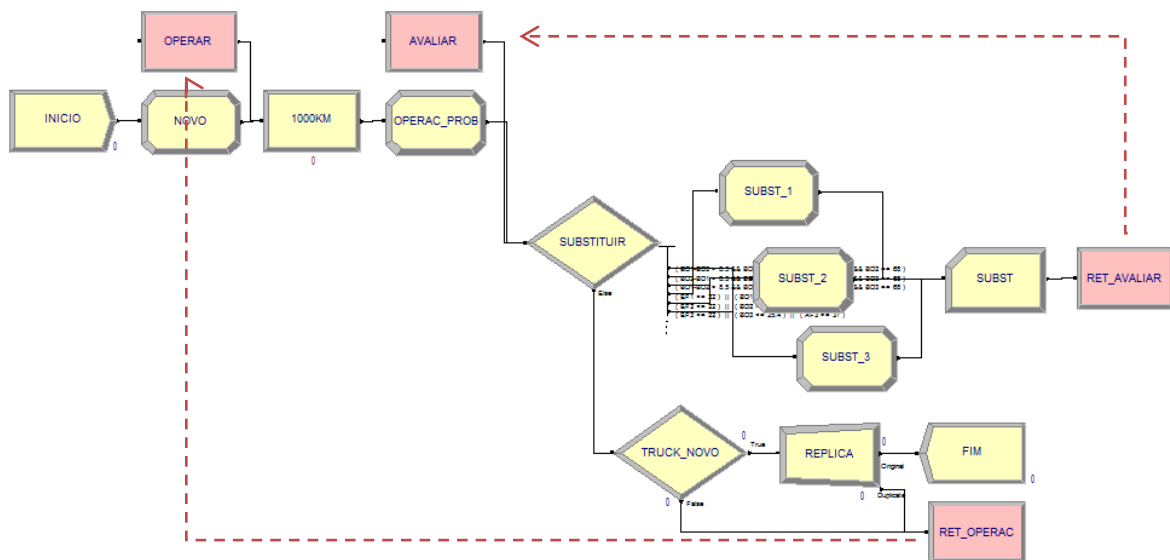


Figura 38 - Modelo de Simulação em Arena para Política de Manutenção de Referência

Tal como para os modelos para as demais políticas de manutenção, apenas uma entidade é gerada durante toda a simulação, representando o *truck* com os rodeiros das posições 1, 2 e 3. Ao passar pelo processo *Assign* “NOVO”, a entidade recebe os atributos com as medidas de um rodeiro novo, tal como demonstrado na figura abaixo:

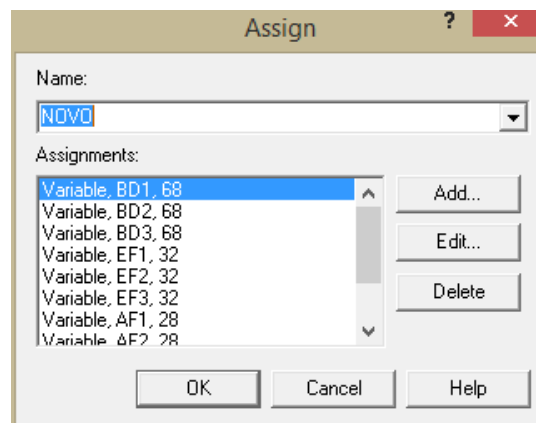


Figura 39 - Processo *Assign* "NOVO" no Arena para medidas de rodeiro novo

O processo “1000KM” é utilizado para dar um *delay* ou atraso de 1 hora na entidade, para que o contador do Arena possa registrar o passo equivalente a mil quilômetros de operação de um *truck*. Em seguida, o *Assign* “OPERAC_PROB” ou “OPERAC_DET” alteram os atributos dos parâmetros de bandagem, espessura e altura para cada posição de rodeiro de acordo com as taxas probabilísticas ou determinísticas, respectivamente, encontradas no subcapítulo anterior, conforme pode ser verificado na figura abaixo.

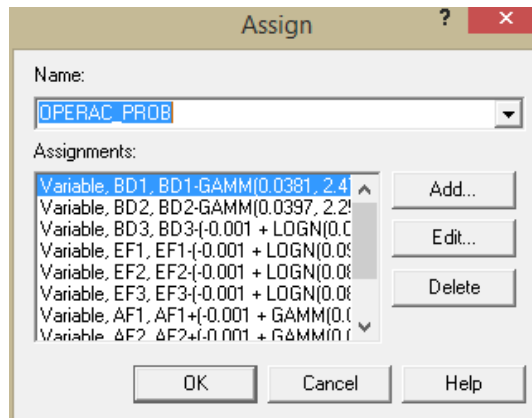


Figura 40 - Processo *Assign* "OPERAC_PROB" para simulação do desgaste dos parâmetros do rodeiro decorrentes de 1000 km de operação

Posteriormente, o *truck* entra na árvore de decisão para a política de manutenção em questão, a partir do processo *Decide* "SUBSTITUIR", que consiste apenas de substituição do rodeiro caso o mesmo chegue às medidas limite de segurança operacional já citadas ou caso a diferença de bandagem entre 2 rodeiros do mesmo *truck* seja superior a 8,5 mm, conforme a imagem abaixo.

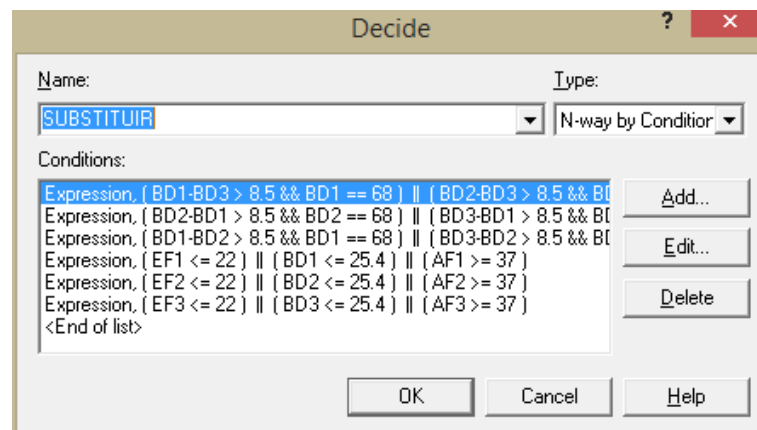


Figura 41 - Processo *Decide* "SUBSTITUIÇÃO" para decisão de substituição de rodeiros

Caso algum dos rodeiros se enquadre no critério de substituição, a entidade passa por um novo *Assign* que redefine as medidas dos rodeiros conforme um novo ("SUBST_1", "SUBST_2" ou "SUBST_3"), passa pelo contador de substituições "SUBST" que será usado para geração das estatísticas da política, e entra no *Transfer* "RET_AVALIAR", que transfere a entidade para a entrada "AVALIAR", conforme exibido na figura 38, para que o *truck* possa ser reavaliado quanto à necessidade de outra substituição, inclusive para equalização das medidas de bandagem.

Caso nenhum dos rodeiros se enquadre nos critérios de substituição, os mesmos são direcionados para um novo *Decide* “TRUCK_NOVO”. Caso os três rodeiros tenham sido substituídos anteriormente, situação equivalente à de um *truck* novo, a entidade é direcionada para o *Separate* “REPLICA”, que cria duas entidades idênticas à anterior: uma que é direcionada para o *Dispose* “FIM”, para contagem de *trucks* substituídos na simulação, e outra que é direcionada para o *Transfer* “RET_OPERAC”. Caso os três rodeiros não tenham sido substituídos simultaneamente, a entidade é transferida do *Decide* “TRUCK_NOVO” diretamente para o *Transfer* “RET_OPERAC”, que por sua vez, transfere a entidade para a entrada “OPERAR”, conforme exibido na figura 38, a partir da qual passará por novo *Delay* e revisão dos atributos para desgaste previsto em mil quilômetros de operação, e assim por diante.

