

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Ricardo Campos Veloso

**MODELAGEM DE CURVAS DE DEGRADAÇÃO DE  
CORREIAS TRANSPORTADORAS COM BASE EM  
COVARIÁVEIS INERENTES AO PROCESSO DE  
MINERAÇÃO**

Porto Alegre

2014

Ricardo Campos Veloso

**Modelagem de Curvas de Degradação de Correias Transportadoras com Base em  
Covariáveis Inerentes ao Processo de Mineração**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Produção (ou de Qualidade ou de Transportes).

Orientador: Prof. Flávio Sanson Fogliatto,  
*Ph.D.*

Porto Alegre

2014

Ricardo Campos Veloso

**Modelagem de Curvas de Degradação de Correias Transportadoras com Base em  
Covariáveis Inerentes ao Processo de Mineração**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof. . Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.***

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Michel José Anzanello, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Leonardo de Almeida Queiroz, Dr. (VALE S.A.)

Carlos Pérez Bergman, Dr. (PPGEMMM/UFRGS)

Dedicatória

Dedico esta tese às minhas filhas Giovana,  
Camila e a minha esposa Marlene, meus  
grandes amores, sem as quais nada nesta vida  
teria sentido.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e permitir a realização de um objetivo pessoal e profissional.

À minha querida e amada esposa Marlene, por sua dedicação, paciência e compreensão durante todos estes anos.

Aos meus pais, Joaquim e Lenízia, por todo esforço que fizeram para que seus filhos pudessem ter uma boa formação educacional, bem como se tornassem pessoas de bem.

Ao meu orientador, Professor Flávio Fogliatto, por sua dedicação, orientação e paciência durante todo este período.

Aos meus colegas de empresa, Flávio Pinheiro, Henrique Oscar, Mauro Lemos, Edson Maciel, Leonardo Marques e Marcones Silva que contribuíram significativamente para a execução deste trabalho.

À empresa VALE S/A por acreditar e incentivar continuamente a educação.

## RESUMO

Esta tese tem como objetivo a modelagem da degradação de correias em transportadores utilizados em mineração, como função do tempo e de outras covariáveis independentes que fazem parte do processo de mineração e que influenciam no desgaste das mesmas. Para a realização do trabalho, utilizou-se um método dividido em duas etapas: (i) abordagem qualitativa (estudo teórico do tópico degradação de correias e coleta de dados através da técnica de Grupo Focado – GF), para definição de variáveis influentes no desgaste, e (ii) abordagem quantitativa, para obtenção do modelo de degradação das correias, sendo utilizada, no estudo em questão, uma regressão linear múltipla. Como resultado foi possível identificar através da literatura, assim como via GF, que as variáveis ciclo da correia, comprimento e largura da correia, queda do material, limpador de correias (raspadores), taxa de alimentação, granulometria, composto e velocidade da correia impactariam potencialmente na degradação de correias. Já com o uso da regressão múltipla, constatou-se que as mesmas realmente são significativas e influentes, corroborando os dados obtidos via GF. De posse dos modelos de degradação obtidos para cada correia, foi possível elaborar uma proposta de sistemática de gestão da degradação de correias, baseada na comparação da evolução do desgaste real com o previsto, de modo a se detectar possíveis desvios e permitir a elaboração de ações de correção, visando minimizar a degradação acelerada e maximizar a vida útil das correias. Conseguiu-se estimar um ganho financeiro potencial de cerca de R\$ 1.132.000,00 por ano, a partir da comparação entre a vida útil calculada pelos modelos de degradação e a vida estimada pela área de manutenção do complexo.

Palavras-chave: degradação, correias transportadoras, covariáveis, regressão linear múltipla.

## ABSTRACT

This thesis aims at modelling of the conveyor's belt degradation used in mining as a function of time and other independent covariate that are part of the mining process and have influence in their wearing. To carry out the research we implemented a method divided in two stages: (i) a qualitative approach (theoretical study of conveyor belts degradation and data collection through Focused Groups – FG) for definition of factors that are influential in the wearing of belts, and (ii) a quantitative approach for obtaining a belts' degradation model through multiple linear regression. It was possible to identify in the literature and through FG that variables such as belt cycle, belt length and width, material fall, belt cleaner, feed rate, particle size, compound and belt speed could potentially impact on the degradation of belts. Using multiple regression such variables were found to be statistically significant, corroborating the data obtained from FG. With the degradation models obtained for each conveyor belt it was possible to propose a method for the maintenance management of conveyor belts. The method was based on the comparison of real wear versus predicted wear in order to detect possible deviations and to allow the development of correction actions that aim at minimizing accelerated degradation and maximizing the belt's lifetime. A potential financial gain of approximately R\$ 1.132.000,00 per year was estimated comparing the lifetime obtained using the degradation models and the life estimated by the maintenance area of the complex.

Key words: degradation, belts, covariates, multiple linear regression.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática de um TC típico (adaptado de MAZURKIEWICZ, 2008 e GÓRNIAZK-ZIMROZ ET AL., 2009) .....	21
Figura 2.2: Composição de uma correia (adaptado de Kusel, 2004).....	22
Figura 2.3: Curva da banheira (adaptada de Sellito, 2009).....	30
Figura 2.4: Seção de comprimento L de uma correia com suas subseções (JURDZIAK E HARDYGÓRA, 1995).....	35
Figura 2.5: Classificação dos modelos de degradação em análise de confiabilidade (adaptado de Liao, 2004 e Gorjian, 2009).....	39
Figura 2.6: Efeito das Covariáveis na função básica de risco (adaptado de Kumar e Klefsjö, 1994).....	48
Figura 2.7: Vários tipos de inclinação de uma Função de Regressão Acumulativa (adaptado de Kumar e Westberg (1996)).....	56
Figura 3.1: Fluxograma para escolha do método a ser utilizado na análise dos dados.....	65
Figura 4.1: Vista de montante para jusante da Usina de Beneficiamento; ao fundo Pátio de Estocagem.....	69
Figura 4.2: Vista de jusante da Usina de Beneficiamento.....	70
Figura 4.3: Fluxograma da Britagem Primária.....	71
Figura 4.4: Britagem Semimóvel 3.....	72
Figura 4.5: Fluxograma Britagem Semimóvel (BSM 1, 2, 3 e 4).....	72
Figura 4.6: Etapas da Britagem Secundária.....	73
Figura 4.7: Etapas do Peneiramento Secundário.....	74
Figura 4.8: Conjunto típico de raspadores em um transportador.....	80
Figura 4.9: Fluxograma representado o método escolhido para análise dos dados.....	83
Figura 4.10: Exemplo de controle de desgaste de correias via ultrassom.....	87
Figura 4.11: Perfil do desgaste médio das amostras.....	90
Figura 4.12: Perfil da quantidade de dias entre cada observação.....	91
Figura 4.13: Perfil da quantidade de dias acumulados.....	92
Figura 4.14: Perfil da produção acumulada transportada.....	93
Figura 4.15: Perfil da velocidade das correias.....	94
Figura 4.16: Perfil do comprimento das correias .....	94
Figura 4.17: Perfil da largura das correias.....	95
Figura 4.18: Perfil da variável Limpador de Correias.....	96

Figura 4.19: Perfil da variável Queda do Material.....	97
Figura 4.20: Gráficos comparativos entre desgaste real e desgaste previsto pelo modelo.....	100
Figura 4.21: Diferentes formas do fluxo de material em chutes de transferência (adaptado de Rozentals (1991)).....	102
Figura 4.22: Gráficos comparativos entre desgaste real e desgaste previsto pelo modelo da eq. (57).....	107
Figura 4.23: Gráficos comparativos DMA × PRA.....	108
Figura 4.24: Gráficos comparativos DMA × DAC.....	108
Figura 4.25: Gráfico comparativo entre DMA real e previsto pelo modelo da eq. (58).....	110
Figura 4.26: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 113-02, 113-03, 113-04 e 113-13.....	112
Figura 4.27: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 113-14, 113-15, 117-01, 117-03 e 117-04.....	113
Figura 4.28: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 117-04, 117-05, 117-06, 117-07 e 117-08.....	114
Figura 4.29: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 117-08, 121-04, 121-07, 121-08 e 122-01.....	115
Figura 4.30: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 122-01, 122-07, 122-08 e 131-10.....	116
Figura 4.31: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 131-11a, 133-09, 133-15 e 134-04.....	117
Figura 4.32: Gráficos comparativos entre DMA real e DMA previsto para as correias 151-05 e 151-40.....	118
Figura 4.33: Sistemática proposta para gestão de degradação de correias.....	121
Figura 4.34: Modelo de acompanhamento da degradação de correias.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Relação entre funções de confiabilidade (GUZZON, 2009).....	31
Tabela 2.2: Comportamento da taxa de falhas da Weibull como função do parâmetro $\beta$ .....	34
Tabela 3.1: Matriz de relevância das variáveis obtidas na pesquisa qualitativa.....	63
Tabela 3.2: Matriz resumo das principais características dos métodos estudados.....	64
Tabela 4.1: Questionário Grupo Focado – Degradação de correias.....	77
Tabela 4.2: Matriz de priorização das variáveis que impactam o desgaste das correias.....	81
Tabela 4.3: Relação de transportadores e suas covariáveis.....	85
Tabela 4.4: Dummies para variável Granulometria.....	86
Tabela 4.5: Visão parcial do banco de dados.....	89
Tabela 4.6: Resultados para primeira rodada da seleção <i>backward</i> .....	98
Tabela 4.7: Resultado da modelagem após eliminação da variável M1.....	99
Tabela 4.8: Estimativa dos parâmetros do modelo.....	99
Tabela 4.9: Variáveis, efeitos quadráticos e interações utilizadas.....	103
Tabela 4.10: Resultados para primeira rodada após inclusão dos efeitos quadráticos e interações.....	104
Tabela 4.11: Resultados finais após inclusão dos efeitos quadráticos e interações.....	105
Tabela 4.12: Estimativa dos parâmetros do modelo.....	106
Tabela 4.13: Resultados finais para TR131-10.....	109
Tabela 4.14: Estimativa dos parâmetros do modelo para TR131-10.....	109
Tabela 4.15: Modelos de regressão e $R^2$ para cada correia .....	111
Tabela 4.16: Comparativo da vida calculada pelos modelos em relação à vida esperada pelos especialistas.....	119
Tabela 4.17: Estimativa de ganho potencial anual de algumas correias.....	123

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
1.1 Comentários Iniciais.....	13
1.2 Tema e Objetivos.....	15
1.3 Justificativa do tema e objetivos.....	16
1.4 Método de Trabalho.....	17
1.5 Delimitações do trabalho.....	18
1.6 Estrutura do trabalho.....	19
2. Referencial Teórico.....	20
2.1 Transportador de Correia.....	20
2.1.1 Correia.....	22
2.2 Confiabilidade.....	27
2.2.1 Histórico da Confiabilidade.....	28
2.2.2 Principais medidas utilizadas em Confiabilidade.....	29
2.2.3 Relação entre as funções.....	31
2.2.4 Distribuições de Probabilidade.....	32
2.2.5 Confiabilidade de correias.....	34
2.3 Degradação.....	36
2.4 Covariáveis.....	46
3. Método.....	58
3.1 Delimitação do trabalho.....	58
3.2 Caracterização do Cenário.....	59
3.3 Definição do tipo de pesquisa e método de abordagem.....	59
3.4 Realização da pesquisa qualitativa.....	60
3.5 Preparação e análise dos dados obtidos da pesquisa qualitativa.....	62
3.6 Definição da abordagem Quantitativa.....	63

3.7 Levantamento e preparação de dados para a abordagem quantitativa.....	66
3.8 Implementação do Método Quantitativo.....	66
3.9 Validação do Modelo obtido.....	67
4. Resultados e discussão.....	68
4.1 Delimitação do trabalho.....	68
4.2 Caracterização do Cenário.....	68
4.2.1 Britagem Primária (Brit 1) .....	70
4.2.2 Britagem Semimóvel (BSM).....	71
4.2.3 Britagem Secundária (Brit 2) .....	73
4.2.4 Peneiramento Secundário (Pen 2) .....	74
4.3 Realização da pesquisa qualitativa.....	75
4.4 Preparação e análise dos dados da pesquisa qualitativa.....	78
4.5 Definição da abordagem quantitativa.....	82
4.6 Levantamento e preparação de dados para a abordagem quantitativa.....	84
4.7 Implementação do método quantitativo.....	98
4.8 Validação do Modelo Obtido.....	118
4.9 Implicações gerenciais da modelagem.....	120
5. Conclusão.....	124
Referências Bibliográficas.....	126
Apêndice A.....	131
Apêndice B.....	138

## **1. Introdução**

### **1.1 Comentários Iniciais**

Transportadores de correia (TCs) são equipamentos relativamente simples e versáteis, sendo normalmente projetados para realizar sua função mesmo em condições adversas. Geralmente são chamados de “artérias” de uma planta (CHOU ET AL., 2011). Apesar de simples, TCs são compostos por uma série de componentes os quais devem ser bem ajustados, de modo específico para cada transportador, o que o torna um equipamento único.

A indústria de mineração, de um modo em geral, utiliza em grande escala transportadores de correias, sendo estes os equipamentos mais comuns em uma planta dessa natureza. Como exemplo, pode-se citar a Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro de Carajás, da empresa VALE, situada em Parauapebas, no Pará, Brasil, que conta com aproximadamente 280 transportadores, que utilizam cerca de 90 km de correias.

Os custos envolvidos, não somente na aquisição, mas principalmente na operação dos sistemas de transporte por correias, são dos mais relevantes na indústria mineral. Apesar disto, ainda é comum que decisões relacionadas com trocas e com a própria gestão técnica dos transportadores sejam tomadas sem critérios bem estabelecidos; em geral são subjetivas (MENEZES ET AL., 2002). São comuns sistemas compostos por dezenas de quilômetros de transportadores aos quais não existem procedimentos associados ou políticas de manutenção bem estabelecidas.

Jurdziak e Hardygóra (1995) comentam que a correia transportadora é um dos principais itens de um transportador, em função dos seguintes fatores: alto preço da correia, comprimentos consideráveis, durabilidade relativamente pequena, e alto tempo de paradas para substituição (lucro cessante alto).

Além dos altos custos envolvidos e grandes impactos em termos de produção, atualmente, em função da alta demanda existente no mercado, o tempo para fornecimento de correias é muito alto, variando de 90 a 180 dias, o que em situações de imprevisto pode provocar grandes prejuízos às empresas. Desta forma, fica evidente a necessidade de um adequado gerenciamento desses equipamentos, em especial no que tange às correias.

Empresas de mineração têm buscado formas diversas para gerenciar correias, focando principalmente a minimização dos gastos, sendo que se podem distinguir três políticas básicas de reposição de correias (JURDZIAK E HARDYGÓRA, 1995):

- Uso de correias até seu desgaste completo, promovendo uma maximização do tempo de operação;
- Reposição preventiva sem condições de reaproveitamento; e
- Reposição preventiva com foco no reaproveitamento da correia desgastada.

De forma geral, as trocas são feitas baseadas na experiência ou através de alguma técnica de monitoramento. Um exemplo de técnica é o controle de desgaste por ultrassom (MENEZES ET AL., 2002), que permite o monitoramento do desgaste da cobertura da correia propiciando a otimização de seu uso. Apesar do uso de técnicas como o ultrassom, o que se verifica é a dificuldade em prever uma demanda de correias com boa assertividade. Isto se deve ao fato de existirem diversos fatores que podem danificar as correias ou acelerar o seu desgaste, dificultando assim a previsibilidade de trocas com boa antecedência. Pode-se citar, por exemplo, sobrecargas aleatórias ou tensões resultantes da própria operação do equipamento (MARZURKIEWICZ, 2008).

A fim de melhorar a previsibilidade de troca, Jurdziak e Hardygóra (1995) modelaram o tempo de uso de uma correia utilizando uma distribuição de Weibull, obtendo resultados satisfatórios. Entretanto, modelaram-se os tempos até falha da correia, obtidos a partir de registros históricos, sendo que modelos dessa natureza tem como ponto fraco a inabilidade para modelar a degradação do sistema causado por diferentes mecanismos de falhas (SARANGA E KNEZEVIC, 2000). Warburton et al. (1998) comentam que a maioria dos sistemas mecânicos falha como resultado de um processo de desgaste ao longo do tempo, que está diretamente ligado ao próprio projeto, ao processo de manufatura e de variáveis operacionais.

Devido a estes fatos, segundo Saranga e Knezevic (2000), pesquisadores têm desenvolvido novas sistemáticas nas quais se utilizam, além dos dados históricos, a análise da física do processo de falha e as condições físicas às quais o item está sujeito. Karim e Suzuki (2007) consideraram covariáveis (ou variáveis explanatórias) associadas a fatores relacionados à confiabilidade e utilizaram um Modelo de Regressão de Weibull para modelar a confiabilidade de componentes de automóveis em função de tais covariáveis. Dantas et al. (2010) também utilizaram um Modelo de Regressão de Weibull para realizar uma modelagem probabilística de dados de falha de equipamentos de sub-superfície em poços petrolíferos, correlacionando

diversas variáveis explanatórias. Através do teste de razão de verossimilhança foi possível identificar quais e de que forma algumas características influenciam o tempo até a falha. Pereira (1996) utilizou uma abordagem baseada no Modelo de Riscos Proporcionais para deduzir os efeitos de covariáveis na confiabilidade de um moinho e de máquinas ferramentas.

Correlacionando estes fatos com a realidade da mineração, observa-se uma grande oportunidade de melhorar a forma como se tem trabalhado com o gerenciamento de correias, que atualmente é baseado principalmente no histórico, na experiência e em técnicas de medição de desgaste. A mineração tem uso intensivo de equipamentos, muitas vezes em condições adversas, em função das características rigorosas do processo, o que demanda adequada manutenibilidade para garantir a disponibilidade dos mesmos, envolvendo altos custos com materiais (peças de reposição, sobressalentes, itens de garantia operacional) e mão de obra. Garantir uma disponibilidade adequada com o menor custo e o menor impacto para o processo produtivo é um dos grandes desafios que se tem na mineração. Um planejamento adequado de trocas de correia aliado a um gerenciamento eficaz pode contribuir significativamente para a superação deste desafio.

## 1.2 Tema e Objetivos

Face ao que foi brevemente exposto, propõe-se o seguinte tema:

- *Modelagem de curvas de degradação de correias transportadoras com base em covariáveis inerentes ao processo de mineração.*

O objetivo geral deste trabalho é a modelagem da degradação de correias em transportadores de correias utilizados em mineração como função do tempo e de outras variáveis independentes, que fazem parte do processo de mineração e que influenciam no desgaste das mesmas (por exemplo, taxa de carregamento, velocidade do transportador, eventos estocásticos e granulometria do minério).

Os objetivos específicos são:

- Definir quais são as variáveis independentes e como elas influenciam no desgaste de correias transportadoras;
- Desenvolver equações que modelem o processo de desgaste das correias;

- Elaborar um modelo probabilístico (curva de degradação) para previsão do desgaste das correias;
- Estabelecer sistemática de gestão de correias considerando as curvas de degradação obtidas.