Diferentemente da política de referência, as demais 120 políticas mapeadas e avaliadas são constituídas de uma árvore de decisão mais complexa, cuja visão geral encontra-se disponível no Anexo III, item 8.3. Tal árvore se inicia, porém, da mesma maneira já mostrada, conforme se pode verificar na figura abaixo.

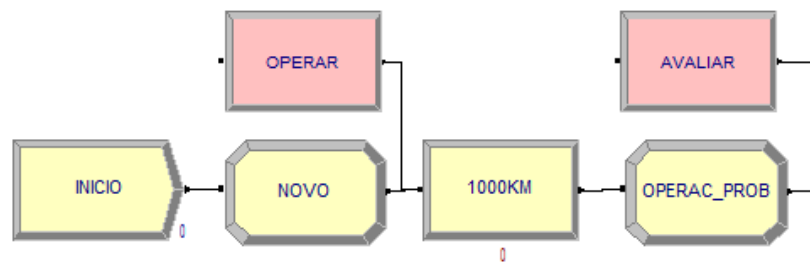


Figura 42 - Início da Árvore de Simulação para Políticas de Manutenção de Rodeiros

A decisão de substituição de um rodeiro foi separada, nas políticas de manutenção avaliadas, pelos possíveis critérios que levam à substituição do rodeiro. Tratam-se, porém, dos mesmo utilizados para a política de referência, uma vez que são baseados em normas de segurança operacional. Tal como já mostrado, a decisão de substituição do rodeiro é a primeira avaliada, logo após o ajuste nos parâmetros do rodeiro em função de 1000 quilômetros de operação simulada.

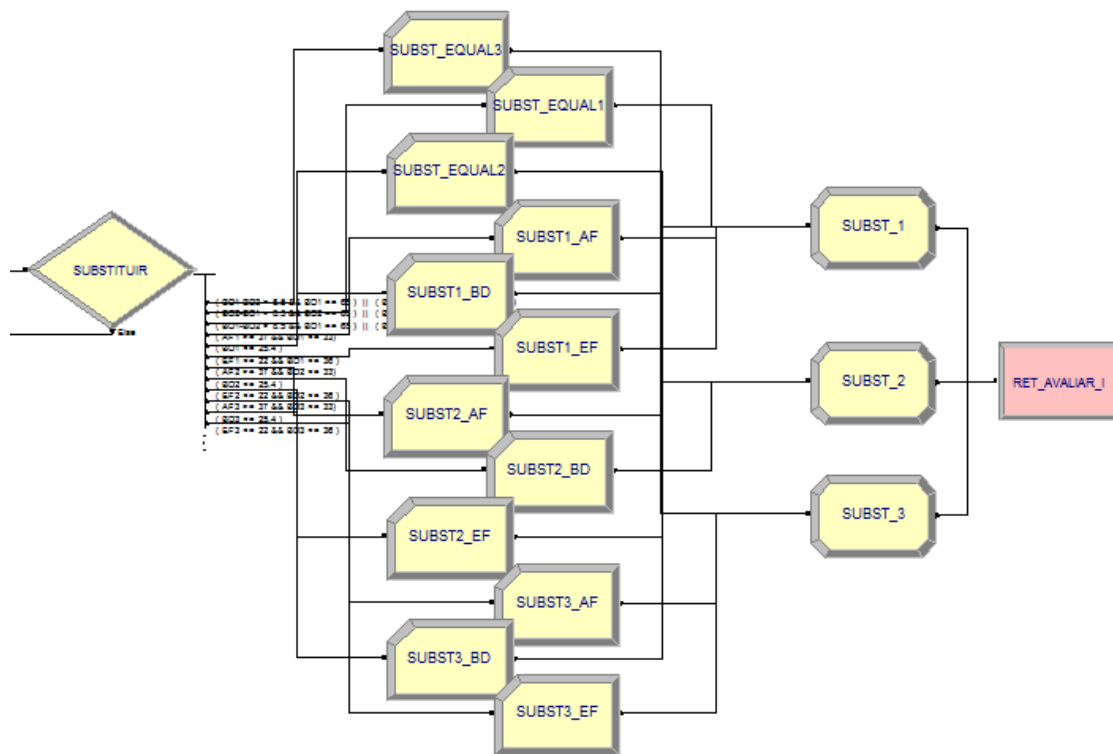


Figura 43 - Árvore de Decisão e Registro de Substituição de Rodeiros

Os contadores “SUBST_EQUAL3”, “SUBST_EQUAL1” e “SUBST_EQUAL2” quantificam as necessidades de substituição de rodeiros por equalização de medidas com outro que já tenha sido substituído. Os demais contadores (“SUBST1_AF”, “SUBST1_BD”, “SUBST1_EF”, “SUBST2_AF”, “SUBST2_BD”, “SUBST2_EF”, “SUBST3_AF”, “SUBST3_BD” e “SUBST3_EF”), visam registrar estatisticamente as motivações de substituição dos rodeiros, ou seja, se por altura de friso, por espessura de friso, ou por bandagem. Em todos os casos, os rodeiros passam pelos *Assign* “SUBST_1”, “SUBST_2” ou “SUBST_3”, que farão a alteração dos atributos das medidas do rodeiro substituído para as compatíveis com as de um novo. Novamente, o *Transfer* “RET_AVALIAR_I” envia a entidade (*truck*) para a entrada “AVALIAR” mostrada na figura 42.

Caso nenhum rodeiro se enquadre nos limites definidos para substituição, a entidade do *truck* é encaminhada para a decisão a respeito do fresamento dos rodeiros por altura de friso, e posteriormente, fresamento por espessura de friso.

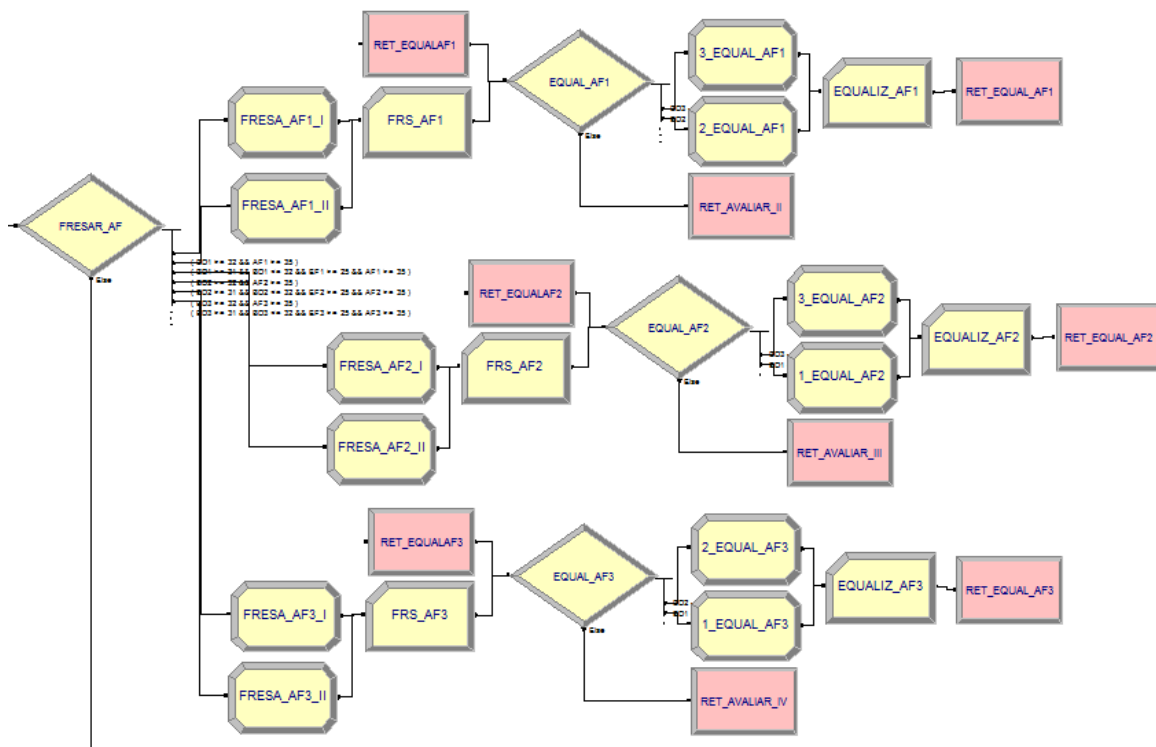


Figura 44 - Árvore de Decisão e Registro para Fresamento por Altura de Friso

O processo *Decide* “FRESAR_AF” verifica se algum dos rodeiros atende aos critérios para fresamento por altura de friso, conforme figura abaixo e, dependendo do critério a que atende, o direciona para diferentes *Assign* para alteração dos parâmetros de altura, bandagem e espessura de frisos, conforme abordado no Anexo II.

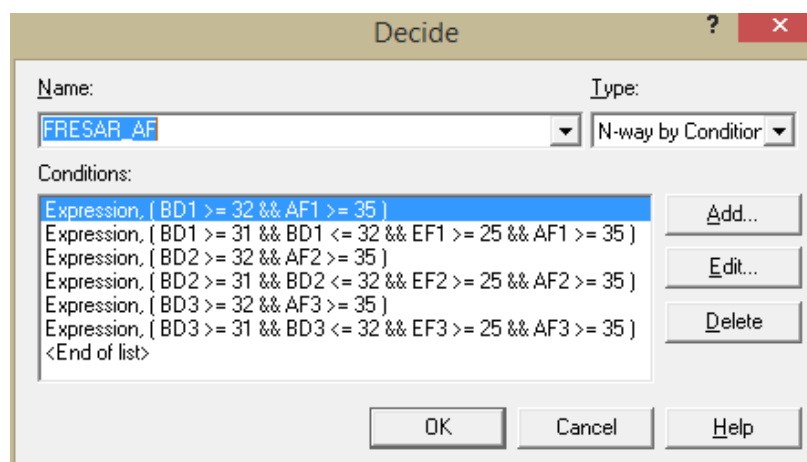


Figura 45 - Processo *Decide* para decisão de fresamento de rodeiro por altura de friso

A imagem abaixo exemplifica a alteração dos parâmetros feita pelos processos *Assign* “FRESA_AF1_I”, “FRESA_AF1_II”, “FRESA_AF2_I”, “FRESA_AF2_II”, “FRESA_AF3_I” e “FRESA_AF3_II”, na política 001.

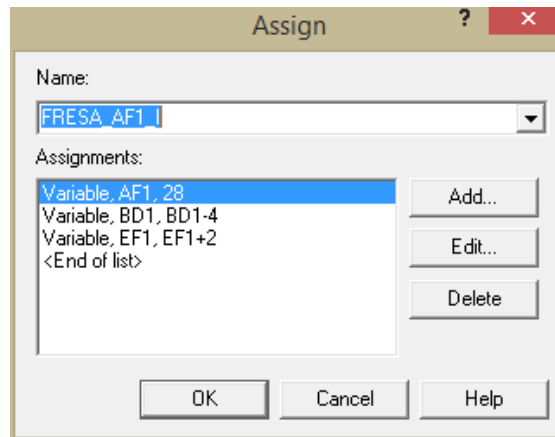


Figura 46 - Alteração nos parâmetros após fresamento por altura de friso segundo política 001

Os contadores “FRS_AF1”, “FRS_AF2” e “FRS_AF3” quantificam a quantidade de fresamentos motivados por altura de friso, que serão usados posteriormente para avaliação dos resultados. Os *Decide* “EQUAL_AF1”, “EQUAL_AF2” e “EQUAL_AF3” verificam a diferença entre as medidas de bandagem dos rodeiros, para a necessidade de novo fresamento de equalização das bandagens.

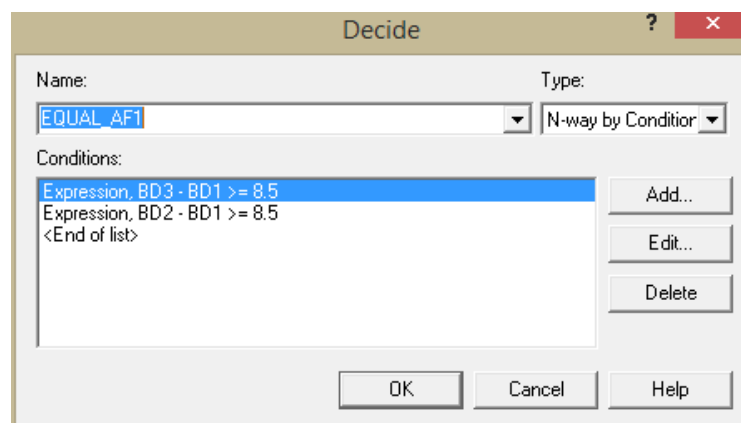


Figura 47 - Processo *Decide* para necessidade de equalização de rodeiros com o rodeiro 1

Caso algum rodeiro se enquadre na necessidade de fresamento para equalização, o mesmo terá sua bandagem equalizada com o rodeiro que foi fresado e terá o parâmetro de altura de friso ajustado para 28,0 mm e o parâmetro de espessura de friso ajustado para o menor valor entre 32,0 mm e a espessura existente acrescida de 6,0 mm (dado que a

equalização irá retirar aproximadamente 8,0 mm de bandagem, que é a diferença entre rodeiros que necessitam de equalização entre si), conforme mostrado na imagem abaixo.

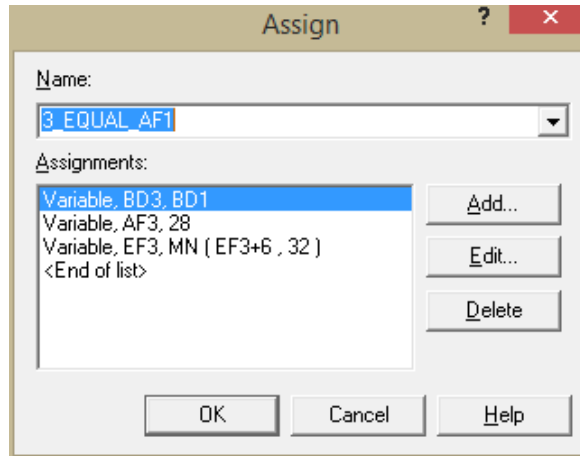


Figura 48 - Alteração nos parâmetros após fresamento para equalização com rodeiro 1

Após a equalização, a entidade do *truck* passa pelo contador de fresamentos por equalização (“EQUALIZ_AF1”, “EQUALIZ_AF2” ou “EQUALIZ_AF3”) e é enviada pelo *Transfer* “RET_EQUAL_AF1”, “RET_EQUAL_AF2” ou “RET_EQUAL_AF3” para a entrada de mesmo nome, anterior aos *Decide* “EQUAL_AF1”, “EQUAL_AF2” e “EQUAL_AF3”, neste mesmo trecho da árvore, para avaliação da necessidade de equalização de um outro rodeiro.