### **1.3 Justificativa do tema e objetivos**

Conforme descrito anteriormente, atualmente os métodos utilizados para prever o momento de troca de correias são baseados no conhecimento, dados históricos, medições e função distribuição baseadas no tempo, o que apesar de útil não garante uma adequada assertividade, pois diferentes mecanismos de falhas, como por exemplo, taxa de carregamento, velocidade do transportador, granulometria do minério, podem provocar mudanças no perfil de degradação de correias transportadoras, alterando a sua vida útil, o que dificulta o planejamento adequado da manutenção, e pode acarretar em prejuízos para as empresas de mineração.

Na Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro de Carajás, os fatores citados anteriormente, provocam dificuldades na gestão das correias, tendo impactos na manutenção e produção do complexo. O acompanhamento do desgaste e controle baseado na vida útil, muitas vezes não permite o planejamento correto, sendo comum a necessidade de trocas consideradas prematuras, o que gera perdas produtivas e gastos não previstos na orçamentação. Devido a estas situações, o estoque de correias em Carajás é dimensionado considerando estes imprevistos, não sendo, portanto, otimizado.

Desta forma é importante desenvolver ferramentas que possam auxiliar na tomada de decisões no que tange à troca de correias. Um fator primordial é conhecer e quantificar quais são as variáveis (que estão presentes no processo de mineração) e como elas influenciam, permitindo assim, desenvolver modelos probabilísticos mais assertivos, considerando informações baseadas no tempo e o estado de variáveis que podem acelerar ou alterar significativamente o modelo de degradação da correia.

A obtenção de um modelo preditivo como descrito anteriormente permitirá: *(i)* o fornecimento de informações que auxiliarão os gestores a definir de forma mais racional e otimizada as políticas de trocas de correias, *(ii)* otimização do uso de correias, considerando a possibilidade de substituições mais assertivas, *(iii)* reaproveitamento das correias (o que

permite a redução dos custos) e (iv) melhor dimensionamento dos estoques de reposição, o que tem grande impacto em termos de custos para as empresas.

Aliado a estes fatos, uma previsibilidade melhor do momento correto para substituições de correias permite um planejamento otimizado, o que reduz perdas de produção, não só por paradas não planejadas, mas também por se ter uma visão adequada do momento correto de interromper a operação das correias.

## **1.4 Método de Trabalho**

Este trabalho, pela sua natureza, classifica-se como uma pesquisa aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática direcionada à solução de um problema específico.

Em relação à forma de abordagem, pode-se classificar este trabalho como uma pesquisa qualitativa e quantitativa. Uma pesquisa qualitativa tem como base a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas (MENDES, 2008); já a pesquisa quantitativa leva em consideração tudo que pode ser quantificável, o que significa traduzir em números, dados e fatos, permitindo classificá-los e analisá-los. A abordagem qualitativa será utilizada para definir quais variáveis impactam na degradação de correias. A abordagem quantitativa será usada para tratar os dados relativos às variáveis definidas anteriormente (na abordagem qualitativa), elencando-as juntamente com a variável de resposta (degradação de correias), de modo a possibilitar a utilização de uma regressão multivariada para verificar se tais variáveis realmente têm efeito significativo sobre a variável resposta.

O trabalho será desenvolvido nas instalações da Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro, no Complexo Minerador de Carajás, localizado em Parauapebas, no sudeste do Pará. Serão utilizados os dados relativos às correias transportadoras instaladas neste site.

Esta pesquisa se iniciará com um estudo teórico do tópico degradação de correias. Tal estudo tem como foco definir elementos críticos que impactam no desgaste de correias, bem como entender os fenômenos que provocam a degradação nas correias e seu grau de influência.

Uma segunda etapa será através da técnica de Grupo Focado, onde será realizado o levantamento de quais variáveis influenciam na degradação das correias transportadoras da

usina de Carajás, bem como sua forma de influência. Para isto, serão convidados profissionais experientes da área de manutenção da usina para participar da realização destes grupos. A partir dos dados obtidos nesta etapa, será feita uma consolidação dos resultados, correlacionando-os de modo a definir quais variáveis apresentam impacto significativo e quais suas influências no processo de desgaste de correias. Com os dados obtidos deverá ser possível mapear quais são as principais variáveis inerentes a uma usina de beneficiamento de minério de ferro que impactam na degradação de correias transportadoras. A identificação de alguns fatores poderá derivar diretamente da descrição e análise; no entanto, o efeito de outros poderá estar associado a maiores incertezas, permitindo apenas inferências e hipóteses para trabalhos futuros.

Uma terceira etapa será realizar a coleta dos dados relativos às variáveis definidas anteriormente, elencando-as juntamente com a variável resposta (degradação de correias). Para isto, serão utilizados dados obtidos a partir dos sistemas informatizados de operação e manutenção da usina de Carajás. Finalmente, será utilizada uma técnica da regressão multivariada de modo a verificar se realmente as variáveis elencadas tem significância em relação à variável resposta, para com isto modelar uma curva de degradação de correias. A partir dos dados obtidos, deverá ser possível mapear quais são as principais variáveis inerentes a uma usina de beneficiamento de minério de ferro, que impactam na degradação de correias transportadoras, bem como estimar o quanto elas afetam este quesito.

## **1.5 Delimitações do trabalho**

Este trabalho será realizado tendo como referência a realidade das instalações da Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro, no Complexo Minerador de Carajás, localizado em Parauapebas, no sudeste do Pará, pertencente à empresa VALE. Serão utilizados os dados relativos às correias transportadoras instaladas neste site.

O trabalho será focado basicamente na parte de desgaste da cobertura superior de uma correia, não sendo, portanto, levados em consideração, fadiga de emendas, trincas, desgastes das bordas por desalinhamento, rupturas por excesso de tensão, acidentes, etc.

Situações que sabidamente geram desgaste prematuro em correias como tambores com diâmetro inadequado, transições de transportadores fora dos limites técnicos aceitáveis, falhas de manutenção e outras de natureza semelhante, não serão levadas em consideração neste trabalho, uma vez que parte-se do pressuposto que estas situações são anomalias e, como tais,

são tratadas no dia a dia de uma empresa no sentido de eliminá-las. O foco será dado nas situações que são inerentes ao processo de mineração, como por exemplo, a velocidade dos transportadores, tipo de material, taxa de carregamento, uso de raspadores, tipos de chutes de transferência e outros.

## **1.6 Estrutura do trabalho**

Este trabalho será estruturado em cinco capítulos:

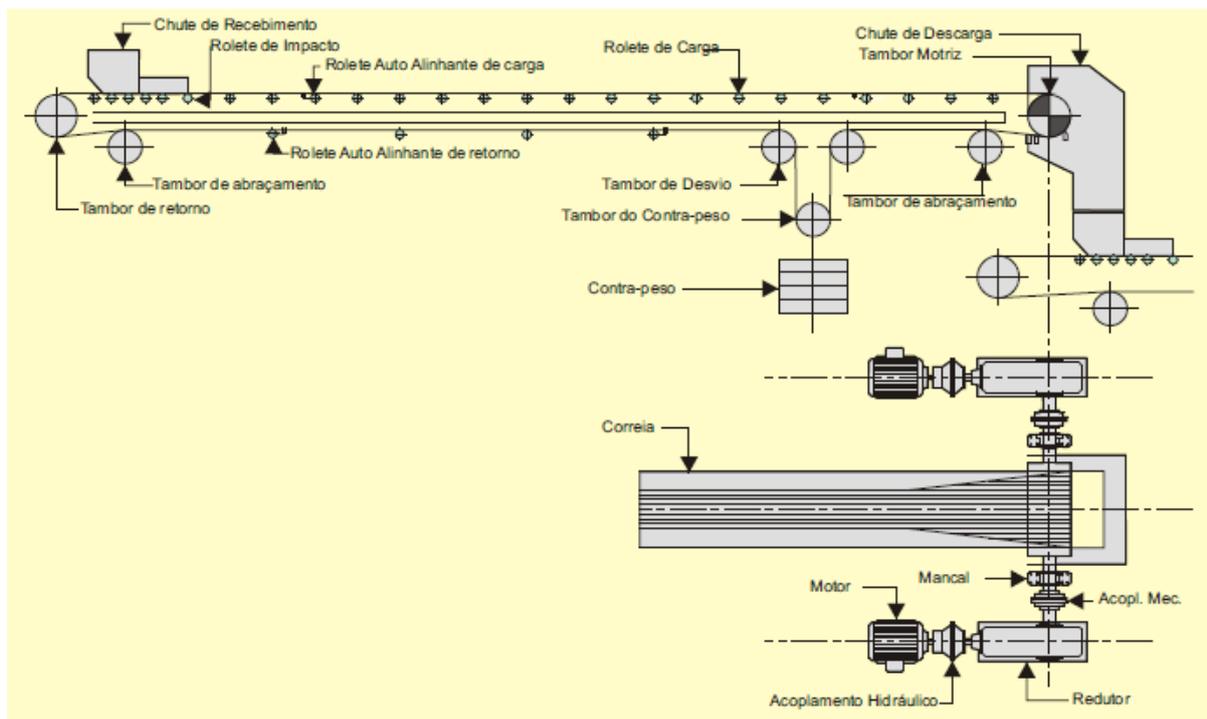
- Capítulo 1 – Introdução: apresenta uma visão geral do trabalho, apresentando seu tema e objetivos, justificativa do mesmo, método de trabalho, delimitações do trabalho e a sua estrutura.
- Capítulo 2 – Referencial Teórico: este capítulo traz uma revisão da literatura acerca do tema proposto, verificando de que forma autores diversos tem abordado o assunto e o estado atual em que se encontra o mesmo.
- Capítulo 3 – Método: aqui será descrita a abordagem utilizada, de modo a se caracterizar a pesquisa realizada, no caso uma qualitativa e quantitativa. Será indicada a metodologia a ser utilizada e também serão detalhadas as etapas do trabalho, bem como as técnicas a serem utilizadas para cada uma delas.
- Capítulo 4 – Resultados e discussão: será apresentado o cenário no qual o trabalho foi desenvolvido, sendo feita uma descrição detalhada da localidade (usina de beneficiamento de minério de ferro de Carajás) e suas peculiaridades, de modo a permitir a contextualização da mesma. Serão também apresentados em detalhes os estudos realizados e discutidos os resultados obtidos.
- Capítulo 5 – Conclusões: este capítulo faz o fechamento do trabalho, apresentando as principais conclusões obtidas comparando com os objetivos traçados inicialmente, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Referencial Teórico**

O referencial teórico está disposto em quatro tópicos: *(i)* transportadores de correias, *(ii)* confiabilidade, *(iii)* análise de degradação e *(iv)* covariáveis. Cada tópico é apresentado seguindo uma ordenação lógica visando facilitar a compreensão do tema objeto deste estudo, tratando tanto conceitos gerais como modelos utilizados por autores que trabalharam com assuntos similares ao apresentado nesta tese.

### **2.1 Transportador de Correia**

O transportador de correia (TC) consiste de um dispositivo horizontal ou inclinado (ascendente ou descendente), ou de uma combinação destes perfis, destinado à movimentação de materiais a granel. O transporte é feito por uma correia contínua com movimento reversível ou não, que se desloca sobre tambores, roletes ou mesas de deslizamento. O equipamento é empregado no manuseio de diversos tipos de materiais, desde alimentos até minérios, podendo fazer parte de um sistema automatizado de beneficiamento ou simples transporte dos materiais (SWINDERMAN ET AL., 2009; CHOU ET AL., 2011; ZHAO, LIN, 2011). Na mineração, os transportadores podem ser utilizados nas áreas de extração, beneficiamento, estocagem e embarque de minérios (GÓRNIASK-ZIMROZ ET AL., 2009). Os TCs convencionais são constituídos de estrutura metálica, acionamento, tambores, roletes (rolos conectados a cavaletes) e da correia propriamente dita (MAZURKIEWICZ, 2008, GÓRNIASK-ZIMROZ ET AL., 2009). A Figura 2.1 representa de forma esquemática um TC.



**Figura 2.1:** Representação esquemática de um TC típico (adaptado de MAZURKIEWICZ, 2008 e GÓRNIASK-ZIMROZ ET AL., 2009)

A maioria dos TCs para manuseio de material a granel é composta de seis elementos principais MAZURKIEWICZ, 2008, SWINDERMAN ET. AL., 2009, GÓRNIASK-ZIMROZ ET AL., 2009, PANG, 2010):

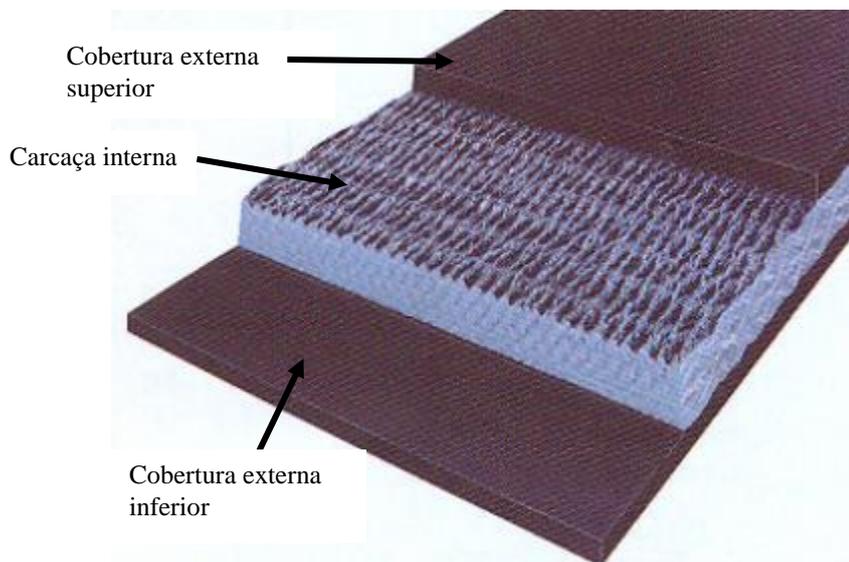
- Correia: forma a superfície móvel sobre a qual o material é transportado;
- Tambores: apoiam, movem e tencionam a correia;
- Transmissão: fornece energia para um ou mais tambores moverem a correia;
- Estrutura: suporta e alinha os componentes rodantes;
- Sistema de suporte da correia: apoia os roletes de carga e retorno da correia; e
- Pontos de transferência: carregam ou descarregam os materiais do transportador.

Além destes elementos, existem equipamentos auxiliares instalados para melhorar a operação do sistema, tais como tensores, raspadores, detectores de metal, calhas de transferências, detectores de rasgo de correias, chaves de desalinhamento, chaves de emergência, sistemas de supressão e sistemas de proteção climática (SWINDERMAN ET. AL., 2009, PANG, 2010).

### 2.1.1 Correia

De todos os componentes de um TC, a correia é o mais importante. Ela representa uma porção significativa do custo de um transportador e sua operação bem sucedida pode ser fator chave para a produtividade geral de uma usina na qual se encontra o sistema. Por isso, a correia deve ser muito bem selecionada e todas as medidas possíveis devem ser empregadas para salvaguardar sua utilidade (MAZURKIEWICZ, 2008, SWINDERMAN ET. AL., 2009).

Uma correia é composta de duas partes: a carcaça interna e a cobertura externa (inferior e superior) (SWINDERMAN ET. AL., 2009), conforme desenho esquemático representado na Figura 2.2. Esses componentes são descritos na sequência.



**Figura 2.2:** Composição de uma correia (adaptado de Kusel, 2004)

A carcaça interna (ou simplesmente carcaça) é a seção estrutural mais importante da correia, uma vez que tem como objetivo transmitir a tensão necessária para elevar e mover a correia carregada e absorver a energia de impacto liberada pelo material ao ser carregado na correia. Ela deve permitir adequadas técnicas de emenda e ser forte suficiente para lidar com forças que ocorrem ao se iniciar, movimentar e parar a correia carregada. A carcaça também fornece a rigidez necessária à correia para que permaneça alinhada e suporte a carga (SWINDERMAN ET. AL., 2009).

Segundo Swinderman et al. (2009), as carcaças podem ser construídas com diversos materiais, tendo cada uma características próprias. Pode-se, entretanto, dividi-las em dois grandes grupos:

- **Carcaças de lona:** as fibras têxteis são os elementos mais comumente usados na fabricação dos tecidos das carcaças. O tecido é composto de dois tipos de cabos: o urdume e a trama. O urdume é responsável pela resistência à tração e é disposto longitudinalmente, enquanto a trama efetua sua amarração provendo o tecido de resistência transversal. As carcaças são normalmente construídas em tecidos de fibras sintéticas. Devido ao aprimoramento das fibras sintéticas, as correias podem ter carcaças de alta resistência à tração, com um número reduzido de lonas. Com a fibra de aramida é possível obter resistência muito elevada com uma só lona. A carcaça pode também ter bordas ou não. Atualmente, são comuns os seguintes tipos de carcaças de lona: (i) NN – náilon – náilon: urdume e trama, (ii) PN – poliéster – náilon: urdume e trama, e (iii) Aramida: urdume e trama.
- **Carcaças de cabo de aço:** as carcaças de aço são constituídas de um conjunto de cabos de aço paralelos, dispostos longitudinalmente de tal forma a prover a resistência necessária à correia. Os cabos são protegidos contra oxidação envelopados por uma camada de borracha; esta camada protetora também permite a união da carcaça com a cobertura da correia. As correias com carcaça de aço, devido às suas características construtivas, propagam, facilmente, os rasgos. Para conferir maior resistência contra danos e rasgos, algumas correias possuem um reforço adicional de lona.

As correias geralmente contêm também o amortecedor, um tecido utilizado entre a carcaça e a cobertura, com a finalidade de melhorar a adesão entre as mesmas, proteger a carcaça contra danos provocados pelo material ao ser alimentado na correia e reforçar a cobertura, evitando a propagação de rasgos. Amortecedores têm sido muito usados quando o material transportado contém blocos como, por exemplo, material obtido direto da mina (*run of mine*) (DESSAUNE, 1999).

As coberturas protegem a carcaça da abrasão causada pelo carregamento ou qualquer outra condição que possa contribuir para a deterioração da correia. O tamanho dos blocos, tipo e quantidade de material, velocidade e outras condições operacionais requerem coberturas de diferentes graus de resistência a cortes, sulcos, rasgos, abrasão e umidade. Em determinados

casos especiais, a cobertura e até mesmo a carcaça devem resistir também ao ataque de óleo, graxas, ácidos, temperatura, fogo, etc (SWINDERMAN ET AL., 2009).

As coberturas das correias podem ser classificadas em: (i) cobertura superior – aquela em contato direto com o material transportado, e (ii) cobertura inferior – aquela oposta à camada superior. A cobertura superior tem como propósito proteger a carcaça dos danos causados pelo impacto e do desgaste. A cobertura inferior fornece uma superfície de fricção para transmissão de energia e o alinhamento da correia. Geralmente a cobertura superior tem maior espessura que a inferior e é mais resistente à abrasão, aos danos por impactos e ao desgaste, uma vez que está mais sujeita a estas situações (DESSAUNE, 1999, SWINDERMAN ET AL., 2009).