Caso não seja necessária a equalização de nenhum rodeiro após o fresamento por altura ou após equalização de um ou mais rodeiros, a entidade do *truck* é enviada pelo *Transfer* “RET_AVALIAR_II”, “RET_AVALIAR_III” ou “RET_AVALIAR_IV” para o início da árvore de decisão, na entrada “AVALIAR”, para reavaliação quanto a outros procedimentos de manutenção necessários aos rodeiros.

A árvore de decisão para fresamento por espessura de friso e seus desdobramentos são idênticos aos demonstrados para a altura de friso, com a simplificação de ter apenas um possível critério de adequação para fresamento e, portanto, apenas um processo *Assign* por rodeiro (“FRESA_EF1”, “FRESA_EF2” e “FRESA_EF3”), conforme se pode verificar na figura abaixo.

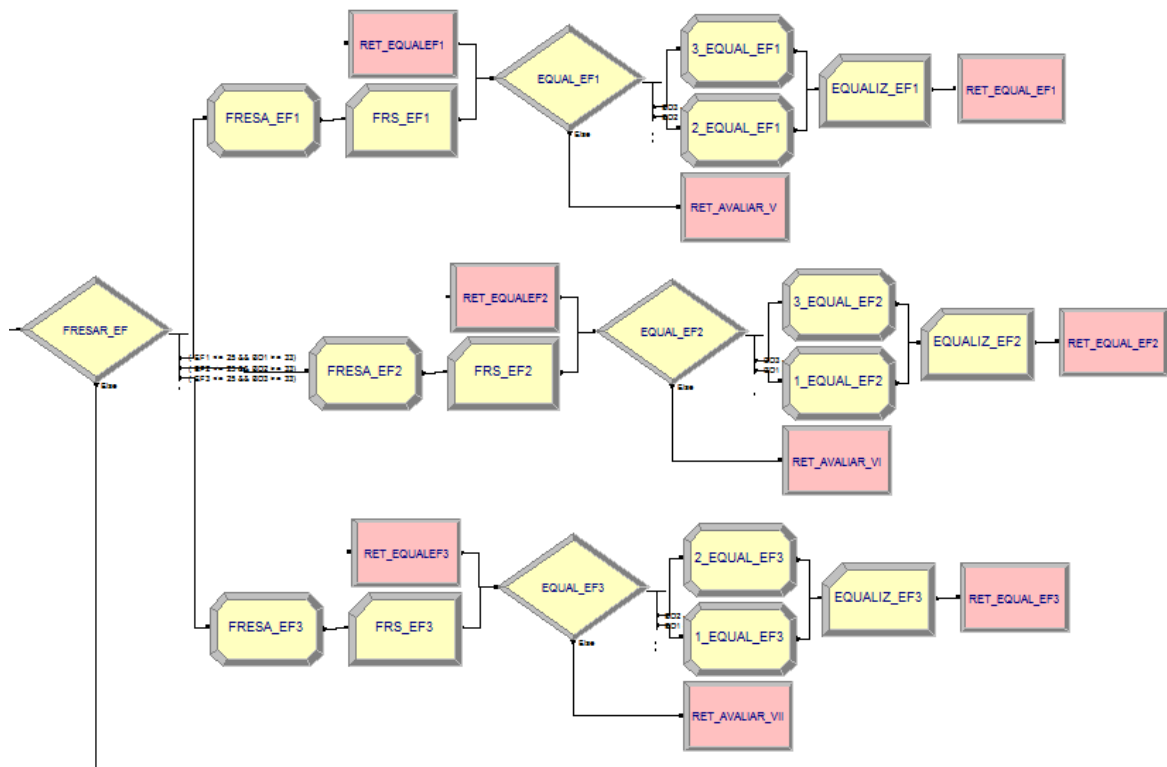


Figura 49 - Árvore de Decisão e Registro para Fresamento por Espessura de Friso

A partir da avaliação de necessidade de substituição ou de fresamento, verifica-se a possibilidade de inversão dos rodeiros (nas políticas em que a inversão é uma opção), que é realizado por meio do arranjo abaixo.

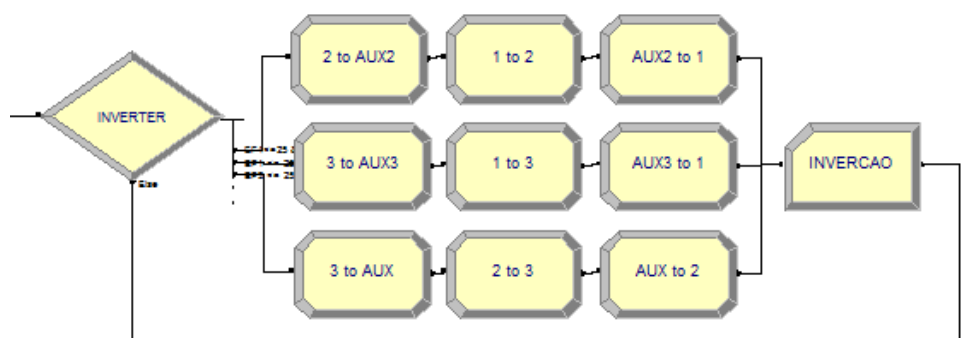


Figura 50 - Árvore de Decisão e Registro para Inversão de Rodeiros

A inversão dos rodeiros pode ser feita entre todas as posições, caso as condições de espessura de friso dos rodeiros sejam satisfeitas conforme a seguir, em ordem de prioridade: 1) rodeiro 1 menor que 25,0 mm e rodeiro 2 maior que 28,0mm; 2) rodeiro 1 menor que 25,0 mm e rodeiro 3 maior que 28,0 mm; 3) rodeiro 3 menor que 25,0 mm e rodeiro 2 maior que 28,0 mm, conforme parametrizado no *Decide* “INVERTER”.

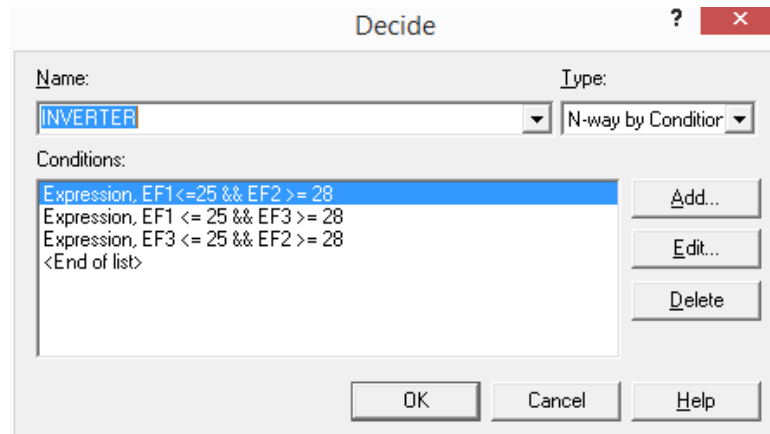


Figura 51 - Critério de Decisão para Inversão de Rodeiros

Caso alguma combinação de medidas se enquadre em tais requisitos, os parâmetros de bandagem, espessura e altura de friso são trocados entre as posições em questão, com o uso de uma variável auxiliar, ou seja, a variável auxiliar recebe os parâmetros do rodeiro “X”, o rodeiro “X” recebe os parâmetros do rodeiro “Y” e o rodeiro “Y” recebe os parâmetros da variável auxiliar. Ao final desse processo, um contador registra a contagem de inversões realizadas durante a simulação.

Caso nenhum rodeiro atenda aos requisitos para inversão, a entidade é direcionada para o mesmo trecho final já comentado para a política de referência, conforme exibido detalhadamente abaixo.

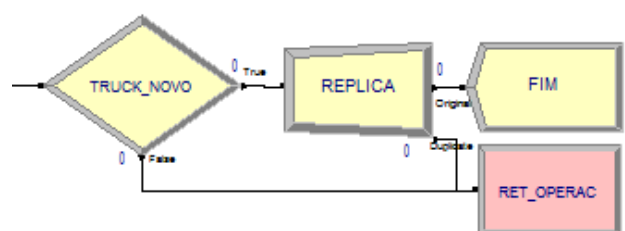


Figura 52 - Trecho Final de um Passo de Simulação

4.2.2 Simulação de Políticas de Manutenção com Taxas Determinísticas e Probabilísticas

Para simulação de custos, foram ainda considerados como custo de manutenção R\$18.000 correspondente ao rodeiro novo (para as decisões de substituição) e custo de mão de obra horária de R\$60. Foi assumido que os procedimentos de substituição, fresamento e inversão são feitos com 4 horas constantes.

A simulação da operação dos rodeiros para todas as 120 políticas de manutenção e taxas de desgaste determinísticas e probabilísticas foi feito para cerca de 1 bilhão de quilômetros de operação de um *truck*. Considerando a operação média de 101.419 km por locomotiva AC44MIL no período de 12 meses estudado, tal simulação equivale à avaliação da operação de 986 *trucks* operando por 10 anos.

Foi ponderado que a presente pesquisa pode ser aprimorada do ponto de vista dos custos utilizados para simulação dos resultados, que apesar de terem atendido ao propósito de um comparativo, não puderam dar dimensão dos custos reais associados a cada política de manutenção. Por fim, é possível que a ordem com que a árvore de decisão é montada influencie no resultado de custos/km rodado de uma política em relação a outra. É imperativo, portanto, que estudos futuros ponderem tal possibilidade.

Os resultados das simulações são tratados no tópico a seguir.

5. RESULTADOS

As políticas de manutenção simuladas a partir das taxas de desgaste probabilísticas foram avaliadas em relação aos critérios citados no início do item 4.2.1, ou seja, altura de friso para fresamento, espessura de friso para fresamento, espessura de friso final e utilização de inversão de rodeiros.

A altura de friso para fresamento a partir da qual é menor o custo de manutenção por quilometro rodado é a de 37,0 mm conforme pode ser verificado no comparativo da tabela e gráfico abaixo. Tal resultado pode ser considerado dentro das expectativas, uma vez que não há ganho explícito algum em se fresar o rodeiro com medidas menores que 37,0 mm, apesar de esta ser uma prática corriqueira em função de paradas de oportunidade e até mesmo redução de margens de risco de segurança operacional.

Altura de Friso	Custo/1000.Km	%
Ref	R\$ 48,60	100,0%
>= 35	R\$ 22,10	45,5%
>= 36	R\$ 22,09	45,4%
>= 37	R\$ 21,75	44,7%

Custo Relativo para Altura de Friso

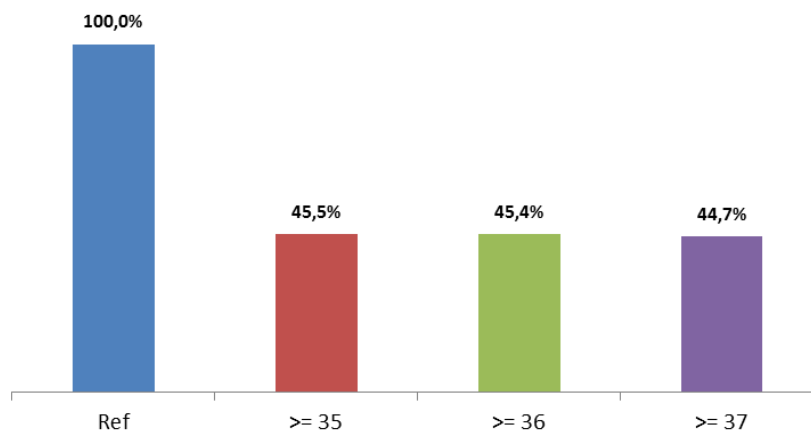


Figura 53 - Resultado para Melhor Altura de Friso para Fresamento

Estes resultados também foram obtidos quando da utilização de taxas de desgaste determinísticas, com a diferença de uma proximidade maior entre o desempenho da política com fresamento a partir de 35,0 mm e a de 37,0 mm.

Tabela 4 - Resultados para Melhor Altura de Friso por Simulação Determinística

AF				
Ref	>= 35	>= 36	>= 37	
Média de Custo/Km*103	R\$ 41,49	R\$ 17,14	R\$ 17,76	R\$ 17,14

Em relação às alternativas de espessuras de friso para fresamento, foram observados resultados também dentro do esperado, que indicam como melhores práticas o fresamento com o friso econômico, assim que passa de 25,0 mm. Por outro lado, é relativamente surpreendente a evidencia de condições idênticas de custo por quilômetro rodado, e até de uma pequena vantagem, para a decisão de fresamento após 22,0 mm de espessura, ou seja, próximo ao limite inferior de segurança operacional. Tais resultados convergem, porém, para o senso comum de que há prós e contras do fresamento econômico e do fresamento no limite operacional que praticamente empatam. Nesse sentido, qualquer decisão de manutenção que via de regra seja tomada entre esses dois extremos não explora os prós de nenhuma das duas políticas indicadas como ótimas e são, portanto, desfavoráveis.

EF_Inicial	Custo/1000.Km	%
Ref	R\$ 48,60	100,0%
<= 22	R\$ 21,85	45,0%
<= 23	R\$ 21,90	45,1%
<= 24	R\$ 22,26	45,8%
<= 25	R\$ 21,89	45,0%

Custo Relativo para EF_Inicial

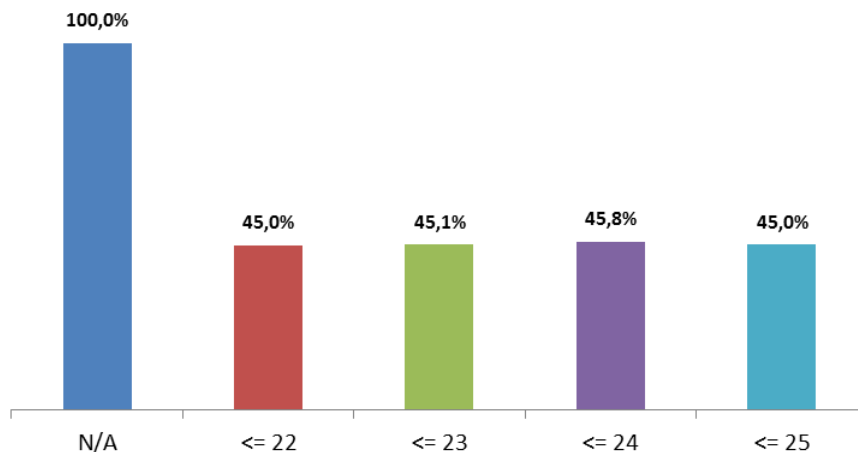


Figura 54 - Resultado para Melhor Espessura de Friso Inicial para Fresamento

Quando da simulação para taxas de desgaste determinísticas, foi expressiva a diferença positiva da utilização de uma política baseada em fresamento econômico em relação às demais, conforme se verifica na tabela abaixo.

Tabela 5 - Resultados para Melhor Espessura de Friso Inicial por Simulação Determinística

EF	Ref	<= 22	<= 23	<= 24	<= 25
Média de Custo/Km*103	R\$ 41,49	R\$ 17,55	R\$ 17,75	R\$ 17,13	R\$ 16,95

Em relação à espessura de friso final foi obtido como melhor opção o fresamento para 28,0 mm de uma forma geral, conforme se pode verificar nos resultados abaixo.