A correia é um componente sujeito a trocas periódicas. Na correia ideal, o desgaste total da cobertura deveria coincidir com o fim da vida útil da carcaça, mas normalmente a cobertura desgasta primeiro. Evitar o desgaste prematuro da cobertura é, portanto, muito importante para se maximizar a vida da correia e minimizar os custos de manutenção (JURDZIAK E HARDYGÓRA, 1995, SWINDERMAN ET AL., 2009).

Os danos que ocorrem nas correias podem ser divididos em duas grandes classes: desgaste normal e danos evitáveis (SWINDERMAN ET AL., 2009). O desgaste normal faz parte da rotina de operação de uma planta, sendo incorporado ao planejamento da mesma; os danos evitáveis podem e devem ser minimizados através de ações diversas que dependem da real situação de operação do equipamento.

Os principais tipos de danos de correias podem ser classificados conforme descrito a seguir:

- **Danos por impacto:** causados por materiais grandes e afiados que atingem a cobertura superior, provocando arranhões e cortes aleatórios. Em certas situações, dependendo da severidade do impacto, pode ocorrer o corte de toda a correia (JURDZIAK E HARDYGÓRA, 1995, SWINDERMAN ET AL., 2009).
- **Danos por material preso:** geralmente ocorrem em função de material que fica preso nos sistemas de vedação da correia (guias), que provocam uma compressão do material contra a correia, causando cortes ou abrasão em sua superfície (SWINDERMAN ET AL., 2009).
- **Danos na extremidade da correia:** são caracterizados pelas extremidades desgastadas em um ou ambos os lados e são provocados pelo desalinhamento da correia na estrutura (SWINDERMAN ET AL., 2009). Zhao e Lin (2011) analisaram as possíveis causas para o desalinhamento, agrupando-as em 3 categorias de acordo com os fatores causais: (i)

falhas no próprio equipamento, onde se têm problemas de rigidez estrutural, erros de excentricidade dos rolos, erros muito grandes de paralelismo dos rolos, qualidade da correia e desalinhamento entre os tambores; (ii) ajustes de instalação, quando existem falhas na montagem do transportador, como desalinhamento entre módulos, acionamento fora de alinhamento e posição de descarga do material incorreta; e (iii) falhas de manutenção, caracterizadas por manutenção precária, falta de limpeza, vibração excessiva da correia e falhas nas emendas. Para cada grupo causal de desalinhamento, Zhao e Lin (2011) propõem ações preventivas baseadas em ajustes e manutenções que podem eliminar ou minimizar os desalinhamentos.

- **Delaminação da correia:** ocorre quando as camadas da carcaça ou cobertura se separam. Pode ser provocada pelo tamanho dos tambores abaixo do recomendado, entrada de umidade, de produtos químicos e outros materiais alheios na extremidade da correia. Kozhushko e Kopnov (1995) comentam que a delaminação de correias por fadiga é um dos principais modos de falha de correias. A partir dessas considerações, elaboraram um modelo baseado na função de fadiga de correias de lona que permite estimar os estados de uma correia, bem como a vida útil restante da mesma. O modelo proposto é derivado da metodologia utilizada para ligas metálicas, denominado Funções de Força de Fadiga (*Fatigue Strength Functions* – FSFs).
- **Cobertura superior desgastada:** tais danos são identificados quando a cobertura é desgastada em toda sua superfície superior ou área de carregamento. Uma das causas é a abrasão causada pelo carregamento do material, que ocorre em função da ação abrasiva ou triturante sobre a cobertura da correia, criada pela queda do material na correia em movimento. Outro fator que pode provocar este desgaste é o acúmulo de material ao longo do retorno do transportador. Isto ocorre quando parte do material se agarra à correia, passando do ponto de descarga e caindo aos poucos ao longo do retorno (DESSAUNE, 1999, SWINDERMAN ET AL., 2009).
- **Rasgos e sulcos por objetos estranhos:** são danos provocados pela queda de materiais como pedaços de chapas, tubos metálicos, blocos de concreto e outros que podem ficar presos na estrutura do transportador causando cortes na correia. Apesar de não serem tão frequentes, geralmente são muito difíceis de controlar, pois costumam ser instantâneos (MAZURKIEWICZ, 2008, SWINDERMAN ET AL., 2009).

- **Danos pelo limpador de correias:** sistemas de limpeza são necessários para remover acúmulos de material e reduzir a quantidade de material fugitivo, auxiliando na preservação da correia. Entretanto, estes sistemas têm efeitos negativos, podendo danificar a correia, principalmente se forem mal aplicados ou mantidos. Os danos podem se originar em função de pressão excessiva ou instalação desalinhada (SWINDERMAN ET AL., 2009).
- **Rachadura na cobertura superior:** são pequenas rachaduras na cobertura superior, perpendiculares à direção de movimento da correia. Podem ser causadas por incompatibilidade entre a correia e o diâmetro dos tambores (SWINDERMAN ET AL., 2009).
- **Falhas de emenda:** Rengifo (2004) comenta que a emenda de uma correia é a parte mais fraca de um transportador de correia, sendo sua falha a mais crítica em termos de longos períodos de parada. Segundo Mazurkiewicz (2008), a falha de uma emenda é usualmente causada pela concentração de esforços que ocorre naquela região. Uma correia está exposta a sobrecargas aleatórias difíceis de prever, sendo frequentemente acima da taxa de carga dimensionada pelo fabricante. Isto pode acabar provocando ruptura nas emendas. De modo a monitorar e evitar paradas repentinas devido a falhas de emendas, Fourie et al. (2005) propuseram a utilização de um método de monitoramento baseado em imagens digitais de Raio-X em correias de lona, a partir das quais é possível detectar falhas em estágios iniciais. Rengifo (2004) desenvolveu uma técnica de emenda baseada em uma “matriz de borracha chanfrada” (*Grooved Rubber Matrix*), obtendo emendas com 30% de melhoria no desempenho. Mazurkiewicz (2008) analisou o impacto do envelhecimento na durabilidade e confiabilidade de emendas, obtendo informações a respeito da alongação e força das emendas de acordo com o tempo de uso das correias. Estas informações possibilitam determinar valores de alerta para futuros sistemas de monitoramento. Chou et al. (2011) comentam que a ruptura repentina de uma emenda além de provocar perdas materiais, podem causar acidentes pessoais devido a possíveis quedas de contrapesos quando este tipo de falha ocorre. Utilizando o método de otimização experimental de Taguchi, obtiveram-se as melhores condições de vulcanização de uma correia de lona, de modo a se ter a melhor capacidade de alongamento.
- **Envergamento da correia:** ocorre quando a correia tem uma curvatura permanente através de sua face, perpendicular à sua direção de movimento. Acontece em função de

calor, pontos de transição incompatíveis, por ângulo de concavidade muito severo ou por sobretensionamento (SWINDERMAN ET AL., 2009).

- **Curvatura da correia:** dano caracterizado por uma curvatura ao longitudinal na correia, quando vista de topo. Pode ser causado por falha durante a fabricação, devido armazenamento incorreto ou por tensionamento inadequado. A curvatura provoca desalinhamento na correia (SWINDERMAN ET AL., 2009).

De acordo com Zhao e Lin (2011), atualmente, em função da ampla aplicação de transportadores de correias em variados ambientes de trabalho, torna-se mais difícil garantir que as correias trabalhem nas condições ideais, o que impacta na sua vida útil, na qualidade da operação e no custo. Segundo Swinderman et al. (2009), a maioria dos danos pode ser evitada ou minimizada, mas o que geralmente se observa nas indústrias é uma grande dificuldade de identificar e medir todas as variáveis que provocam tais danos

## 2.2 Confiabilidade

A presença de situações indesejáveis é umas das formas de caracterizar o conceito de risco, sendo que as precauções (ações preventivas) necessárias geralmente podem ser implementadas se o nível de risco envolvido puder ser avaliado, indicando pontos falhos de um produto, sistema ou equipamento (SANTOS, 2008). A análise de confiabilidade é caracterizada pela avaliação quantitativa de riscos de um produto, visando um bom desempenho funcional e baixo índice de falhas (LAFRAIA, 2001).

Santos (2008) comenta que a análise de confiabilidade de um sistema é fundamentada em um conjunto de suposições e condições limitantes. Para caracterizá-las, é preciso saber quais partes do sistema serão incluídas na análise, bem como seus objetivos. Além disso, faz-se necessário saber quais serão as interfaces a serem utilizadas, o seu nível de detalhe, os fatores de stress envolvidos na análise e as condições ambientais de atuação do sistema.

Segundo Duek (2005), a definição de confiabilidade é feita de modo muito similar por autores diversos, tendo como pontos de convergência a probabilidade, função, tempo e condições.

Pereira (1996) define Confiabilidade como a capacidade de um bem desempenhar a sua função específica em condições definidas e por um período de tempo determinado. Já Lafraia

(2001) define como sendo a probabilidade de que um item desempenhe a função requerida, por um intervalo de tempo estabelecido, sob condições definidas de uso. Sellito (2005) define confiabilidade como a probabilidade que um produto ou serviço opere adequadamente e sem falhas sob as condições de projeto, durante um tempo especificado, usualmente correspondente à vida de projeto.

### **2.2.1 Histórico da Confiabilidade**

O conceito de confiabilidade começou a ser utilizado durante a segunda guerra mundial em função do desenvolvimento de armamentos de maior complexidade (GUZZON, 2009). No início da década de 1950, um grupo de estudiosos concluiu que para componentes eletrônicos seria necessário (i) melhorar a coleta de dados de falhas no campo, (ii) desenvolver melhores componentes, (iii) estabelecer requisitos quantitativos de confiabilidade, (iv) realizar testes de confiabilidade antes de produção em larga escala e (v) estabelecer um comitê permanente para tratar de padrões de confiabilidade. Ainda durante os anos 1950 foram estabelecidos programas de confiabilidade, realizados simpósios, desenvolvidas técnicas estatísticas (a distribuição de Weibull, por exemplo, foi proposta nesse período) e lançados manuais militares que definiam aplicações confiáveis de componentes eletrônicos (DENSON, 1998; EBEL, 1998).

No início da década de 1960 vários trabalhos sobre confiabilidade foram desenvolvidos. Técnicas sobre predição de confiabilidade a partir de análises quantitativas foram também aprimoradas. Nesta época, o RADC (*Rome Air Development Center*) desenvolveu a confiabilidade física, com objetivo de analisar as propriedades físicas que desencadeiam as falhas. Em 1962 ocorreu o primeiro simpósio sobre “Física da falha na eletrônica” (DENSON, 1998).

Nos anos 1970, o estudo da confiabilidade voltou-se para as análises de riscos associados à construção e operação de usinas nucleares, o que permitiu a consolidação da aplicação da confiabilidade em áreas diversas: (i) análises de risco e segurança, (ii) qualidade, (iii) otimização da manutenção, (iv) proteção ambiental e (v) projeto de produtos (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A década de 1980 teve como característica a especialização, com o desenvolvimento de modelos de predição de confiabilidade específicos para segmentos da indústria, a exemplo da indústria automotiva, que através da SAE (*Society of Automotive Engineers*) desenvolveu

modelos específicos para a eletrônica automotiva. Outro exemplo foi a Bellcore, que desenvolveu metodologia específica para suas condições e equipamentos. Diversos encontros anuais ocorreram focados em áreas de atuação específicas (DENSON, 1998; EBEL, 1998).

Denson (1998) comenta que os anos 1990 foram marcados por debates se a disciplina de Confiabilidade deveria focar na física da falha ou se basear nos modelos empíricos, sendo que ambas as abordagens apresentam prós e contras (os quais não serão discutidos neste trabalho).

## 2.2.2 Principais medidas utilizadas em Confiabilidade

Guzzon (2009) comenta que as principais funções utilizadas em estudos de confiabilidade são: (i) a função de risco, (ii) a função confiabilidade, (iii) a função densidade de falhas e (iv) a função acumulada de falhas. Sendo essas funções conhecidas, a maior parte dos problemas da engenharia de confiabilidade pode ser resolvida.

Matematicamente se expressa a função confiabilidade através da probabilidade de um determinado equipamento ou componente não falhar em um dado período, sendo a confiabilidade função do tempo e representada por  $R(t)$ . A probabilidade de falha neste período é expressa pela função  $F(t)$  e as funções são complementares, como explicitado na equação abaixo (PEREIRA, 1996):

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (1)$$

A função de densidade de falhas representa a variação da probabilidade de falhas por unidade de tempo. Graficamente é representada pela função distribuição de probabilidade (LAFRAIA, 2001). A seguinte expressão a representa matematicamente:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2)$$

Na equação (2),  $F(t)$  representa a função acumulada de falhas que mostra a probabilidade de falha entre um período de tempo  $t_1$  e  $t_2$ . Graficamente é representada por uma função de distribuição de densidade acumulada (LAFRAIA, 2001). É expressa pela expressão abaixo:

$$F(t_2) - F(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt \quad (3)$$

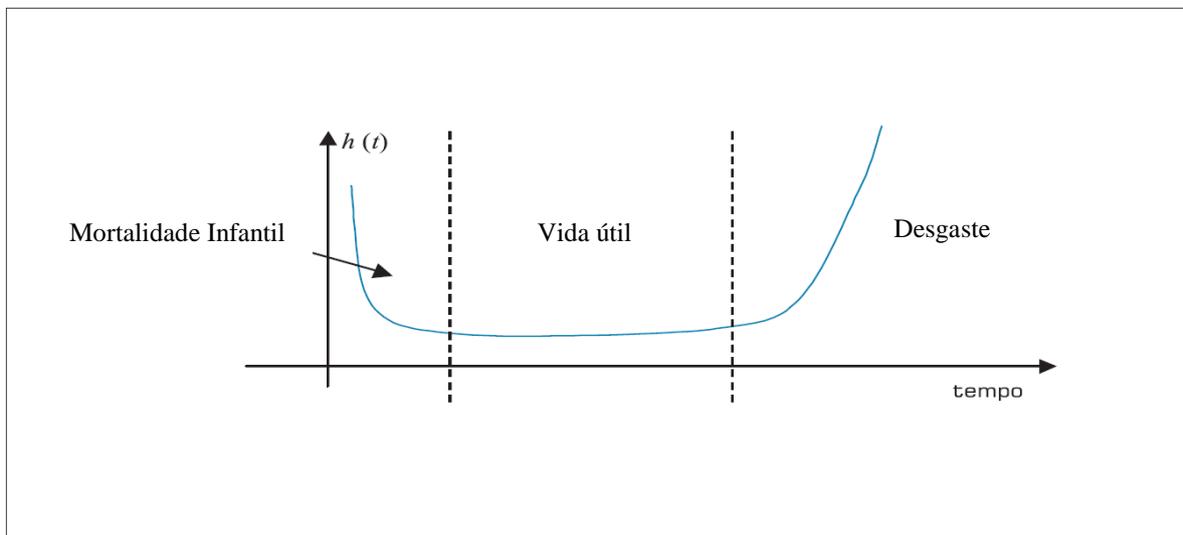
A confiabilidade é dada pela função  $R(t)$ , sendo considerada a probabilidade de que o item sobreviva sem ocorrência de falhas no intervalo de 0 a  $t$ . Em termos matemáticos, isso corresponde a equação (4):

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt = 1 - \int_{-\infty}^t f(t)dt = 1 - F(t) \quad (4)$$

Função de risco (ou taxa de falha), representada por  $h(t)$ , é uma função muito utilizada em confiabilidade, sendo medida pelo número de falhas por unidade de tempo de operação do sistema ou componente. Representa a probabilidade de falha no intervalo  $t$  a  $(t + dt)$  (LAFRAIA, 2001; PEREIRA, 1996; GUZZON, 2009). Matematicamente, é definida pela equação (5). Funções de risco devem satisfazer as condições: (i)  $\int_0^{\infty} h(t)dt = +\infty$  e (ii)  $h(t) \geq 0$ , para todo  $t \geq 0$  (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (5)$$

A função de risco de um componente ou equipamento pode ser genericamente modelada pela curva da banheira (Figura 2.3), onde se observam três regiões distintas: (i) Mortalidade infantil, (ii) vida útil e (iii) desgaste. Cada fase corresponde a um período característico da vida do componente (GUZZON, 2009).



**Figura 2.3:** Curva da banheira (adaptada de Sellito, 2009)

A curva da banheira retrata a função de risco relativa a uma população inteira de produtos ao longo do tempo, e não de um único item. Dessa forma, em uma população, unidades

individuais podem falhar cedo (mortalidade infantil), sendo que outras podem falhar no período de desgaste ou durante o período de vida útil (GUZZON, 2009).

No período de mortalidade infantil ocorrem falhas prematuras provocadas geralmente por processos de manufatura deficientes. Nesse período a função de risco é decrescente com o tempo. O período de vida útil é caracterizado por uma função de risco constante, onde as falhas geralmente são de natureza aleatória, provocadas por condições extremas no ambiente de operação do produto, erros humanos ou fenômenos naturais não previsíveis. O período de desgaste caracteriza o término da vida útil do equipamento, sendo a função de risco crescente com o tempo. Nesta fase, a função de risco cresce rapidamente à medida que o produto atinge o final de sua vida útil (LAFRAIA, 2001; GUZZON, 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

De acordo com Lafraia (2001) e Guzzon (2009), nem todos componentes apresentam todas as fases da curva da banheira, sendo que duração de cada fase varia de um componente para outro.

### 2.2.3 Relação entre as funções

Observando-se a função confiabilidade, pode-se verificar que a mesma representa o complemento da função acumulada de falha. Não são apenas essas duas funções que se relacionam entre si, a maioria das funções de confiabilidade pode ser derivada das demais, conforme apresentado na Tabela 2.1 (GUZZON, 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

	$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$h(t)$
$F(t)$	-	$\int_0^t f(u)du$	$1 - R(t)$	$1 - \exp\left(\int_0^t h(u)du\right)$
$f(t)$	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$h(t)\exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_t^\infty f(u)du$	-	$\exp\left(-\int_0^t h(u)du\right)$
$h(t)$	$\frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(u)du}$	$-\frac{d}{dt}\ln R(t)$	-

**Tabela 2.1:** Relação entre funções de confiabilidade (GUZZON, 2009)

## 2.2.4 Distribuições de Probabilidade

Estatisticamente, sabe-se que existem comportamentos diferentes para a duração da vida de distintos componentes ou sistemas. Tal comportamento implica na necessidade de considerar diferentes modelos estatísticos, ou seja, funções de probabilidades distintas. Quatro distribuições de probabilidade frequentemente são associadas à confiabilidade: (i) Normal, (ii) Exponencial, (iii) Lognormal, e (iv) Distribuição Weibull (LAFRAIA, 2001; GUZZON, 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

As funções de distribuição  $F(t)$  e de densidade  $f(t)$  da normal são dadas por:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (6)$$

onde  $-\infty < t < \infty$ ,  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $\sigma > 0$ , e

$$f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]. \quad (7)$$

Na equação (7),  $\mu$  é o parâmetro de localização que, no caso da Normal, corresponde à média da distribuição, e  $\sigma$  é o parâmetro de forma da distribuição.

As aplicações da distribuição normal para descrever a duração da vida útil de componentes são restritas, pois ela se refere a uma variável aleatória que pode assumir valores entre  $-\infty$  e  $+\infty$ , o que não é adequado quando se consideram valores de tempo, não negativos por definição. Além disso, a distribuição normal é simétrica em relação à média  $\mu$ , com igual probabilidade de tempos-até-falha para valores simétricos em torno de  $\mu$ , o que não costuma acontecer em casos reais (LAFRAIA, 2001).

Segundo Guzzon (2009), a distribuição Exponencial é umas das mais utilizadas na engenharia, principalmente na área de confiabilidade. Essa distribuição caracteriza-se por possuir função de risco constante, representando apenas a fase de vida útil da curva da banheira. A simplicidade matemática das expressões derivadas da exponencial difundiu seu uso na área (MONTGOMERY, 2004; GUZZON, 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Suas medidas de confiabilidade, considerando  $t > 0$ , são apresentadas a seguir.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (9)$$

$$h(t) = \lambda \quad (10)$$

A distribuição Lognormal é mais versátil que a Normal, pois tem forma mais variada, o que permite melhor ajuste dos dados amostrais. Além disso, não tem a desvantagem de aceitar valores de  $t < 0$  (GUZZON, 2009; LAFRAIA, 2001). É caracterizada por dois parâmetros de distribuição: o parâmetro de forma  $\sigma$  e o parâmetro de escala  $\mu$ . As seguintes equações representam as medidas de confiabilidade de interesse para a distribuição Lognormal ( $t \geq 0$ ):

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t (2\pi)^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$R(t) = \Phi \left( \frac{\mu - \ln t}{\sigma} \right) \quad (12)$$

$$h(t) = \frac{\phi \left( \frac{\mu - \ln t}{\sigma} \right)}{\sigma t R(t)} \quad (13)$$

Nas equações (11) a (13),  $\Phi(x)$  é o valor da função de distribuição da distribuição normal padronizada avaliada em  $x$  e  $\phi(x)$  é o valor da função de densidade da distribuição normal padronizada avaliada em  $x$ . Pode-se verificar que a distribuição Lognormal é a própria distribuição normal quando  $t$  é substituído por  $\ln t$  na equação (11). Essa distribuição é comumente utilizada na análise de confiabilidade onde a variável observada são ciclos até a falha por fadiga, resistências de materiais, e no projeto probabilístico com cargas variáveis.

Uma quarta distribuição muito utilizada em estudos de Confiabilidade é a distribuição de Weibull, sendo útil para representar diferentes fenômenos físicos. É uma das distribuições mais importantes na modelagem de confiabilidade devido à sua flexibilidade e capacidade de representação de amostras de tempo até falha com comportamentos distintos (GUZZON, 2009; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). A distribuição de Weibull é descrita por três parâmetros: de forma ( $\beta$ ), de escala ( $\eta$ ) e de localização ( $\gamma$ ). O parâmetro de forma permite que a distribuição de Weibull assumira uma variedade de formas, por isso a mesma tem grande flexibilidade para ajuste de dados (GUZZON, 2009). As equações seguintes são as representações de confiabilidade para a distribuição de Weibull, considerando  $t \geq 0$ :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \exp \left[ -\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (14)$$

$$R(t) = \exp \left[ -\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (15)$$

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (16)$$

De acordo com os valores de  $\beta$ , a função de risco da Weibull assume comportamentos distintos, conforme Tabela 3 (adaptado de Lafraia, 2001).

$\beta$	Comportamento da Função de Riscos
< 1	Função de risco crescente com o tempo – fase de mortalidade infantil
= 1	Função de risco constante – falhas aleatórias – função exponencial
> 1	Função de risco crescente com o tempo
= 2	Função de risco linearmente crescente
> 2	Função de risco cresce a uma taxa proporcional à potência (-1)
= 3,2	Distribuição de frequência aproxima-se da distribuição normal

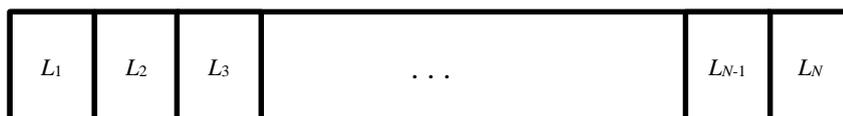
**Tabela 2.2:** Comportamento da taxa de falhas da Weibull como função do parâmetro  $\beta$

### 2.2.5 Confiabilidade de correias

Estudos sobre confiabilidade de correias transportadoras são escassos na literatura, bem como estudos sobre degradação de correias e seus mecanismos de desgaste.

Jurziak e Hardygóra (1995) desenvolveram estudos no intuito de determinar uma função de distribuição para o tempo de operação de correias transportadoras baseadas em um modelo de correia. A forma da função de distribuição pode ser encontrada considerando dois métodos: (i) estatisticamente, checando a hipótese de aderência dos dados empíricos a uma dada família paramétrica, e (ii) fisicamente, construindo um modelo de desgaste (danos) do objeto e testando através de modelos matemáticos. No referido trabalho, foi elaborado um modelo genérico de correias, sem entrar em detalhes da natureza física da formação dos danos.

Para elaborar o modelo de correia, Jurziak e Hardygóra (1995) adotaram as seguintes definições: (i)  $T_L$  uma variável aleatória que corresponde ao tempo de operação de uma seção de correia de comprimento  $L$ ; e (ii)  $T_{L_1}, \dots, T_{L_N}$  são os tempos de operação das subseções, separadas conforme apresentado na Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Seção de comprimento  $L$  de uma correia com suas subseções (JURDZIAK E HARDYGÓRA, 1995)

As seguintes suposições sobre as seções da correia foram adotadas:

- Condição do elemento mais fraco:  $T_L = \min\{T_{L_1}, \dots, T_{L_N}\}$ , ou seja, o tempo de operação da seção corresponde ao tempo de operação de sua subseção mais fraca, o que corresponde a um sistema em série.
- Condição de homogeneidade: a distribuição do tempo de operação das subseções não depende de sua posição, apenas de seu comprimento.
- Condição de restrição, de dependências locais e aleatórias do tempo de operação das subseções ( $L_i$ ) decresce à medida que aumenta sua distância entre elas. Esta condição representa bem o processo de desgaste de uma correia que está ligado a fatores como impactos por materiais granulados, abrasão e fragilização da correia.
- Condições de estabilidade em relação às dimensões: significa que a variável aleatória  $T_L$  segue uma mesma distribuição de probabilidade, independentemente do comprimento  $L$  da seção da correia.

A partir destas considerações, Jurdziak e Hardygóra (1995) comentam que apenas uma distribuição de Weibull poderia descrever o tempo de operação da seção de uma correia. Dessa forma, utilizaram uma distribuição de Weibull com parâmetro  $\alpha > 1$  que, conforme Tabela 2.2, caracteriza uma função de risco crescente com tempo, que é característico de correias, que sofrem envelhecimento ou desgaste. Foram utilizados dados reais de uma mina de carvão para determinação das distribuições, as quais foram validadas utilizando testes gráficos e os testes analíticos de Cochran, Kolmogorov-Smirnov e do Qui-quadrado.

## 2.3 Degradação

Degradação é a redução de desempenho, confiabilidade e duração da vida útil dos ativos. A maioria dos equipamentos degrada com o envelhecimento ou se deteriora devido fatores diversos como desgaste, trincas, fadiga dos materiais e corrosão. A confiabilidade cai à medida que os equipamentos ou componentes degradam ou se deterioram, sendo que os mesmos falham quando o nível de degradação atinge um limite específico de falha (POHL ET AL., 1998; CRK, 2000; GORJIAN ET AL., 2009; HAGHIGHI ET AL., 2010).

A maioria das falhas é induzida por mecanismos de degradação, o que permite o monitoramento de um ativo por um período de tempo e acessar sua confiabilidade através das mudanças em desempenho observadas no período (POHL ET AL., 1998; FREITAS ET AL., 2009). Segundo Gorjian et al. (2009), as medições de degradação frequentemente fornecem mais informações que os dados de falhas no tempo para avaliar e prever a confiabilidade de sistemas. Para alguns componentes, as medidas de degradação colhidas no decorrer do tempo contêm diversas informações sobre a confiabilidade do produto. Em algumas situações em estudos de confiabilidade, é possível medir a degradação física diretamente como função do tempo. Em outras aplicações, entretanto, a degradação física real não pode ser observada diretamente, mas medidas da degradação do desempenho do produto podem estar disponíveis (POHL ET AL., 1998; SILVA; MATTOS, 2001; LEHMANN, 2010).

Alguns testes de vida resultam em pouca ou nenhuma falha. Nestes casos torna-se difícil prever a confiabilidade através de testes tradicionais. Entretanto, para algumas situações, é possível obter medições de degradação ao longo do tempo, que podem conter informações importantes sobre a confiabilidade do sistema. Se as falhas puderem ser definidas para níveis específicos de degradação, será possível definir, através do modelo de degradação, a confiabilidade do sistema (LU; MEEKER, 1993; BAGDONAVICIUS; NIKULIN, 2000). A modelagem da degradação do desempenho pode ser útil, mas também complexa, pois o desempenho pode ser afetado por mais de um processo de degradação. A utilização de dados de degradação possibilita a aquisição de mais informações sobre a confiabilidade de um produto se comparada a dados de tempo até falha tradicionais, especialmente em aplicações com pouca ou nenhuma falha. A modelagem de degradação permite uma análise de confiabilidade mais detalhada, estimando-se o tempo até a falha de um item ou a extensão da degradação no decorrer do tempo (POHL ET AL., 1998; HAGHIGHI ET AL., 2010).

Segundo Gorjian et al. (2009), na literatura existem diversos esquemas de classificação para modos de falhas. Uma falha pode ser produzida por diferentes causas, podendo ser classificada como interna e externa. Falhas internas ocorrem devido à própria estrutura interna do sistema (qualidade dos materiais e envelhecimento). Falhas externas frequentemente ocorrem devido condições ambientais nas quais o sistema se encontra operando (vibração, poluição e umidade). Geralmente as falhas podem ser divididas em dois grupos: (i) falhas que podem ser previstas através de indicadores de monitoramento de condição, sendo chamadas de falhas graduais ou falhas brandas (*Soft failures*), e (ii) falhas cuja probabilidade é completamente aleatória, não sendo previsíveis através de indicadores de monitoramento de condição ou através de medições de idade dos equipamentos, ocorrendo sem nenhuma indicação e sendo chamadas de falhas repentinas ou falhas severas (*Hard failures*). Vários mecanismos de falhas podem ser caracterizados como processos ocultos de degradação. Existem dois tipos de degradação: (i) degradação natural baseada no envelhecimento ou dependente do tempo, causada por um processo interno no sistema, e (ii) degradação forçada, que é externa ao sistema, em que gradualmente ocorre um aumento de carga em resposta a um aumento de demanda até atingir o ponto no qual o sistema não pode mais suportar a carga (GORJIAN ET AL., 2009).

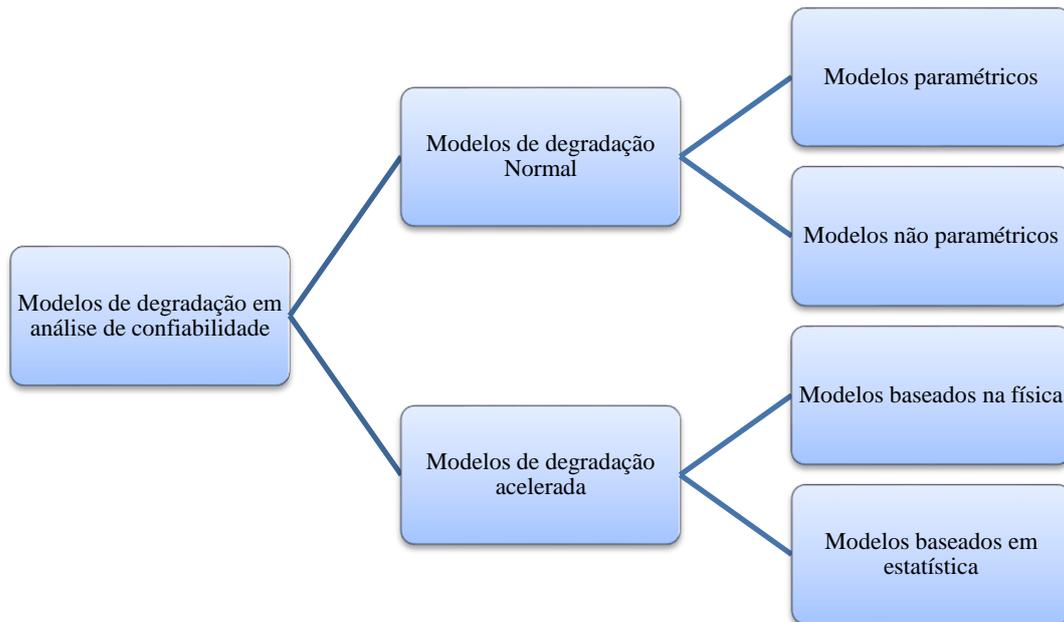
Um modelo de degradação constitui-se de uma curva ou família de curvas que revelam a evolução da degradação, ou perda de desempenho, de um determinado componente ou equipamento submetido a uma carga de trabalho ao longo do tempo (POHL ET AL., 1998). Gorjian et al. (2009) comentam que modelos de degradação representam os prognósticos dos processos ocultos de degradação, sendo que existem diferentes classificações para abordagem desses prognósticos. De forma geral, as abordagens são classificadas em quatro grupos:

- Abordagem baseada na experiência: é a forma mais simples de prognóstico de falha uma vez que requer menos informações detalhadas do que as outras abordagens. É baseada na distribuição de eventos de uma população de itens idênticos. Muitas abordagens tradicionais de confiabilidade como a distribuição Exponencial, Weibull e Lognormal são utilizadas para modelar a confiabilidade de ativos.
- Abordagem baseadas em modelos: são usualmente utilizados modelos matemáticos dinâmicos de um ativo monitorado. Esta abordagem pode ser baseada em modelos físicos ou estatísticos.

- Abordagem baseada no conhecimento: é adequada para resolver problemas onde modelos matemáticos acurados são muito difíceis de serem desenvolvidos ou quando as limitações das abordagens baseadas em modelos são significantes. Geralmente são utilizados sistemas especialistas, redes neurais e lógicas fuzzy.
- Abordagem baseada em dados (*Data-driven*): é baseada em estatística e técnicas de aprendizado que derivam da teoria de reconhecimento padrão. São utilizados métodos estatísticos multivariados e baseados em redes neurais.

Na literatura é possível verificar a existência de diferentes modelos de degradação. Lu e Meeker (1993) consideram em seus estudos um Modelo Geral do Caminho de Degradação (*General Degradation Path Model*), o qual é também citado por Lehmann (2010) e Gorjian et al. (2009). Bagdonavicius e Nikulin (2000) e Pan e Balakrishnan (2011) trabalharam com um modelo de degradação baseado em um Processo Gama (*Gamma Process*). Bagdonavicius e Nikulin (2009) comentam a existência do modelo baseado no Processo de Wiener (*Wiener Process*) e do modelo baseado em Processos de Choque (*Shock Processes*). Chen e Yuan (2010) realizaram uma modelagem baseada no Modelo de Riscos Proporcionais de Degradação (*Proportional Degradation Hazards Model – PDHM*).

Liao (2004) cita que os modelos de degradação podem ser classificados em duas categorias: modelos de degradação normal e modelos de degradação acelerada. Gorjian et al. (2009) cita estas mesmas classificações e propõe um agrupamento para os diversos modelos de degradação. A Figura 2.5 mostra esquematicamente esse agrupamento.



**Figura 2.5:** Classificação dos modelos de degradação em análise de confiabilidade (adaptado de Liao, 2004 e Gorjian, 2009)

Os modelos de degradação normal são utilizados para estimar confiabilidade de dados de degradação obtidos a partir de condições normais de operação, podendo ser classificados em dois grupos, modelos paramétricos e não paramétricos. Os modelos paramétricos são aqueles nos quais a forma do caminho ou distribuição da medida de degradação é especificada, enquanto que nos modelos não paramétricos a forma do caminho ou distribuição da medida de degradação não é especificada ou é parcialmente especificada. Os modelos de degradação acelerada fazem inferência sobre a confiabilidade utilizando dados obtidos de testes acelerados no tempo ou sob condições de stress (LIAO, 2004 E GORJIAN ET AL., 2009). Na sequência será feita uma abordagem dos principais modelos encontrados na literatura.

O **Modelo Geral do Caminho de Degradação** tem como princípio fundamental limitar o espaço amostral do processo de degradação, pressupondo que todas as funções amostrais admitem a mesma forma funcional, mas com diferentes parâmetros. O modelo geral do caminho de degradação adequa as observações de degradação através de um modelo de regressão com coeficientes aleatórios (GORJIAN ET AL., 2009). Segundo Lu e Meeker (1993), resultados experimentais fornecem para cada unidade amostral uma sequência observada ou leituras do caminho de degradação  $y$  ao longo do tempo  $t$ . O caminho de degradação observado  $y$  é o caminho de degradação real  $\eta$  da unidade, uma função do tempo não decrescente, a qual não

pode ser observada diretamente, mais uma medição do erro  $\varepsilon$ . O tempo  $t$  pode ser o tempo ou qualquer outra medida, como ciclos em testes de fadiga ou quilômetros rodados por pneus.

Utiliza-se  $D$  para denotar o nível crítico para o caminho de degradação, acima do qual se pressupõe que a falha ocorrerá. O tempo até falha  $T$  é definido como o momento em que o caminho real  $\eta$  cruza o nível crítico de degradação  $D$ . Como somente se observa  $y$ , nunca se verifica a falha real. Denota-se por  $t_s$  o tempo planejado para a parada do experimento.

Lu e Meeker (1993) fazem três suposições sobre a maneira que o teste deve ser conduzido: (i) unidades amostrais são selecionadas aleatoriamente de uma população ou processo produtivo e as medições de erro são independentes ao longo do tempo e das unidades, (ii) unidades amostrais são testadas em um ambiente particular homogêneo, e (iii) os tempos de medições (ou inspeções) são pré-especificados, sendo os mesmos ao longo de todas unidades testadas e podendo ou não ser igualmente espaçados. Esta suposição é utilizada para construir intervalos de confiança para distribuições de falhas através da técnica de simulação *bootstrap*.

Para cada unidade em uma amostra aleatória de tamanho  $n$ , pressupõe-se a existência de medições de degradação em tempos pré-especificados –  $t_1, t_2, \dots, t_s$  – até  $y$  cruzar o nível crítico  $D$  ou alcançar o tempo  $t_s$ , o que ocorrer primeiro (LU; MEEKER, 1993).