EF_Final	Custo/1000.Km	%
Ref	R\$ 48,60	100,0%
28mm	R\$ 21,75	44,8%
29mm	R\$ 22,07	45,4%
30mm	R\$ 21,98	45,2%
31mm	R\$ 22,04	45,3%
32mm	R\$ 22,05	45,4%

Custo Relativo para EF_Final

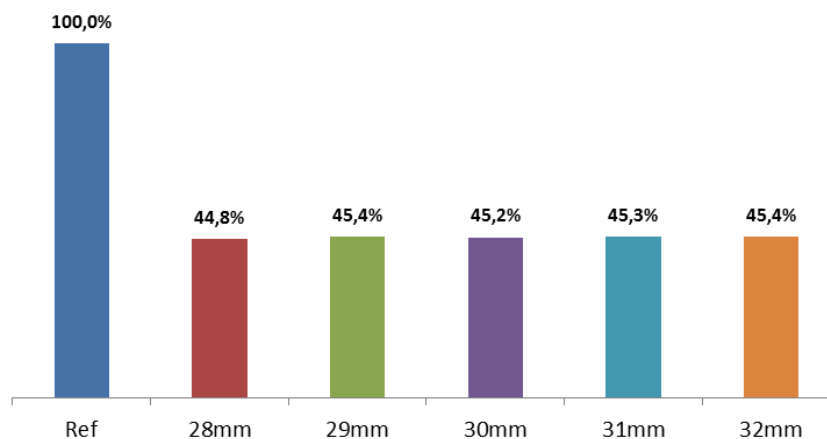


Figura 55 - Resultados para Melhor Espessura de Friso Final Após Fresamento

No entanto, quando verificadas as melhores medidas finais em relação às medidas iniciais, e considerando-se como medidas iniciais preferidas para fresamento as próximas de 25,0 mm e 22,0 mm, foi verificado que, para o primeiro cenário (fresamento econômico), a medida final com melhor custo por quilometro é a de 29,0 mm, e para o cenário de medida

inicial de 22,0 mm, a medida final “ideal” passa a ser 31,0 mm, conforme se verifica na tabela abaixo.

Tabela 6 - Resultados para Espessuras de Friso Finais em relação a Espessuras Iniciais

Custo/1000.Km		EF_Final				
EF_Inicial	Ref	28mm	29mm	30mm	31mm	32mm
Ref	R\$ 48,60					
<= 22		R\$ 22,06	R\$ 22,10	R\$ 21,69	R\$ 21,64	R\$ 21,77
<= 23		R\$ 21,34	R\$ 22,37	R\$ 22,04	R\$ 21,83	R\$ 21,93
<= 24		R\$ 21,63	R\$ 22,31	R\$ 22,57	R\$ 22,44	R\$ 22,37
<= 25		R\$ 21,97	R\$ 21,48	R\$ 21,61	R\$ 22,25	R\$ 22,14

Resultados muito similares também foram observados para a simulação determinística, para a qual a medida inicial ideal foi a de fresamento econômico (25,0 mm). Nesse cenário, a medida final preferida deve ser a de 29,0 mm, tal como identificado com a simulação probabilística.

Tabela 7 - Resultados para Espessuras de Friso Finais e Iniciais por Simulação Determinística

Média de Custo/Km*103		EF				
EF_Final	Ref	28mm	29mm	30mm	31mm	32mm
Ref	R\$ 41,49					
<= 22		R\$ 16,69	R\$ 18,32	R\$ 17,25	R\$ 17,59	R\$ 17,91
<= 23		R\$ 16,72	R\$ 17,14	R\$ 17,93	R\$ 18,48	R\$ 18,48
<= 24		R\$ 16,17	R\$ 17,41	R\$ 17,53	R\$ 18,06	R\$ 16,46
<= 25		R\$ 17,10	R\$ 16,23	R\$ 17,17	R\$ 17,37	R\$ 16,89

Por fim, para o critério de inversão de rodeiros, verificou-se que as políticas que não utilizam a inversão invariavelmente apresentaram melhor custo por quilometro rodado do que as políticas que aplicaram a inversão de rodeiros, conforme se verifica nos resultados abaixo.

Inversão	Custo/1000.Km	%
Ref	R\$ 48,60	100,0%
COM	R\$ 22,45	46,2%
SEM	R\$ 21,51	44,2%

Custo Relativo para Inversão de Rodas

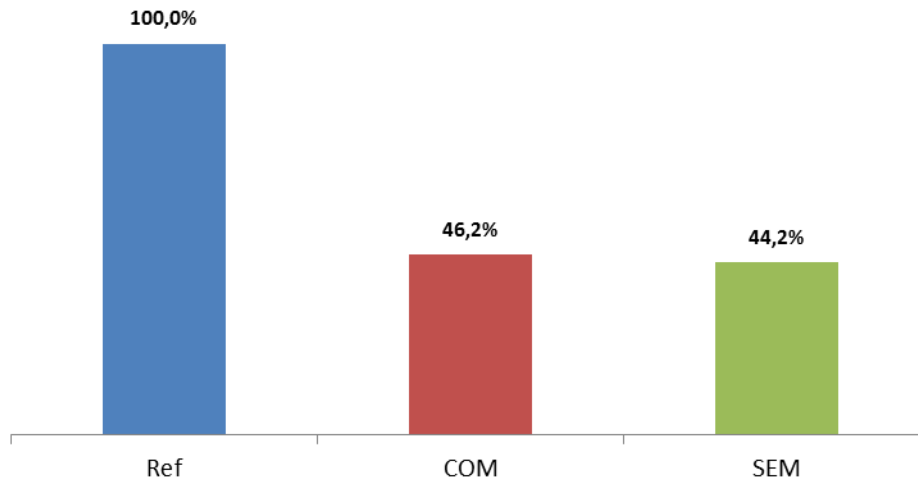


Figura 56 - Resultado para Melhores Políticas em Relação à Prática de Inversão de Rodeiros

A mesma realidade é observada nas simulações com taxas de desgaste determinísticas, na qual as 60 políticas sem inversão de rodeiro apresentam melhor resultado do que as outras 60 políticas idênticas, que utilizam a inversão de rodeiro.

Tabela 8 - Resultado para Inversão de Rodeiros por Simulação Determinística

	Inversão		
	Ref	COM	SEM
Média de Custo/Km*103	R\$ 41,49	R\$ 17,87	R\$ 16,82

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, concluímos ser viável e conveniente a utilização de ferramentas estatísticas e de simulação para a avaliação e adequação das políticas de manutenção para rodeiros de locomotivas. Ferramentas tais como as que foram aplicadas, que auxiliam na tomada de decisão de manutenção, conferem imediata vantagem competitiva à empresa, por meio da redução de custos e garantia de alta confiabilidade e segurança em suas operações.

Como forma de melhoria do estudo apresentado, foi identificado como fundamental o aprimoramento do sistema de medição dos rodeiros, atualmente feito de forma indireta, que implica em margens de erro significativas, que influenciam de maneira determinante na obtenção de parâmetros de operação e desgaste dos rodeiros, conforme se pôde verificar ao longo do trabalho. A utilização de ultrassonografia ou infravermelho, e sistemas de apontamento eletrônico são condições suficientes para melhoria severa do sistema de medição.

Não menos importante é a futura consideração tanto das diferenças de taxas de desgaste que existem entre rodas de um mesmo eixo, quanto entre eixos de diferentes *trucks*, que foram ambas desconsideradas neste estudo. Neste caso, serão também abordadas as decisões de manutenção baseadas nas possíveis diferenças entre rodas de um mesmo eixo e de diferentes *trucks*. A desconsideração a respeito da possibilidade de substituição dos rodeiros de um *truck* ao invés de fresamento com equalização de todos os rodeiros também é um ponto determinante de melhoria, principalmente na medida em que futuros trabalhos considerem a possibilidade de reinstalação de rodeiros com meia vida, anteriormente removidos de outros *trucks*, como melhor opção para equalização de medidas de rodas de um mesmo *truck* e entre diferentes *trucks*.