Segundo Lu e Meeker (1993) e Gorjian et al. (2009), o modelo geral do caminho de degradação pode ser descrito pelas equações (17) e (18):

$$y_{ij} = \eta_{ij} + \varepsilon_{ij} = \eta(t_j; \phi_i, \Theta_i) + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2), \quad j = 1, 2, \dots, m_{\Theta_i} \leq m \quad (18)$$

Nas equações (17) e (18),  $t_j$  denota o tempo da  $j$ -ésima medição ou inspeção,  $\varepsilon_{ij}$  é o erro aleatório com variância constante  $\sigma_\varepsilon^2$ ,  $\eta_{ij}$  é o caminho real da  $i$ -ésima unidade no tempo  $t_j$ , com parâmetros desconhecidos,  $\phi$  é o vetor de parâmetros de efeito fixo comum para todas as unidades,  $\Theta_i$  é o vetor de parâmetros de efeito aleatório, representando unidades características, associado a  $i$ -ésima unidade, tal que  $\Theta_i$  e  $\varepsilon_{ij}$  são independentes ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_{\Theta_i}$ );  $m$  é o número total de possíveis inspeções no experimento e  $m_{\Theta_i}$  é o número total de inspeções na  $i$ -ésima unidade, uma função de  $\Theta_i$ . Pressupondo que  $\Theta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) siga uma distribuição multivariada  $G_\Theta(\cdot)$ , a qual pode depender de parâmetros desconhecidos que devem ser estimados dos dados, a função de distribuição de  $T$  pode ser escrita como:

$$\Pr\{T \leq t\} = F_T(t) = F_T(t; \phi, G_\Theta(\cdot), D, \eta) \quad (19)$$

Segundo Gorjian (2009), este modelo tem os seguintes benefícios: (i) é o mais simples dos modelos de degradação, (ii) é diretamente relacionado à análise estatística dos dados de degradação, (iii) estimação de parâmetros do modelo é computacionalmente simples se comparado ao método da máxima verossimilhança, e (iv) quando a expressão  $F_T(t)$  não puder ser obtida facilmente, o método de simulação de Monte Carlo pode ser utilizado. Suas principais limitações são: (i) a suposição fundamental do modelo geral do caminho de degradação sobre espaço e funções amostrais do processo de degradação é restritiva quando os padrões de algumas amostras dos caminhos de degradação são inconsistentes com outros, devido a variações leves ou intensas no ambiente que as unidades individuais operam, e (ii) a suposição do modelo sobre testes, medições e caminhos de degradação é bastante restritiva.

O **Processo Gama** é um modelo que tem sido cada vez mais utilizado como um processo de degradação nos modelos de otimização de manutenção. Em um processo gama, considera-se que o processo de degradação é geralmente incerto e sempre não decrescente. O processo gama é um processo estocástico com incrementos não negativos, independentes, seguindo uma distribuição Gama, com um parâmetro de escala idêntico em qualquer incremento. O processo gama é o modelo apropriado para degradação que ocorre aleatoriamente ao longo do tempo, sendo adequado para descrever danos graduais provocados por uso contínuo (SINGPURWALLA, 1995; BAGDONAVICIUS E NIKULIN, 2009; GORJIAN ET AL., 2009; NOORTWIJK, 2009; PAN E BALAKRISHNAN, 2011).

Segundo Singpurwalla (1995), a modelagem do estado de um item em um processo aleatório pressupõe que o eixo de tempo é dividido em intervalos contínuos e equidistantes de comprimento  $h$ . Os sucessivos pontos finais de cada intervalo são denotados por  $h, 2h, 3h, \dots, nh$ , onde  $X(n)$  denota o estado de um item  $nh, n = 1, 2, \dots$ , sendo  $X(n)$  uma entidade fisicamente observável, como por exemplo o tamanho de uma trinca. O desgaste do item pode ser definido como a diferença  $X(n + 1) - X(n)$ :

$$X(n + 1) - X(n) = \sigma(X(n))\varepsilon_n + \mu(X(n))h \quad (20)$$

Na equação (20),  $\{\varepsilon_n\}$  são variáveis independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) com média  $E(\varepsilon_n)$  e variância  $Var(\varepsilon_n)$ ,  $\sigma$  e  $\mu$  são funções de seus argumentos. A partir da equação (20), considerando-a análoga e contínua no tempo, permitindo  $h$  decrescer a zero e focando a equação diferencial estocástica resultante, tem-se:

$$dX(t) = \sigma X(t)d\gamma(t) + \mu(X(t))dt \quad (21)$$

onde  $\{\gamma(t)\}$  será um processo gama se  $\{\varepsilon_n\}$  forem assumidos como erros i.i.d. conforme uma distribuição gama. Integrando a equação (21):

$$X(t) = X(0) + \int_0^t \sigma[X(s)]d\gamma(s) + \int_0^t \mu[X(s)]ds \quad (22)$$

O processo será considerado gama se  $\{\gamma(s); s \geq 0\}$  for descrito como um processo gama (SINGPURWALLA, 1995). Matematicamente, o processo gama pode ser definido pela equação (23).

$$Ga(x|v, u) = \frac{u^v}{\Gamma(v)} x^{v-1} \exp(-ux) I_{(0,\infty)}(x) \quad (23)$$

Na equação (24),  $I_A(x) = 1$  para  $x \in A$  e  $I_A(x) = 0$  para  $x \notin A$  e  $\Gamma(v) = \int_0^\infty z^{v-1} e^{-z} dz$  é a função gama para  $v > 0$ . Além disso, considera-se  $v(t)$  uma função de valor real, não decrescente e contínua à direita, para  $t \geq 0$ , com  $v(0) \equiv 0$ . O processo gama com função de forma  $v(t) > 0$  e parâmetro de escala  $u > 0$  é um processo estocástico contínuo no tempo  $\{X(t), t \geq 0\}$ , com as seguintes propriedades: (i)  $X(0) = 0$  com probabilidade 1; (ii)  $X(\tau) - X(t) \sim Ga(v(\tau) - v(t), u)$  para todo  $\tau > t \geq 0$ , e (iii)  $X(t)$  apresenta incrementos independentes (NOORTWIJK ET AL., 2007; BAGDONAVICIUS E NIKULIN, 2009; GORJIAN ET AL., 2009; NOORTWIJK, 2009; PAN E BALAKRISHNAN, 2011).

Sendo  $X(t)$  a degradação no tempo  $t, t \geq 0$ , a função densidade de probabilidade de  $X(t)$ , de acordo com a definição do processo gama, pode ser dada pela equação a seguir (NOORTWIJK ET AL., 2007; NOORTWIJK, 2009).

$$f_{X(t)}(x) = Ga(x|v(t), u) \quad (24)$$

A média e variância são dadas pelas equações (25) e (26).

$$E(X(t)) = \frac{v(t)}{u} \quad (25)$$

$$Var(X(t)) = \frac{v(t)}{u^2} \quad (26)$$

Um componente irá falhar quando sua resistência à degradação ( $r_0$ ), caracterizada por  $R(t) = r_0 - X(t)$ , cair abaixo do stress  $s$ . Pressupõe-se que tanto a resistência inicial  $r_0$  e o stress  $s$  sejam conhecidos. Define-se  $y = r_0 - s$ ;  $T_y$  é o tempo no qual a falha ocorrerá. Considerando a equação (25), a função acumulada de falhas pode ser escrita conforme a equação (27) (NOORTWIJK ET AL., 2007; NOORTWIJK, 2009; GORJIAN ET AL., 2009, PAN E BALAKRISHNAN, 2011).

$$F(t) = Pr\{T_y \leq t\} = Pr\{X(t) \geq y\} = \int_{x=y}^{\infty} f_{X(t)}(x) dx = \frac{\Gamma(v(t), yu)}{\Gamma(v(t))}, \quad (27)$$

onde  $\Gamma(a, x) = \int_{z=x}^{\infty} z^{a-1} e^{-z} dz$  é a função gama incompleta para  $x \geq 0$  e  $a > 0$ .

Os principais méritos deste modelo são: (i) os cálculos matemáticos para modelar a degradação através do processo gama são relativamente simples, (ii) é adequado para modelar degradação estocástica, para otimização de manutenção, (iii) é também adequado para modelar a variabilidade temporal da degradação, (iv) é adequado para modelagem estocástica de degradação monotônica e gradual, e (v) é adequado para modelar pequenos danos graduais acumulados ao longo do tempo como desgaste, fadiga, corrosão, trincas e dilatação. Suas principais limitações são: (i) é adequado para modelar danos devidos a choques esporádicos, (ii) é aplicado principalmente para decisões de manutenção para componentes isolados e não para sistemas, e (iii) não é um modelo adequado para predição de longo termo, ou seja, ele se adéqua para a vida do componente em cada ciclo de manutenção (GORJIAN ET AL., 2009).

**O Processo de Wiener** é um processo advindo do chamado processo de Wiener padrão (também conhecido como movimento browniano) que é um processo estocástico  $\{W_t, t \geq 0\}$  indexado por  $t$  números reais não negativos, com as seguintes propriedades: (i)  $W_0 = 0$ , (ii) com probabilidade 1, a função  $t \rightarrow W_t$  é contínua em  $t$ , (iii) o processo  $\{W_t, t \geq 0\}$  tem incrementos independentes estacionários, e (iv) o incremento  $W_{t+s} - W_s$  segue uma distribuição normal  $N(0, t)$ . O processo de Wiener com valor inicial  $W_0 = x$  é obtido adicionando  $x$  a um processo de Wiener padrão. O termo incrementos independentes significa que para cada escolha de números reais não negativos  $0 \leq s_1 < t_1 \leq s_2 < t_2 \leq \dots \leq s_n < t_n < \infty$ , as variáveis aleatórias  $W_{t_1} - W_{s_1}, W_{t_2} - W_{s_2}, \dots, W_{t_n} - W_{s_n}$  são um conjunto independente. O termo incrementos estacionários significa que para qualquer  $0 < s, t < \infty$  a distribuição dos incrementos  $W_{t+s} - W_s$  segue a mesma distribuição que  $W_t - W_0 = W_t$ . A escolha do modelo matemático para esses processos de degradação é baseada na suposição de efeito acumulativo de degradação, com intensidade de desgaste constante. Considerando todo incremento de degradação como uma superposição aditiva de um grande número de pequenos efeitos, pode-se pressupor que o processo de degradação é normalmente distribuído (WHITMORE E SCHENKELBERG, 1997; TANG E SU, 2008; KAHLE E LEHMANN, 2010). A medida de degradação  $Z(t)$  para um processo de Wiener pode ser descrita pela equação (28).

$$Z(t) = z_0 + \sigma W(t - t_0) + \mu(t - t_0) \quad (28)$$

Na equação (28)  $t \geq t_0$ ,  $z_0$  é a valor inicial de degradação ( $z_0 \in \mathbb{R}$ ),  $t_0$  é o início da degradação ( $t_0 \in \mathbb{R}$ ),  $\mu$  é o parâmetro de direção ( $\mu \in \mathbb{R}$ ),  $\sigma$  é o coeficiente de propagação ( $\sigma > 0$ ) e  $W_t$  denota um processo de Wiener padrão em  $[0, \infty)$ . Pressupõe-se que a falha de um produto ocorra se o processo de degradação atingir um determinado nível limite, geralmente desconhecido. Para um nível limite  $h$ , o tempo de vida  $T_h$  do produto é determinado como o instante no qual o processo de degradação  $Z(t)$  excede o nível  $h$  pela primeira vez (KAHLE E LEHMANN, 2010).

$$T_h = \inf\{t \geq t_0: Z(t) \geq h\} \quad (29)$$

Na equação (29),  $\inf\{\}$  representa o ínfimo do conjunto, que é o elemento que é menor que qualquer outro elemento deste mesmo conjunto. Sabe-se que, para  $z_0 < h$ , o tempo de vida  $T_h$  segue uma distribuição Gaussiana Inversa com a seguinte função densidade de falha (TANG E SU, 2008; KAHLE E LEHMANN, 2010).

$$f_{T_h}(t) = \frac{h-z_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2(t-t_0)^3}} \exp\left(-\frac{(h-z_0-\mu(t-t_0))^2}{2\pi\sigma^2(t-t_0)}\right) I_{\{t>t_0\}} \quad (30)$$

Na equação (30),  $I_{\{\cdot\}}$  denota um indicador variável, assumindo o valor 1 se a relação entre colchetes for verdadeira e 0, caso contrário (KAHLE E LEHMANN, 2010).

Nos **Processos de Choque**, segundo Bagdonavicius e Nikulin (2009), assume-se que a degradação é resultado de choques. Assim, tem-se que para cada evento haverá um incremento na degradação. Sendo  $T_n$  ( $n > 1$ ) o tempo do  $n$ -ésimo choque,  $X_n$  o  $n$ -ésimo incremento no nível de degradação e  $N(t)$  o número de choques no intervalo de  $[0, t]$ , para  $X_0 = 0$ , o processo de degradação será dado por:

$$Z(t) = \sum_{n=1}^{\infty} 1\{T_n \leq t\} X_n = \sum_{n=0}^{N(t)} X_n \quad (31)$$

Assumindo que seja um processo de choque, um ativo estará sujeito a choques que ocorrem aleatoriamente no tempo. Cada choque impacta com uma quantidade aleatória  $X_n$  de dano ao ativo, o qual irá falhar quando seu limite ou capacidade de resistência for excedido. A consideração mais comum para esse modelo é que os choques ocorrem baseados em um processo de Poisson com intensidade  $\lambda$ , e que as quantidades de dano por choque são independentes e identicamente distribuídas baseadas em alguma distribuição comum arbitrariamente selecionada, a qual é designada por  $G$ . Se  $R(t)$  é a confiabilidade no tempo e  $K$  é o número de choques que ocorrem no intervalo  $[0, t]$ , a função confiabilidade, baseada em um limite pré-especificado de degradação  $D$ , é dada pela equação seguinte (GORJIAN ET AL., 2009):

$$R(t) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{(\lambda t)} \frac{(\lambda t)^k}{k!} G_X^k(D) \quad (32)$$

Observa-se que a soma é obtida a partir de todos os números possíveis de choques, e a notação  $G_X^k(x)$  mostra a  $k$ -ésima convolução de  $G_X(x)$  e também a soma das  $k$  magnitudes de  $X_n$ . Segundo Gorjian et al. (2009), o processo de choque tem como vantagens: (i) é amplamente aplicado para predição de vida dos ativos para casos de falhas de fadiga em fuselagens de aeronaves, (ii) pode ser aplicado para processos de degradação exposto a stress não contínuo, e (iii) generalizações do modelo são avaliáveis, os quais são chamados de modelos de processo de difusão. Uma limitação apresentada por este modelo é que somente pode ser aplicado a amostras discretas.

O **Modelo de Riscos Proporcionais de Degradação** é utilizado para lidar com dados de testes acelerados de degradação, não sendo necessário supor uma distribuição para as medidas de degradação do desempenho ou tempos de vida das pseudo-falhas (CHEN E YAUN, 2010). A função de riscos de degradação pode ser definida como:

$$s(x; t) = \frac{f(x; t)}{\bar{F}(x; t)} \quad (34)$$

onde  $f(x; t)$  é a função de densidade de probabilidade da medida de degradação  $X$  no tempo  $t$ , e  $\bar{F}(x; t)$  é o complemento da função de distribuição de  $X$  em  $t$ . Diferentemente da função de risco na equação (2), dada apenas como função do tempo, a função de riscos de degradação considera tanto o tempo como nível de degradação. Considera-se que a função de risco de degradação  $s(x; t)$  pode ser representada por duas funções (equação 35):

$$s(x; t) = g(x)q(t), \quad (35)$$

onde  $g(x)$  e  $q(t)$  são funções positivas da medida de degradação e do tempo, respectivamente.

Para dados de degradação obtidos sob condições diversas de stress, assume-se que o log da função de risco de degradação é uma função linear das covariáveis de stress  $z$ , sendo o modelo de risco de degradação expresso por:

$$s(x; t; z) = s_{0(x; t)} e^{\beta z} = g_0(x)q_0(t)e^{\beta z} \quad (36)$$

onde  $q_0(t)$  é uma função positiva do tempo que pode ser obtida através dos parâmetros de degradação,  $g_0(x)$  é uma função positiva da medida de degradação  $X$  e  $z$  é o nível de stress (CHEN E YAUN, 2010).

## 2.4 Covariáveis

Um problema comum que frequentemente ocorre nas análises de confiabilidade é que nem todas as partes dos dados são coletadas sob as mesmas condições; por exemplo, partes de um equipamento podem ser impactadas por diferentes ambientes, ou apresentar idades diferentes, que modificam sua condição atual. Na maioria das situações reais, a função de risco de um equipamento é influenciada por diferentes fatores de risco. Nessas situações, de modo a se ter maior precisão na análise, é importante isolar os efeitos de cada fator, estimando assim sua influência. Para isto, faz-se necessário identificar e quantificar os fatores através de variáveis numéricas, as quais são designadas covariáveis, variáveis explanatórias ou concomitantes, e retratam parâmetros ou situações intrínsecas do material ou parâmetros exteriores que tenham efeito significativo no tempo de vida do equipamento. As covariáveis típicas representam forças mecânicas, propriedades do material e fatores do ambiente. Podem ser contínuas (por exemplo, tipo de material ou projeto), ou variar ao longo do tempo (por exemplo, fatores de stress acumulados em um componente) (KUMAR E KLEFSJÖ, 1994; PEREIRA, 1996; WALLACE ET AL., 2004; GORJIAN, 2009A; LAKSHIMI E SUNDARI, 2012).

Covariáveis em modelos de degradação podem ser usadas para estimar a confiabilidade quando o ambiente é dinâmico, situação na qual os fatores de risco não podem ser controlados, diferentemente de teste experimentais (BAGDONAVICIUS E NIKULIN, 2000).

Kumar e Klefsjö (1994) comentam que a representação mais usual para situações nas quais o uso de covariáveis se faz necessário é feita utilizando os Processos Homogêneos de Poisson (HPP – *Homogeneous Poisson Processes*) e os Processos de Renovação (RP – *Renewal Processes*). O modelo RP pressupõe que os tempos entre falhas são independentes e distribuídos identicamente; já o modelo HPP considera intervalos distribuídos exponencialmente, ou seja, a taxa de risco é independente do tempo. Para dados de um sistema reparável que indique qualquer forma de tendência devido à deterioração ou melhorias do sistema, esses modelos não se adequam e modelos dependentes do tempo são os mais indicados.

Modelos tradicionais de Confiabilidade consideram a variável tempo-até-falha como a única de interesse, o que pode ser muito restritivo, uma vez que covariáveis podem influenciar o tempo até falha de um sistema. Assim, o uso de modelos de regressão para estimar as características de confiabilidade é sugerido em função da possibilidade de incluir covariáveis. A maioria dos modelos de regressão utilizados para análise de confiabilidade pertence a duas categorias: (i) modelos não paramétricos, nos quais a forma do caminho de degradação ou a

distribuição da medida de degradação não é especificada, e (ii) modelos semi-paramétricos nos quais a forma do caminho de degradação ou a distribuição da medida de degradação é totalmente ou parcialmente especificada (KUMAR E KLEFSJÖ, 1994; LAKSHIMI E SUNDARI, 2012).

Gorjian et al. (2009a) comentam que os modelos não paramétricos são utilizados quando dados de tempos de falha envolvem distribuições complexas que são desconhecidas ou quando o número de observações é pequeno. Esses modelos são utilizados para evitar que suposições irreais sejam feitas, o que traria grandes dificuldades para testar. Fazem parte dessa categoria os seguintes modelos: (i) Modelo de Risco Proporcional, (ii) Modelo de tempo de falha acelerado, (iii) Modelo de Covariável Proporcional e (iv) Modelo de Intensidade Proporcional. Na sequência será feita a abordagem de cada um desses modelos.

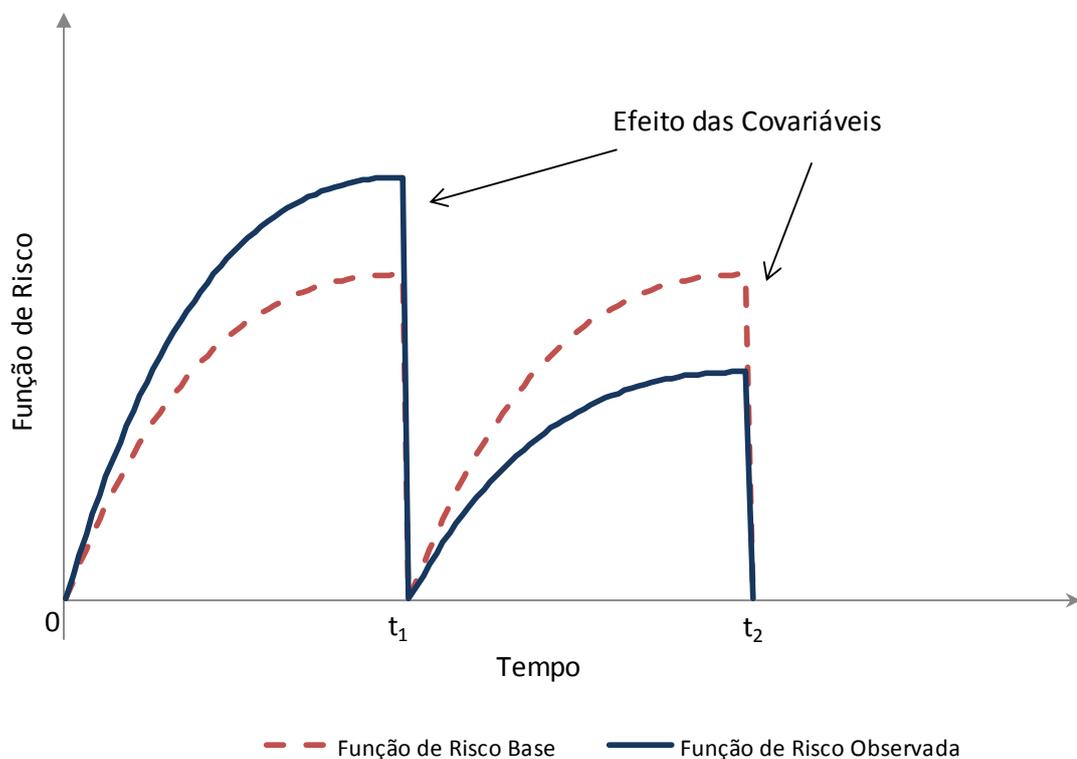
O **Modelo de Risco Proporcional** (PHM) ou Regressão de Cox é uma técnica não paramétrica aplicada para deduzir a relação entre covariáveis e o tempo até a ocorrência de um evento de interesse, ou seja, para verificar o efeito de determinados fatores sobre a confiabilidade de equipamentos ou componentes (PEREIRA, 1996; FÁVERO ET AL., 2009). No campo da engenharia, pode-se dizer que o Modelo de Risco Proporcional é aplicado nos casos em que, após uma falha, o equipamento ou sistema é restaurado a uma condição de “tão bom quanto novo” (KUMAR E KLEFSJÖ, 1994). Os modelos de risco proporcional são modelos exponenciais em que se pressupõe que efeitos das diferentes covariáveis afetam a função de risco (PEREIRA, 1996).

Como visto anteriormente, a função de risco de modo geral é influenciada não somente pelo tempo, mas por fatores diversos (covariáveis). Assim, utiliza-se o modelo de risco proporcional como uma forma de analisar dados de tempos-até-falha para, partindo de certas condições assumidas inicialmente, estimar os efeitos das covariáveis na confiabilidade do sistema. O modelo de risco proporcional se apresenta baseado na função de risco, modelando-a tal que, para um determinado conjunto de itens, essa função resulte em um produto de dois fatores: um que é comum a todos os elementos do conjunto, sendo a função básica de risco, e outro que inclui o efeito específico das covariáveis, descrito por uma função exponencial. A função de risco do sistema é, assim, dada pelo produto de uma função de risco base,  $h_0(t)$ , dependente apenas do tempo, e de um termo funcional positivo,  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma})$ , independente do tempo e que incorpora os efeitos das covariáveis (PEREIRA, 1996; KUMAR E KLEFSJÖ, 1994; GORJIAN ET AL. 2009A). Tal função de risco é dada por:

$$h(t; \mathbf{z}) = h_0(t)\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma}) \quad (37)$$

onde  $\mathbf{z}$  representa o vetor linha das covariáveis,  $\boldsymbol{\gamma}$  é o vetor coluna dos parâmetros da regressão que define os efeitos das covariáveis, e  $t$  representa o tempo até falha associado.

Quando as covariáveis não têm influência na confiabilidade do sistema ou equipamento, assume-se que a função básica de risco é igual ou idêntica à função de risco. As covariáveis podem influenciar  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma})$  de modo que esse termo seja maior ou menor que a função de risco base  $h_0(t)$  (KUMAR E KLEFSJÖ, 1994). Tal efeito pode ser visto na Figura 2.6, onde até o tempo  $t_1$  a influência das covariáveis provoca o incremento da função de risco, sendo que a partir do tempo  $t_2$  este efeito se inverte, a função de risco decresce em função da influência das covariáveis.



**Figura 2.6:** Efeito das Covariáveis na função básica de risco (adaptado de Kumar e Klefsjö, 1994)

A suposição do efeito multiplicativo das covariáveis na função básica de risco implica que para diferentes combinações dessas covariáveis, as funções de risco obtidas são proporcionais entre si, e a razão entre as funções é constante ao longo do tempo  $t$ . Isso explica o nome atribuído ao modelo (KUMAR E KLEFSJÖ, 1994; PEREIRA, 1996; FÁVERO ET AL., 2009).

Em geral, a função  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma})$  é conhecida, enquanto  $h_0(t)$  permanece não especificada. Diferentes formas funcionais podem ser utilizadas para  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma})$ : (i) forma exponencial,  $\exp[\mathbf{z}\boldsymbol{\gamma}]$ ; (ii) forma logística,  $\log(1 + \exp[\mathbf{z}\boldsymbol{\gamma}])$ ; (iii) forma linear inversa,  $1/(1 + \mathbf{z}\boldsymbol{\gamma})$ ; e (iv) forma linear,  $(1 + \mathbf{z}\boldsymbol{\gamma})$ . Destas, a mais usual é a forma exponencial, sendo que neste caso a função de risco pode ser escrita como se segue (KUMAR E KLEFSJÖ, 1994; PEREIRA, 1996; WALLACE ET AL., 2004; GORJIAN ET AL., 2009A):

$$h(t; z) = h_0(t) \exp[\mathbf{z}\boldsymbol{\gamma}] = h_0(t) \exp\left[\sum_{j=1}^q \gamma_j z_j\right] \quad (38)$$

Sendo  $z_j, j = 1, 2, \dots, q$ , as covariáveis associadas ao sistema e  $\gamma_j, j = 1, 2, \dots, q$ , os parâmetros desconhecidos do modelo, que definem os efeitos das covariáveis. O termo  $\exp[\mathbf{z}\boldsymbol{\gamma}]$  corresponde ao risco relativo de falhas devido à presença da covariável  $z$ . A função confiabilidade  $R(t; z)$  é representada a seguir:

$$R(t; z) = R_0(t) \exp\left[\sum_{j=1}^q \gamma_j z_j\right] \quad (39)$$

Trata-se de uma função condicional de confiabilidade para  $t$ , dado  $\mathbf{z}$ , que representa o efeito das diferentes covariáveis na função básica de confiabilidade  $R_0(t)$ :

$$R_0(t) = \exp\left[-\int_0^t h_0(u) du\right] = \exp[-H_0(t)] \quad (40)$$

onde  $R_0(t)$  é a função básica de confiabilidade, dependente apenas do tempo  $t$ , e  $H_0(t)$  é a função básica de risco acumulado.

As covariáveis  $\mathbf{z}$  podem ser contínuas, representando valores medidos e relacionados com o funcionamento de um sistema, ou discretas, representando a presença ou ausência de certo fator. Elas podem ainda ser internas ou externas. As internas são aquelas que representam o efeito de um processo gerado no interior do sistema e que somente podem ser observadas durante o período de funcionamento do sistema (em geral, até a falha); disto resulta que seus valores observados são bons indicadores do tempo de sobrevivência dos sistemas. As externas são geradas independentemente do mecanismo de falha, podendo ser independentes ou dependentes do tempo. As covariáveis consideradas independentes do tempo são aquelas cujos valores se mantêm constante no tempo. Já as dependentes do tempo são aquelas que, a priori, não têm seus valores conhecidos, pois possuem distribuições marginais independentes dos parâmetros considerados no modelo. As covariáveis internas são sempre dependentes do tempo e apresentam distribuições marginais dependentes dos parâmetros do modelo. Cada covariável tem efeito específico na taxa de risco geral do sistema, contabilizado através de seu respectivo coeficiente de regressão  $\gamma$ . Os coeficientes de regressão, a princípio, são desconhecidos, sendo

preciso, portanto, estimá-los. Os mesmos devem ser posteriormente testados no intuito de verificar se as covariáveis utilizadas realmente influenciam na confiabilidade do sistema (PEREIRA, 1996).

Segundo Gorjian et al. (2009a), as principais vantagens do PHM são: (i) é um modelo que pode ser utilizado para investigar os efeitos das covariáveis na função de risco dos ativos, (ii) é um modelo essencialmente livre, não sendo necessário assumir uma forma específica para a função básica de risco, (iii) os coeficientes de regressão são estimados sem a necessidade de especificar a função básica de risco, (iv) pode ser utilizado tanto para covariáveis estáticas como dinâmicas, (v) as covariáveis tem efeito multiplicativo na função básica de risco, o que permite uma pressuposição mais realística e razoável, e (vi) esse modelo permite lidar com dados truncados, não truncados e limitados. As principais limitações são: (i) o modelo tem sua abordagem vulnerável quando covariáveis são eliminadas ou quando a precisão de medição das covariáveis é alterada, (ii) podem ocorrer erros na estimação dos valores dos coeficientes de regressão no caso de pequenas amostras, (iii) a mistura de diferentes tipos de covariáveis em um modelo pode ocasionar problemas, (iv) a principal suposição do modelo é que a vida do equipamento termina no primeiro tempo de falha, (v) a influência de uma covariável no PHM é assumida como independente do tempo, e (vi) a pressuposição de proporcionalidade impõe restrições severas ao modelo.

**O Modelo de Tempo de Falha Acelerado (AFTM)** é um dos mais comumente utilizados para se obter a confiabilidade e estimativas de funções de risco de equipamentos e componentes em períodos muito curtos de tempo (GORJIAN ET AL., 2009A; BAGDONAVICIUS E NIKULIN, 2009). O AFTM é um modelo que correlaciona linearmente o logaritmo do tempo de falha com as covariáveis, sendo uma alternativa flexível quando comparada com o modelo de risco proporcional (ROBINS E TSIATIS, 1992; JIN ET AL., 2003; LENG E MA, 2007). No AFTM pressupõe-se que o logaritmo do tempo de vida  $Y = \log(t)$ , dado um vetor de covariáveis  $\mathbf{z}$ , segue uma distribuição com parâmetro de localização  $\mu(\mathbf{z})$  e parâmetro de escala constante  $\sigma$  (JIN ET AL., 2003; LENG E MA, 2007; GORJIAN ET AL., 2009A), podendo ser descrita conforme equação a seguir:

$$Y = \log(t) = \mu(\mathbf{z}) + \sigma\epsilon \quad (41)$$

onde  $\sigma > 0$  e  $\epsilon$  é um termo de erro, sendo uma variável aleatória cuja distribuição não é dependente das covariáveis  $\mathbf{z}$ . A função de risco do AFTM pode ser escrita da seguinte forma:

$$h(t; \mathbf{z}) = h_0(t \cdot \psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma})) \cdot \psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma}) \quad (42)$$

onde  $h_0(t)$  representa a função de risco base,  $\boldsymbol{\gamma}$  é um vetor de coeficientes de regressão e  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma})$  é um termo funcional, independente do tempo e que incorpora os efeitos das covariáveis. O efeito das covariáveis é acelerar ou desacelerar o tempo de falha relativo à função de risco base, de acordo com  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma}) > 1$  ou  $\psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma}) < 1$  (ROBINS E TSIATIS, 1992; GORJIAN ET AL., 2009A). Segundo Gorjian et al. (2009a), o método da máxima verossimilhança pode ser utilizado para estimar os parâmetros do AFT.

De acordo com Leng e Ma (2007), Bagdonavicius e Nikulin (2009), e Gorjian et al. (2009a), os principais benefícios deste modelo são: (i) trata-se de um modelo de fácil interpretabilidade devido às suas propriedades matemáticas, (ii) é consistente com alguns princípios físicos e da engenharia, e (iii) pode ser utilizado para se obter a confiabilidade e taxa de falhas de equipamentos e componentes em curtos períodos de tempo. Suas principais limitações são: (i) a pressuposição de que as distribuições de confiabilidade sob diferentes valores de covariáveis somente se diferenciam em escala é bastante restritiva, e (ii) é um modelo que apresenta alto custo computacional.

A predição de falhas de sistemas, equipamentos ou componentes pode ser obtida de dois modos: (i) diagnóstico de falhas de sinais de monitoramento de condição, e (ii) análise estatística de dados históricos de falhas. A maioria dos modelos estatísticos requer suficientes dados históricos operacionais e técnicas estatísticas consolidadas para ser efetiva. Entretanto, dados ideais de histórico de falha nas indústrias nem sempre são disponíveis. Testes de vida acelerada frequentemente são conduzidos para coletar dados de falhas, os quais são suficientes para estimar funções de risco ou de confiabilidade de máquinas ou componentes, mas são caros e demandam tempo. Métodos efetivos precisam ser desenvolvidos para permitir estimar funções de risco quando dados históricos de falhas são esparsos ou não existem. Em contrapartida, monitoramento de condição e técnicas de diagnóstico de falhas estão sendo cada vez mais aplicados para prever falhas de sistemas mecânicos. Dados de monitoramento de condição são comumente conhecidos como covariáveis na teoria de confiabilidade e podem classificadas em duas categorias: (i) Covariáveis ambientais  $\mathbf{z}_e(t)$  – as mudanças destas covariáveis causam as mudanças do risco de um sistema; (ii) covariáveis respostas  $\mathbf{z}_r(t)$  – as mudanças destas covariáveis são causadas pelas mudanças do risco de um sistema. A maioria dos dados de monitoramento de condição pode ser classificada como covariável resposta e são sintomas que refletem a deterioração do sistema (SUN ET AL., 2006 E CAI ET AL., 2012).

É comumente entendido que a deterioração de um sistema mecânico geralmente tende a aumentar a probabilidade de falhas. Dados acurados de monitoramento de condições de um sistema devem refletir o grau de deterioração de mesmo, sendo assim, é razoável assumir que as covariáveis de um sistema ou uma função delas, são proporcionais à função de risco do mesmo. De modo a estimar a função de risco de um sistema utilizando as informações do monitoramento de condições foi proposto o **Modelo de Covariáveis Proporcionais**, que foi elaborado para estabelecer uma correlação entre a função de risco e as condições de monitoramento (SUN ET AL., 2006; GORJIAN ET AL., 2009A E CAI ET AL., 2012).

Suponha que no tempo  $t$ ,  $\mathbf{z}(t) = (z_{r1}(t), z_{r2}(t), z_{r3}(t), \dots, z_{rM}(t))^T$  é um conjunto  $M$ -dimensional de sinais de características, extraído de informações de monitoramento de condição de um sistema.  $\psi(\mathbf{z}(t))$  é a função covariável característica do conjunto  $\mathbf{z}(t)$ , dependente do tempo e representando o estado de funcionamento do sistema.  $h(t)$  é a função de risco da confiabilidade de operação. O PCM pode ser formulado conforme se segue (SUN ET AL., 2006 E CAI ET AL., 2012):

$$\psi(\mathbf{z}(t)) = c_0(t)h(t) \quad (43)$$

onde  $c_0(t)$  representa a relação proporcional entre a função de risco e as informações do monitoramento de condições, é a função covariável de base, sendo usualmente dependente do tempo. A função de risco pode ser obtida através da equação (44):

$$h(t) = \frac{\psi(\mathbf{z}(t))}{c_0(t)} \quad (44)$$

Há duas técnicas utilizadas para estimar a função de risco. Uma é a construção da função covariável característica  $\psi(\mathbf{z}(t))$  e a outra é a criação da função covariável de base  $c_0(t)$  (LENG ET AL., 2012).

A construção de um modelo matemático adequado para  $\psi(\mathbf{z}(t))$  desempenha um papel crítico na melhoria da precisão da estimativa da função de risco, especialmente quando  $M > 1$ , ou seja, quando se utilizam múltiplas covariáveis. Muitos modelos estatísticos estão disponíveis para a formulação de  $\psi(\mathbf{z}(t))$ , sendo que o modelo exponencial é um dos mais utilizados na prática (SUN ET AL., 2006 E CAI ET AL., 2012).

De acordo com Gorjian et al. (2009a), o PCM tem como vantagens os seguintes pontos: (i) a função covariável de base pode ser obtida tanto de dados históricos de falhas como de dados históricos de monitoramento de condição, (ii) pode ser utilizado para atualizar o risco de

um sistema, e (iii) a função covariável de base pode ser atualizada de acordo com novos dados de falhas e covariáveis observadas. Suas principais desvantagens são: (i) não considera os dados do ambiente operacional, e (ii) é um modelo relativamente novo e ainda não foi amplamente utilizado.

O **Modelo de Intensidade Proporcional (PIM)** é similar ao PHM e foi introduzido primeiramente por Cox. O PIM considera casos de eventos de falhas repetidos, os quais seguem um processo estocástico e é utilizado para modelar processos de intensidade de falhas e reparos de sistemas reparáveis que incorporam covariáveis. Sob intensidades proporcionais, a razão das funções intensidade de duas unidades (A e B) com vetores de covariáveis  $\mathbf{z}_A$  e  $\mathbf{z}_B$  é constante ao longo do tempo. As covariáveis tem efeito multiplicativo na função intensidade de base (QUERESHI ET AL., 1994; JIANG ET AL., 2005; JIANG ET AL., 2006A; JIANG ET AL. 2006B; SYAMSUNDAR E NAIKAN, 2011; GORJIAN ET AL., 2009A).

Dados a contagem e processos de covariáveis no tempo  $t$ , a função geral de intensidade é definida a seguir (QUERESHI ET AL., 1994; JIANG ET AL., 2006A):

$$h(t|N(t), \mathbf{z}(t)) = \lim \Pr\{t \leq T_{n(t)+1} < t + \Delta | N(t), \mathbf{z}(t)\} / \Delta \quad (45)$$

onde  $N(t)$  representa uma variável aleatória para o número de falhas em  $(0, t]$ ,  $\mathbf{z}(t)$  representa o processo covariável até o tempo  $t$ , e  $\Delta$  representa o intervalo de tempo que se aproxima de zero no limite. O modelo de regressão pode ser especificado de duas formas (JIANG ET AL., 2005; JIANG ET AL., 2006A; JIANG ET AL. 2006B; GORJIAN ET AL., 2009A):

$$\text{GT: } h(t|N(t), \mathbf{z}(t)) = h_{0j}(t) \exp(\mathbf{z}(t)\boldsymbol{\gamma}_j) \quad (46)$$

$$\text{TT: } h(t|N(t), \mathbf{z}(t)) = h_{0j}(t - t_{j-1}) \exp(\mathbf{z}(t)\boldsymbol{\gamma}_j) \quad (47)$$

onde  $h_{0j}$  é a função intensidade de base e  $\boldsymbol{\gamma}_j$  é o coeficiente de regressão para a  $j$ ésima camada.