7. REFERÊNCIAS

- ALVES, Luiz Henrique Dias. **Mecanismos de Desgaste de Rodas Ferroviárias**, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - São Paulo, 2000
- BIROLINI, Alessandro. **Reliability Engineering, Theory and Practice**, 5ª Edição – Itália – Ed. Springer, 2003
- BRAGHIN, F., LEWIS, R., DWYER-JOYCE, R.S., BRUNI, S. – **A Mathematical Model to Predict Railway Wheel Profile Evolution Due to Wear** - Elsevier, 2005
- BROUZOULIS, Jim; TORSTENSSON, Peter T.; STOCK, Richard; EKH, Magnus - **Prediction of wear and plastic flow in rails—Test rig results, model calibration and numerical prediction**, Elsevier, 2010
- DING, Junjun; LI, Fu; HUANG, Yunhua; SUN, Shulei; ZHANG, Lixia - **Application of the semi-Hertzian method to the prediction of wheel wear in heavy haul freight car** – Southwest Jiaotong University, China - Elsevier 2013
- HALL, P.L.; STRUTT, J.E. - **Probabilistic physics-of-failure models for component reliabilities using Monte Carlo simulation and Weibull analysis: a parametric study**, Elsevier, 2003
- JENDEL, Tomas - **Prediction of wheel profile wear comparisons with field measurements**, Elsevier – Sweden, 2002
- LIMA, R. Z.; SOUZA, A. D. C.; ARAÚJO, L. C. – **Manual do Arena 9.0** – Universidade Federal de Santa Catarina, Dep. Automação de Sistemas, 2006
- LI, Xia; JIN, Xuesong; WEN, Zefeng; CUI, Dabin; ZHANG, Weihua - **A new integrated model to predict wheel profile evolution due to wear**, Elsevier, 2010
- MARINS, Fernando Augusto Silva - **INTRODUÇÃO À PESQUISA OPERACIONAL**, Cultura Acadêmica, São Paulo, 2011
- MOBLEY, R. Keith. HIGGINS, L.R. WIKOFF, Darrin J. **Maintenance Engineering Handbook**, 7ª Edição. McGraw-Hill, 2011
- MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, G.C. – **Applied Statistics and Probability for Engineers** – John Wiley & Sons, 3rd Edition, 2003
- MRS Logística S/A. **PM-ENG-4047/07.00 – Medição de Rodeiros**. Gerência de Engenharia de Locomotivas.
- MRS Logística S/A. **PM-ENG-4348/01.00 – Fresamento de Rodeiros de Locomotivas**. Gerência de Engenharia de Locomotivas
- NELSON, Wayne. **Applied Life Data Analysis**. John Wiley & Sons Inc., 1982

NOGUEIRA, Fernando M.A. **Processos de Decisão Markovianos**. In *http://www.ufff.br/epd042/files/2009/02/Processos_Decisao_Markovianos_Transparencia.pdf*. 2012

ROVIRA, A.; SALVADOR, P.; CARBALLEIRA, J.; SALAS, F. - **Wear created by the Wheel-Rail Contact in Different Rail Vehicles**, Civil-Comp Press, Spain, 2014

VIANNA, Leonardo Mendes. **Metodologia de Redução de Custos de Usinagem de Rodeiros de Locomotivas** – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2012

8. ANEXOS

8.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA MALHA FERROVIÁRIA MRS LOGÍSTICA S/A

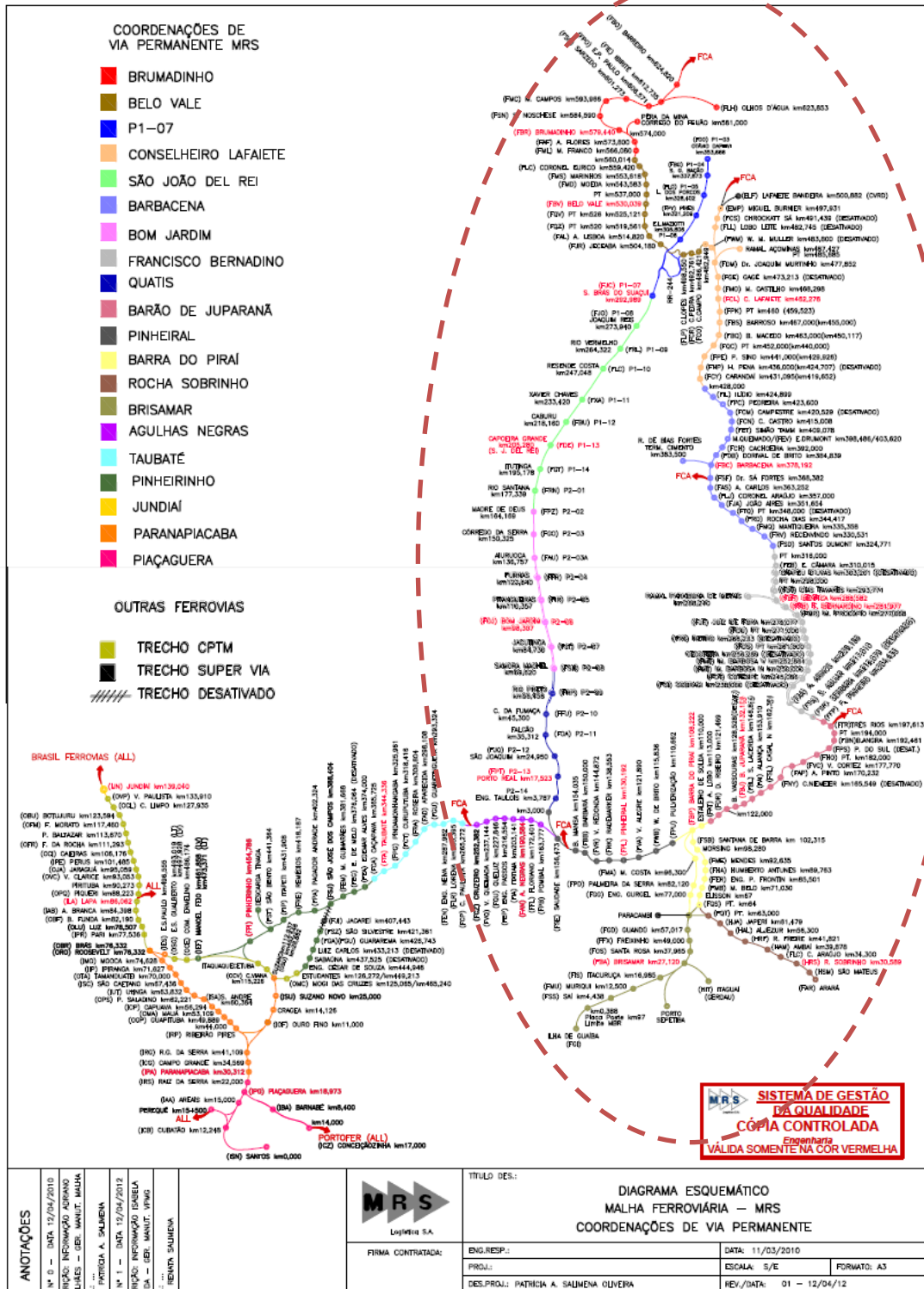


Figura 57 - Diagrama Esquemático da Malha Ferroviária MRS Logística S/A (Fonte: MRS, 2008)

8.2 POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO ALTERNATIVAS PARA SIMULAÇÃO

Tabela 9 - Políticas de Manutenção Alternativas para Simulação de Custo/km Rodado