No modelo GT, a métrica de tempo é o intervalo entre os tempos de falhas  $t_{j-1}$  e  $t_j$ , que é definido como lacuna de tempo. O modelo GT estratifica os dados de falha baseados na contagem do evento de falha. Quando a unidade é colocada em operação e não tem nenhuma falha, então ela reside na primeira camada ( $j = 1$ ), e quando a primeira falha ocorre, a unidade move para a segunda camada ( $j = 2$ ). De modo geral, a unidade se move para a camada  $j$  imediatamente após a  $(j - 1)$ ésima falha e permanece até que  $j$ ésima falha ocorra. Já o modelo tempo total (TT) considera o tempo desde o início da observação. O modelo de GT usualmente provê estimadores de regressão mais precisos em cada estágio de contagem de tempo, quando

comparado com o TT (JIANG ET AL., 2005; JIANG ET AL., 2006A; JIANG ET AL. 2006B; GORJIAN ET AL., 2009A).

Quando comparado com o PHM, o PIM apresenta a vantagem de não considerar que o sistema é renovado após cada falha, sendo um modelo mais simples. Entretanto, caso alguma covariável do modelo for eliminada ou medida com diferente grau de precisão, a proporcionalidade geralmente é destruída (GORJIAN ET AL., 2009A).

De acordo com Gorjian et al. (2009a) nos modelos semi-paramétricos a forma do caminho de degradação ou a distribuição da medida de degradação é totalmente ou parcialmente especificada, sendo que o Modelo de Weibull de Risco Proporcional e o Modelo de Regressão de Aalen fazem parte desse grupo.

O **Modelo de Weibull de Risco Proporcional (WPHM)** é um caso especial do modelo de risco proporcional (PHM), no qual se assume que os tempos até falha seguem uma distribuição de Weibull (GORJIAN ET AL., 2009A). Assim, neste modelo a função de risco de base é uma distribuição de Weibull.

Como visto anteriormente, a distribuição de Weibull tem função de risco dada pela equação (16). Considerando-a como a função de risco base,  $h_0(t)$ , e substituindo na equação (37), que representa a função de risco do PHM, obtém-se a função de risco do WPHM, apresentada a seguir (JARDINE ET AL., 1987; JARDINE ET AL., 1989, KUMAR E KLEFSÖ, 1993; JÓZWIAK, 1996; GORJIAN ET AL., 2009A):

$$h(t; \mathbf{z}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \psi(\mathbf{z}; \boldsymbol{\gamma}) \quad (48)$$

Este modelo apresenta os seguintes pontos positivos: (i) pode ser usado para investigar efeitos de várias covariáveis no tempo de vida de componentes e equipamentos, (ii) covariáveis tem efeito multiplicativo (ao invés do efeito aditivo) na função de risco de base, que é um pressuposto mais realista, e (iii) o modelo aceita dados truncados ou completos. Suas desvantagens são: (i) devido ao efeito de multicolinearidade, a estimativa dos coeficientes de regressão ( $\boldsymbol{\gamma}$ ) é sensível à omissão, má classificação e dependência do tempo das covariáveis, (ii) os valores estimados dos coeficientes de regressão podem apresentar viés para casos de pequenas amostras, (iii) a mistura de diferentes tipos de covariáveis no mesmo modelo pode causar erros, e (iv) o principal pressuposto do modelo é que a vida do componente ou equipamento finaliza em sua primeira falha, ou seja, o modelo depende apenas do intervalo de

tempo  $t$  decorrido entre o evento inicial (diagnóstico) e o evento final (falha) (GORJIAN ET AL., 2009A).

O **Modelo de Regressão de Aalen** foi originalmente proposto em 1980 por Odd Aalen. É um modelo baseado na suposição que o efeito das covariáveis sobre a função de risco pode ser modelado por uma função aditiva, podendo variar livremente ao longo do tempo, sendo usado para avaliar a dependência no tempo das covariáveis em dados de confiabilidade censurados à direita (KUMAR E WESTBERG, 1996; GRONNESBY, 1997; HOSMER E ROYSTON, 2002; TÖRNER, 2004; BHATTACHARYYA E KLEIN, 2005; GORJIAN ET AL., 2009A).

Neste modelo,  $\mathbf{h}_i(t)$  denota a intensidade do evento que acontece no tempo  $t$  para o  $i$ -ésimo ativo ou indivíduo,  $n$  é o número de ativos ou indivíduos e  $r$  é o número de covariáveis na análise. Aalen modela o vetor de intensidades  $\mathbf{h}(t; \mathbf{z})$  da seguinte forma (KUMAR E WESTBERG, 1996; GRONNESBY, 1997; TÖRNER, 2004; GORJIAN ET AL., 2009A):

$$\mathbf{h}(t; \mathbf{z}) = \mathbf{Y}(t)\boldsymbol{\gamma}(t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (49)$$

A matriz  $\mathbf{Y}(t)$ , de dimensão  $n \times (r + 1)$ , é construída da seguinte forma: se o  $i$ -ésimo ativo ou indivíduo está exposto ao conjunto de risco no tempo  $t$ , então a  $i$ -ésima linha é dada pelo vetor  $\mathbf{z}^i(t) = (1, z_1^i(t), z_2^i(t), \dots, z_r^i(t))$ , onde  $z_j^i(t), j = 1, 2, \dots, r$ , são valores das covariáveis dependentes do tempo. Se o  $i$ -ésimo ativo ou indivíduo não faz parte do risco definido no tempo  $t$ , isto é, o evento de interesse já ocorreu ou o ativo foi censurado, então a linha correspondente de  $\mathbf{Y}(t)$  contém apenas zeros. O primeiro elemento do vetor  $\boldsymbol{\gamma}(t), \gamma_0(t)$ , é interpretado como função parâmetro de base, enquanto que os elementos restantes,  $\gamma_i(t), i = 1, 2, \dots, r$ , são chamados coeficientes de regressão, que medem a influência das respectivas covariáveis. O modelo de regressão de Aalen permite que as contribuições das covariáveis alterem ao longo do tempo, desde que as funções de regressão possam variar arbitrariamente com o tempo (KUMAR E WESTBERG, 1996; HOSMER E ROYSTON, 2002; TÖRNER, 2004; GORJIAN ET AL., 2009A).

Segundo Kumar e Westeberg (1996) e Töner (2004), as funções de regressão individuais são de difícil estimativa; por isso, utiliza-se estimar a função de regressão acumulativa, que pode ser definida como:

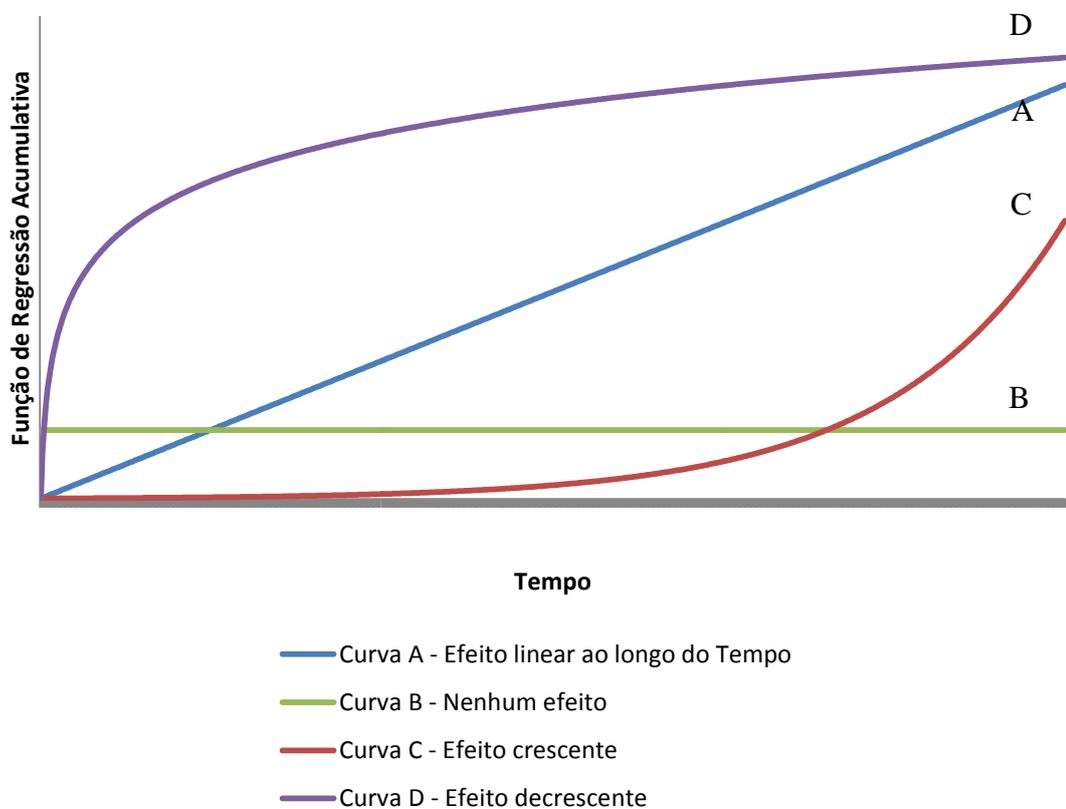
$$\mathbf{A}_i(t) = \int_0^t \boldsymbol{\gamma}_i(s) ds \quad (50)$$

Se  $T_1 < T_2 < \dots < T_j$  são os tempos dos eventos ordenados, ou seja, os tempos quando um evento real, não censurado, ocorre, um estimador de  $A(t)$  é dado por:

$$A^*(t) = \sum_{j=1}^k X(T_j)I_j \quad (51)$$

onde  $I_j$  é um vetor de zeros, exceto para o elemento correspondente ao ativo sujeito ao evento no tempo  $T_j$ , e  $X(t)$  é a pseudoinversa de  $Y(t)$ .

A função de regressão acumulativa é plotada em relação ao tempo, descrevendo como as covariáveis influenciam o risco ao longo do tempo. Se o efeito das covariáveis é zero, a inclinação da curva também será zero. Se as covariáveis tem uma influência constante ao longo do tempo, o gráfico se aproximará de uma linha reta. Se a inclinação for positiva (ou negativa), isto mostra que o efeito das covariáveis aumenta (ou diminui) o risco. Se o gráfico é uma curva com aumento (ou redução) da inclinação, isto indica um aumento (ou redução) da magnitude da influência das covariáveis (KUMAR E WESTBERG, 1996; TÖRNER, 2004). A Figura 2.7 representa estas possibilidades.



**Figura 2.7:** Vários tipos de inclinação de uma Função de Regressão Acumulativa (adaptado de Kumar e Westberg (1996))

De acordo com Gorjian et al. (2009a), o Modelo de Regressão de Aalen tem as seguintes vantagens: (i) é linear, (ii) é menos vulnerável que o modelo PHM a problemas de inconsistências quando covariáveis são desconsideradas ou a precisão das medições das covariáveis se altera, (iii) se uma covariável independente de outras covariáveis é removida do modelo, então o novo modelo ainda continua linear sem alterar coeficientes de regressão das covariáveis restantes, apenas a função parâmetro de base é afetada, e (iv) representa a influência de covariáveis dependentes do tempo melhor que o PHM. Suas principais limitações são: (i) se uma covariável que não é independente de outras covariáveis for removida do modelo, então será necessário assumir uma distribuição normal multivariada para as covariáveis de modo que o modelo permaneça linear, (ii) a expressão de  $h_i(t)$  não restringe os valores negativos, e (iii) métodos adequados de estimação de parâmetros e testes de ajuste necessitam ser investigados.

Além dos modelos vistos anteriormente, um modelo paramétrico bem conhecido e muito útil nas análises de conjuntos de dados práticos e que permite uma descrição parcimoniosa da relação entre a variável resposta e suas covariáveis é o **Modelo de Regressão Linear** (XU E YOU, 2007). Em geral, um modelo linear de regressão pode ser escrito da seguinte forma:

$$Y_i = X_i^T \beta + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (52)$$

onde  $Y_i$ 's são as variáveis respostas,  $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{ip})^T$  são covariáveis,  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)^T$  é um vetor parâmetro desconhecido,  $\varepsilon_i$ 's são os erros aleatórios e  $(^T)$  indica um vetor ou matriz transposta. Segundo Xu e You (2007), as inferências estatísticas e as aplicações do modelo representado pela equação (52) já foram bem investigadas para dados onde  $Y_i$  e  $X_i$  podem ser observados simultaneamente.

É bem conhecido que a seleção das covariáveis é importante no modelo padrão de regressão linear. O número de covariáveis em um modelo de regressão linear pode facilmente aumentar quando termos não lineares e interações entre covariáveis são introduzidas para reduzir possíveis vieses na modelagem. Na prática é comum incluir apenas variáveis importantes no modelo para melhorar a previsibilidade e para dar uma descrição parcimoniosa entre a resposta e as covariáveis (XU E YOU, 2007).

### **3 Método**

Este capítulo tem por objetivo apresentar o método utilizado para a modelagem de curvas de degradação de correias transportadoras, utilizando covariáveis que são inerentes ao processo de mineração. Utilizam-se duas abordagens: (i) qualitativa, para definir quais variáveis impactam na degradação de correias, bem como sua forma de atuação e impacto sobre a degradação; e (ii) quantitativa, considerando os modelos estudados no Capítulo 2, e que será usada para tratar os dados relativos às variáveis definidas anteriormente (na fase qualitativa).

A partir destas premissas, este capítulo desenvolve o método proposto da seguinte forma:

1. Delimitação do trabalho
2. Caracterização do cenário
3. Definição do tipo de pesquisa e método de abordagem
4. Realização da pesquisa qualitativa
5. Preparação e análise dos dados obtidos da pesquisa qualitativa
6. Definição da abordagem quantitativa
7. Levantamento e preparação de dados para a abordagem quantitativa
8. Implementação do método quantitativo
9. Validação do modelo obtido

#### **3.1 Delimitação do trabalho**

A primeira etapa do método proposto consiste na identificação do problema a ser tratado, bem como sua abrangência, o que irá nortear as próximas etapas.

A definição da abrangência é feita através da coleta de informações que permitirá definir o escopo a ser abordado, considerando as particularidades que fazem parte da realidade na qual os transportadores de correia (TCs), que serão analisados no trabalho, estão inseridos. Esta definição deve levar em consideração a disponibilidade e confiabilidade de informações básicas que possam vir a ser utilizadas nas análises subsequentes.

As informações podem ser coletadas através de históricos de sistemas informatizados de manutenção e de operação, bem como através do conhecimento prático de profissionais da área de manutenção de TCs. Além disso, é importante cruzar as informações com aquelas provenientes de pesquisas bibliográficas, que permitem aprofundar o conhecimento sobre o assunto em questão, no caso, degradação de correias.

### **3.2 Caracterização do Cenário**

Um ponto importante no trabalho é a caracterização do cenário no qual o trabalho foi desenvolvido. Esta etapa consiste em uma análise detalhada da localidade onde os TCs estão instalados, bem como de suas peculiaridades, como dados de projeto e condições operacionais, de modo a permitir a correta contextualização. Esta etapa deve ser realizada concomitantemente com a delimitação do trabalho, pois fornecerá informações importantes que auxiliarão nesta definição.

Estes dados podem ser coletados a partir dos projetos dos TCs e também de manuais de operação do *site* onde eles se encontram instalados.

### **3.3 Definição do tipo de pesquisa e método de abordagem**

Conforme comentado no capítulo 1, este trabalho classifica-se como uma pesquisa aplicada, pois sua natureza tem como objetivo específico gerar conhecimentos para aplicação prática direcionada à solução de um problema específico, neste caso, elaborar um modelo probabilístico (curva de degradação) para previsão do desgaste das correias.

Em relação ao método de abordagem, pode-se classificá-lo como uma pesquisa qualitativa e quantitativa. Segundo Mendes (2011), Uma pesquisa qualitativa tem como base a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas; já a pesquisa quantitativa leva em consideração tudo que pode ser quantificável, o que significa traduzir em números, dados e fatos, permitindo classificá-los e analisá-los. A abordagem qualitativa é utilizada para definir quais variáveis impactam na degradação de correias. A abordagem quantitativa é usada para tratar os dados relativos às variáveis definidas anteriormente (na abordagem qualitativa), elencando-as juntamente com a variável de resposta (degradação de correias), de modo a possibilitar a utilização de uma

regressão multivariada para verificar quais variáveis realmente tem efeito significativo sobre a variável resposta. Segundo Ribeiro (2007), cada vez mais pesquisadores estão reconhecendo as vantagens de associar métodos qualitativos e quantitativos, resultando em misturas metodológicas que fortalecem o desenho da pesquisa.

### 3.4 Realização da pesquisa qualitativa

Segundo Santos (2008), uma pesquisa qualitativa é adequada quando a familiaridade, o conhecimento e a compreensão do tema em estudo são insuficientes, tendo assim por objetivo aprofundar o entendimento sobre o tema.

No método proposto, utilizam-se duas pesquisas qualitativas para a consolidação dos resultados. Primeiramente, realiza-se um estudo teórico do tópico degradação de correias, conforme descrito no Capítulo 2; em seguida, utiliza-se coleta de dados através da técnica de Grupo Focado (GF).

O estudo teórico permite uma visão geral dos principais agentes causadores de degradação em correias, sendo importante para permitir um nível de conhecimento mais aprofundado sobre o assunto. Entretanto, tem como limitação trazer uma visão generalista sobre o assunto, não sendo específico para as características da localidade onde o trabalho está sendo desenvolvido. Já a opção de utilizar o GF permite capturar informações específicas do *site* em estudo, uma vez que é realizado com profissionais daquela localidade. A partir dos dados obtidos nesta etapa, é feita uma consolidação dos resultados, correlacionando-os de modo a definir quais variáveis apresentam impacto significativo e quais suas influências no processo de desgaste de correias. Com os dados obtidos é possível mapear quais são as principais variáveis, inerentes a um determinado processo, que impactam na degradação de correias transportadoras. A identificação de alguns fatores deriva diretamente da descrição e análise; no entanto, o efeito de outros está associado a maiores incertezas, permitindo apenas inferências e hipóteses para trabalhos futuros.