#	AF_Fres	BD >=	Var_B	Var_E	EF >=	BD >=	Var_B	Var_E	AF_Fin	EF_Fres	BD >=	Var_E	Var_B	EF_Fin	Inversa
Ref	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
001	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	3	-5	28mm	COM
002	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	3	-5	28mm	SEM
003	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	4	-6	28mm	COM
004	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	4	-6	28mm	SEM
005	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	5	-7	28mm	COM
006	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	5	-7	28mm	SEM
007	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	6	-8	28mm	COM
008	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	6	-8	28mm	SEM
009	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	4	-6	29mm	COM
010	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	4	-6	29mm	SEM
011	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	5	-7	29mm	COM
012	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	5	-7	29mm	SEM
013	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	6	-8	29mm	COM
014	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	6	-8	29mm	SEM
015	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	7	-9	29mm	COM
016	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	7	-9	29mm	SEM
017	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	5	-7	30mm	COM
018	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	5	-7	30mm	SEM
019	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	6	-8	30mm	COM
020	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	6	-8	30mm	SEM
021	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	7	-9	30mm	COM
022	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	7	-9	30mm	SEM
023	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	8	-10	30mm	COM
024	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	8	-10	30mm	SEM
025	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	6	-8	31mm	COM
026	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	6	-8	31mm	SEM
027	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	7	-9	31mm	COM
028	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	7	-9	31mm	SEM
029	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	8	-10	31mm	COM
030	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	8	-10	31mm	SEM
031	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	9	-11	31mm	COM
032	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	9	-11	31mm	SEM
033	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	7	-9	32mm	COM
034	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 25	33	7	-9	32mm	SEM
035	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	8	-10	32mm	COM
036	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 24	34	8	-10	32mm	SEM
037	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	9	-11	32mm	COM
038	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 23	35	9	-11	32mm	SEM
039	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	10	-12	32mm	COM
040	>= 35	32	4	2	25	31	3	1	28mm	<= 22	36	10	-12	32mm	SEM
041	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	3	-5	28mm	COM
042	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	3	-5	28mm	SEM
043	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	4	-6	28mm	COM
044	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	4	-6	28mm	SEM
045	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	5	-7	28mm	COM
046	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	5	-7	28mm	SEM
047	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	6	-8	28mm	COM
048	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	6	-8	28mm	SEM
049	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	4	-6	29mm	COM
050	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	4	-6	29mm	SEM
051	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	5	-7	29mm	COM
052	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	5	-7	29mm	SEM
053	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	6	-8	29mm	COM
054	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	6	-8	29mm	SEM
055	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	7	-9	29mm	COM
056	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	7	-9	29mm	SEM
057	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	5	-7	30mm	COM
058	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	5	-7	30mm	SEM
059	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	6	-8	30mm	COM
060	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	6	-8	30mm	SEM

#	AF_Fresa	BD >=	Var_B	Var_E	EF >=	BD >=	Var_B	Var_E	AF_Fin	EF_Fresa	BD >=	Var_E	Var_B	EF_Fin	Inversã
061	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	7	-9	30mm	COM
062	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	7	-9	30mm	SEM
063	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	8	-10	30mm	COM
064	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	8	-10	30mm	SEM
065	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	6	-8	31mm	COM
066	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	6	-8	31mm	SEM
067	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	7	-9	31mm	COM
068	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	7	-9	31mm	SEM
069	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	8	-10	31mm	COM
070	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	8	-10	31mm	SEM
071	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	9	-11	31mm	COM
072	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	9	-11	31mm	SEM
073	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	7	-9	32mm	COM
074	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 25	33	7	-9	32mm	SEM
075	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	8	-10	32mm	COM
076	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 24	34	8	-10	32mm	SEM
077	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	9	-11	32mm	COM
078	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 23	35	9	-11	32mm	SEM
079	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	10	-12	32mm	COM
080	>= 36	33	5	3	24	32	4	2	28mm	<= 22	36	10	-12	32mm	SEM
081	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	3	-5	28mm	COM
082	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	3	-5	28mm	SEM
083	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	4	-6	28mm	COM
084	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	4	-6	28mm	SEM
085	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	5	-7	28mm	COM
086	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	5	-7	28mm	SEM
087	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	6	-8	28mm	COM
088	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	6	-8	28mm	SEM
089	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	4	-6	29mm	COM
090	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	4	-6	29mm	SEM
091	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	5	-7	29mm	COM
092	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	5	-7	29mm	SEM
093	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	6	-8	29mm	COM
094	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	6	-8	29mm	SEM
095	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	7	-9	29mm	COM
096	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	7	-9	29mm	SEM
097	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	5	-7	30mm	COM
098	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	5	-7	30mm	SEM
099	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	6	-8	30mm	COM
100	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	6	-8	30mm	SEM
101	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	7	-9	30mm	COM
102	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	7	-9	30mm	SEM
103	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	8	-10	30mm	COM
104	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	8	-10	30mm	SEM
105	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	6	-8	31mm	COM
106	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	6	-8	31mm	SEM
107	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	7	-9	31mm	COM
108	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	7	-9	31mm	SEM
109	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	8	-10	31mm	COM
110	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	8	-10	31mm	SEM
111	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	9	-11	31mm	COM
112	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	9	-11	31mm	SEM
113	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	7	-9	32mm	COM
114	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 25	33	7	-9	32mm	SEM
115	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	8	-10	32mm	COM
116	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 24	34	8	-10	32mm	SEM
117	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	9	-11	32mm	COM
118	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 23	35	9	-11	32mm	SEM
119	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	10	-12	32mm	COM
120	>= 37	34	6	4	23	33	5	3	28mm	<= 22	36	10	-12	32mm	SEM

Na tabela acima as colunas se referem, na ordem em que se encontram:

- **AF_Fresa:** critério de altura de fresa a partir da qual torna-se necessário o procedimento de fresamento, tal qual explicitado anteriormente;
- **BD >=:** primeiro critério de bandagem mínima suficiente para possibilitar o fresamento da roda por altura de friso, caso contrário, a roda deverá ser avaliada em relação ao segundo critério, conforme adiante;

- **Var_BD**: alteração prevista na medida de bandagem em função do fresamento da roda para redução da altura;
- **Var_EF**: alteração prevista na medida de espessura de friso, em função da necessidade de remoção de material da bandagem;
- **EF >=**: espessura mínima necessária para possibilitar fresamento por altura de friso pelo segundo critério de bandagem mínima;
- **BD >=**: segundo critério de bandagem mínima necessária para fresamento por altura de friso, dada a espessura de friso citada anteriormente, caso contrário, a roda somente poderá ser substituída;
- **Var_BD**: variação prevista na bandagem em função do fresamento da roda para redução de altura, dado o segundo critério de bandagem mínima para fresamento por altura;
- **Var_EF**: variação prevista na espessura de friso, em função da remoção de bandagem de acordo com o segundo critério proposto;
- **AF_Final**: altura final do friso após procedimento de fresamento;
- **EF_Fresa**: critério de espessura de friso a partir do qual torna-se necessário o procedimento de fresamento;
- **BD >=**: bandagem mínima necessária para fresamento do rodeiro, diretamente relacionada com medida final proposta;
- **Var_EF**: variação na medida de espessura de friso em função do procedimento de fresamento;
- **Var_BD**: variação na medida de bandagem após procedimento de fresamento;
- **EF_Final**: critério de espessura final para fresamento do rodeiro por espessura de friso;
- **Inversão**: critério para utilização ou não do procedimento de inversão dos rodeiros.

8.4 DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins, que Luiz Carlos Domiciano, funcionário da empresa, possui autorização para divulgar o nome da empresa MRS Logística S/A bem como dados não confidenciais na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Juiz de Fora, 12 de Dezembro de 2014.

Responsável da Empresa
(carimbo da empresa)

8.5 TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.