Para a realização de um GF é necessária uma série de preparativos, de modo a garantir a obtenção de resultados satisfatórios. Os passos operacionais de um GF estão descritos a seguir:

- **Planejamento do Grupo Focado:** O planejamento do GF é essencial e deve contemplar as seguintes etapas: (i) definição do objetivo: neste caso, o objetivo é levantar quais variáveis impactam (e como) na degradação de correias, considerando a realidade onde os TCs estão inseridos; (ii) identificação dos participantes: para que possa ser produtivo,

devem ser mapeados profissionais que tenham experiência com correias transportadoras, preferencialmente aqueles que trabalham na área de manutenção de transportadores ou vulcanização. Deve ser feito um contato prévio, via telefone ou presencial, para explicar sobre o trabalho e verificar disponibilidade dos mesmos para participar do GF; (iii) elaboração do roteiro e questionário a ser utilizado: para uma correta condução dos trabalhos, sugere-se a elaboração de um roteiro constituído de uma guia de tópicos onde devem ser listados aspectos ou questões que podem ser formadas apenas por palavras chaves, mas que permitam seguir um raciocínio lógico. O questionário deve ser constituído de questões que permitam obter o exato conteúdo desejado. Tais questões podem ser enquadradas nas seguintes categorias (RIBEIRO, 2007):

- **Questões Abertas:** primeira rodada de perguntas, que poderá ser feita a todos, permitindo resposta rápida e identificação das características dos participantes;
  - **Questões introdutórias:** têm como objetivo introduzir o tópico geral de discussão e fornecer aos participantes oportunidades para refletir sobre experiências anteriores;
  - **Questões de transição:** são aquelas que movem a conversação para as questões chave que norteiam o estudo;
  - **Questões-chave:** direcionam o estudo, sendo as questões que requerem maior atenção e análise;
  - **Questões finais:** fecham a discussão considerando tudo o que foi dito, permitindo aos participantes considerar os comentários partilhados e identificar os aspectos mais importantes;
  - **Questão final:** moderador deverá fazer explanação sobre propósito do estudo e perguntar se algo foi esquecido ou se os participantes têm alguma colocação adicional.
- **Condução das sessões:** Nesta etapa deve-se definir a forma de condução do GF, considerando como será feito o armazenamento dos dados para permitir posterior transcrição e análise. Pode-se utilizar gravação para a obtenção dos dados ou também vídeo. Importante ressaltar que o uso do vídeo pode causar incômodo nas pessoas que estão participando, mas tem a vantagem de permitir identificar quem está falando. Outro

ponto importante durante a etapa de condução é ter um local adequado para a realização do GF, considerando questões logísticas bem como o conforto para os participantes.

- **Análise dos dados obtidos:** A partir das transcrições realizadas, inicia-se a escrituração de cada sessão e depuração das informações julgadas importantes de análise. O uso da técnica de análise de dados está vinculado ao alcance do objetivo de realização do GF e pode se dar através da aplicação individual ou conjunta de técnicas de descrição, análise ou interpretação dos dados levantados. Os dados devem ser transcritos em uma planilha de dados, de forma a permitir uma rápida associação das ideias levantadas e preparação das informações para posterior análise global dos resultados (SANTOS, 2008).

### **3.5 Preparação e análise dos dados obtidos da pesquisa qualitativa**

A partir do estudo teórico e da realização do GF, obtém-se uma gama de dados referentes às possíveis variáveis que têm impacto na degradação de correias. De modo a definir aquelas variáveis com maior relevância ao objetivo do estudo, elabora-se uma matriz de priorização (conforme modelo na Tabela 3.1) com os dados obtidos do estudo teórico e do Grupo Focado. Nesta matriz deverão constar todas as variáveis que foram levantadas, considerando seu impacto no problema estudado, a disponibilidade dos dados (considerando a existência e grau de dificuldade de obtenção dos mesmos) e sua confiabilidade. Para cada variável deverá ser preenchida uma pontuação referente aos quesitos citados anteriormente, onde se utiliza uma escala contínua, variando de 1 a 10, onde 1 denota intensidade mínima e 10 denota intensidade máxima do quesito sendo avaliado. A pontuação referente ao impacto da variável no problema em questão deverá ser definida a partir das análises feitas dos dados obtidos do estudo teórico bem como do GF. A disponibilidade e a confiabilidade dos dados deverão ser pontuadas com base na realidade do ambiente onde o estudo está sendo realizado, o que depende diretamente dos sistemas informatizados bem como da qualidade das informações que são armazenadas nestes sistemas.

MATRIZ PRIORIZAÇÃO				
Variável	Impacto	Disponibilidade	Confiabilidade	Relevância
				0
				0
				0
				0
				0
				0
				0
				0
				0
				0

**Tabela 3.1:** Matriz de relevância das variáveis obtidas na pesquisa qualitativa

A partir do preenchimento de todas as informações define-se a relevância das variáveis, que é calculada através do produto dos quesitos impacto, disponibilidade e confiabilidade, sendo que aquelas cuja pontuação atingir valor acima de 250 deverão ser priorizadas e utilizadas no estudo. O valor de 250 foi definido como critério de corte a partir da premissa de uma variável ter pelo menos dois quesitos de alta intensidade.

### 3.6 Definição da abordagem Quantitativa

A abordagem quantitativa será realizada considerando as variáveis priorizadas a partir do estudo qualitativo, conforme descrito anteriormente. Tais variáveis serão tratadas como covariáveis e utilizadas para a obtenção de uma curva de degradação das correias.

Para obtenção de curvas de degradação é necessário utilizar modelos matemáticos que permitam obter uma correlação entre os valores obtidos de desgaste com as covariáveis elencadas. Para tanto, pode-se utilizar técnicas de regressão (ver Capítulo 2).

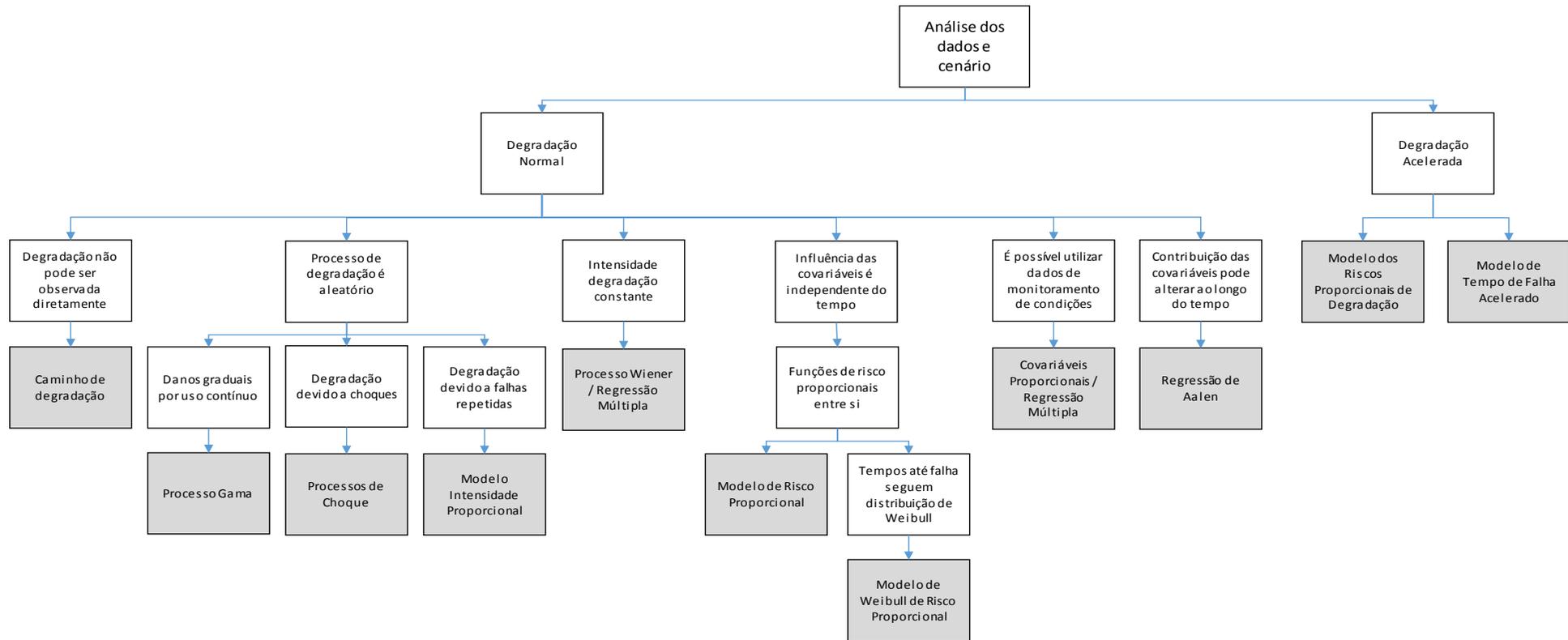
O método de previsão de degradação deve propiciar um modelo preditivo que represente o mais próximo possível a situação em estudo. A metodologia de seleção visa direcionar a utilização de um método ou de vários métodos que gerem o menor erro de previsão. Deve-se utilizar preferencialmente métodos de previsão estruturados, com passos sistemáticos e detalhados, que possam ser descritos e replicados. Deve-se privilegiar técnicas quantitativas simples, com poucas variáveis e relações simples entre elas, pois estas tendem a ser menos tendenciosas, fazem uso mais eficiente dos dados, ajudam no entendimento e aceitabilidade do método, e reduzem erros e custos. Métodos simples também são utilizados quando a incerteza é grande e poucos dados são úteis. Método mais complexos só devem ser utilizados quando

houver evidências para tal, pois podem incluir erros que se propagam através do sistema de previsão ou que são difíceis de detectar (LEMOS, 2006).

Conforme apresentado no Capítulo 2, a literatura traz diversas técnicas para obtenção de modelos de degradação. Cada técnica tem suas vantagens e desvantagens, sendo necessária uma avaliação prévia, de modo a se definir aquela que melhor se adequa à situação em estudo. Considerando os modelos vistos anteriormente e visando facilitar o processo decisório do modelo a ser utilizado, foi elaborada uma matriz resumo com as principais características de cada técnica (Tabela 3.2), bem como um fluxograma visando facilitar o processo decisório (Figura 3.1). A partir da análise da tabela e do fluxograma, é possível avaliar qual a técnica mais adequada a ser empregada, considerando os dados e cenários da análise. Diferentes métodos podem ser úteis para a maioria das situações e comparar diversos métodos pode ajudar na obtenção de uma previsão mais precisa; porém, esta análise pode ser cara e consumir muito tempo (LEMOS, 2006).

Modelo	Aplicações potenciais
Modelo Geral do Caminho de Degradação	Adequado para caracterizar observações tanto de modelos lineares como não-lineares Adequado para amostras que são testadas em um ambiente homogêneo
Processo Gama	Adequado para modelar degradação aleatória monotônica e gradual Pode ser aplicado para processos de degradação em modelos de otimização de manutenção
Processo de Wiener	Não pode ser utilizado para modelar processos monotônicos crescentes, mas pode ser efetivo para modelar processos de degradação que consideram efeitos de manutenção
Processos de Choque	Adequado para processos de degradação expostos a estresses pontuais
Modelo de Riscos Proporcionais de Degradação	Adequado para dados de testes acelerados de degradação
Modelo de Risco Proporcional (PHM)	Pode ser utilizado para investigar efeitos das covariáveis na função de risco dos ativos Adequado para situações que a influência de uma covariável é independente do tempo
Modelo de Tempo de Falha Acelerado (AFTM)	Adequado para obter confiabilidade e taxa de falhas de equipamentos e componentes em curtos períodos de tempo Restritivo a situações nas quais as distribuições de confiabilidade sob diferente valores de covariáveis somente se diferenciam em escala
Modelo de Covariáveis Proporcionais	Adequado para estimar função de risco de um sistema utilizando as informações do monitoramento de condições do mesmo
Modelo de Intensidade Proporcional (PIM)	Adequado para situações de eventos de falhas repetidos, os quais seguem um processo estocástico Utilizado para modelar processos de intensidade de falhas e reparos de sistemas reparáveis que incorporam covariáveis
Modelo de Weibull de Risco Proporcional (WPHM)	Adequados para situações nas quais se assume que os tempos até falhas seguem uma distribuição de Weibull
Modelo de Regressão de Aalen	Adequado para situações nas quais as contribuições das covariáveis alterem ao longo do tempo Considera que as funções de regressão podem variar arbitrariamente com o tempo
Regressão Múltipla	Adequada para situações nos quais as observações das covariáveis podem ser consideradas fixas em amostras repetidas Adequada para situações nas quais grandes quantidades de dados sobre as covariáveis estão disponíveis

**Tabela 3.2:** Matriz resumo das principais características dos métodos estudados



**Figura 3.1:** Fluxograma para escolha do método a ser utilizado na análise dos dados

### **3.7 Levantamento e preparação de dados para a abordagem quantitativa**

A partir da definição das covariáveis a serem utilizadas (seção 3.5), pode-se estruturar a coleta de dados para o processo de obtenção do modelo de degradação das correias. A coleta de dados pretende gerar subsídios consistentes à realização da etapa de análise de dados. Os pontos principais desta etapa relacionam-se a: (i) coletar dados de registros históricos nos sistemas informatizados, (ii) coletar dados técnicos e (iii) realizar análise preliminar dos dados obtidos.

Para realizar a coleta de dados de registros históricos deve-se primeiramente definir um período de tempo para o qual irá se trabalhar. Todos os dados importantes para o modelo devem ser coletados e organizados de modo a facilitar seu uso.

A coleta de dados técnicos pode ser realizada de duas formas: (i) a partir de arquivos técnicos e (ii) através de medições *in-loco*. Para a coleta via arquivos técnicos, deve-se tomar o cuidado para não se utilizar informações desatualizadas. Para aquelas situações onde se tem dúvidas sobre as informações ou na falta das mesmas, deve-se proceder com coletas através de medições nos locais e equipamentos que serão analisados.

Após a coleta dos dados referentes às covariáveis priorizadas, deve-se realizar sua análise preliminar, uma vez que, na prática, é comum a existência de dados incompletos, fora de padrões, inconsistentes e redundantes. Todos os desvios encontrados devem ser tratados e expurgados, se necessário, do banco de dados, de modo a evitar erros durante a fase de elaboração do modelo.

### **3.8 Implementação do Método Quantitativo**

Após a definição da metodologia mais adequada a ser utilizada para a situação avaliada, é necessário a implementação do método, o que pode ser feito utilizando softwares específicos ou genéricos que permitem a realização das análises e a obtenção das equações que irão formular o modelo.

Nesta etapa serão estimados os parâmetros do modelo, sendo este um processo iterativo onde é necessário avaliar a contribuição de cada covariável, bem como suas possíveis interações.

Pode-se dividir esta etapa em três: (i) Entrada dos dados tabulados para obtenção dos parâmetros; (ii) definição das interações entre covariáveis (iii) validação das covariáveis e suas interações. A entrada dos dados deve ser feita considerando que eles já estejam preparados (seção 3.7), observando o ajuste dos mesmos de modo a eliminar possíveis inconsistências, evitando erros no modelo. Para se definir a interação entre as covariáveis, simulações devem ser realizadas de modo a se obter um modelo que apresente a maior aderência à situação real. Entretanto, é importante observar que mesmo apresentando significância no modelo obtido, as interações entre covariáveis somente deverão ser utilizadas se apresentarem significado físico. A parte de validação das covariáveis e suas interações deverá ser realizada a medida que se simula o modelo, considerando a significância das mesmas.

### **3.9 Validação do Modelo obtido**

A validação do modelo obtido é uma importante etapa para assegurar que o processo de previsão funcione de forma adequada. O objetivo desta etapa é a avaliação da eficiência do método utilizado e do seu potencial para utilização futura (LEMOS, 2006).

Para os casos onde se utilizar um modelo matemático para fazer previsões, é importante submeter os resultados a especialistas que conheçam o fenômeno sendo modelado para que eles possam fazer uma avaliação para verificar se os resultados fazem sentido, se há algum evento no futuro que possa interferir na previsão e que não apareça nos dados históricos (não podendo, assim, ser capturado pelo modelo). O modelo pode dar uma previsão que talvez não tenha sentido prático, sendo que através da experiência dos especialistas é possível detectar tais situações.

Além da validação por especialistas, é vital que o modelo obtido seja validado através de testes específicos de acordo com a metodologia utilizada.

## **4 Resultados e discussão**

Neste capítulo será apresentada a aplicação da metodologia proposta para a obtenção de curvas de degradação para correias transportadoras utilizadas em uma usina de beneficiamento de minério de ferro.

### **4.1 Delimitação do trabalho**

Conforme apresentado no Capítulo 1, todo o trabalho foi desenvolvido utilizando-se dados relativos às correias transportadoras instaladas na Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro, no Complexo Minerador de Carajás, localizado em Parauapebas, no sudeste do Pará, pertencente à empresa VALE.

O trabalho foi focado basicamente na degradação proveniente do desgaste da cobertura superior das correias, não levando em consideração outras situações como fadigas de emendas, trincas, acidentes, etc. Este foco se deve ao fato de que situações diversas além do desgaste da cobertura superior são difíceis de mensurar, e mesmo de identificar, sendo que as bases históricas geralmente não contêm este tipo de informação, o que tornaria inviável o trabalho.

### **4.2 Caracterização do Cenário**

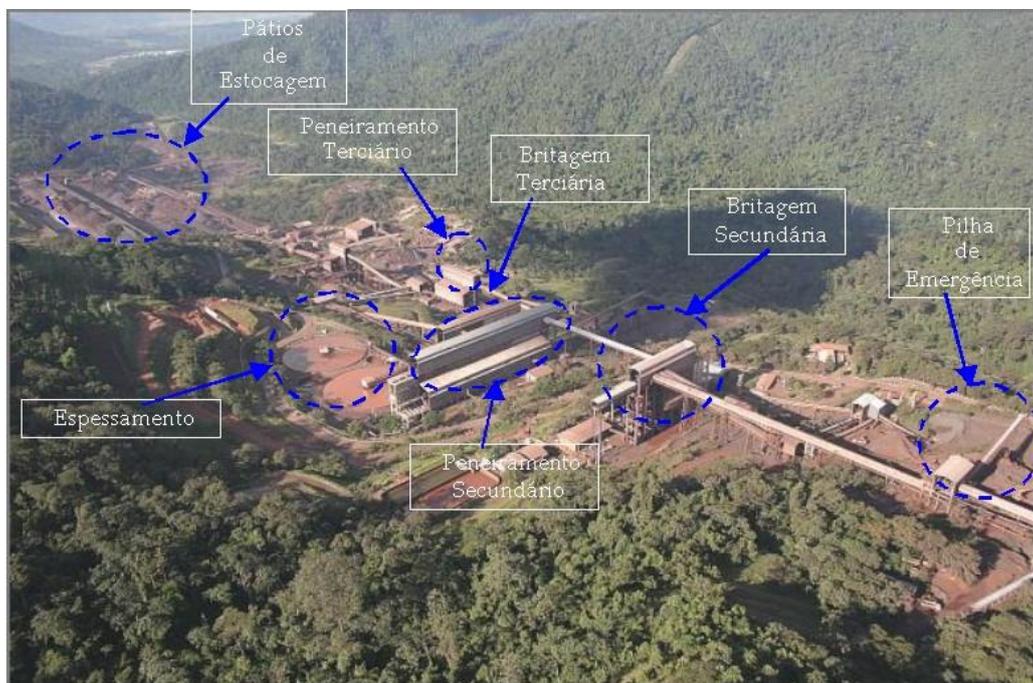
A Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro, no Complexo Minerador de Carajás, está localizada no município de Parauapebas, no sudeste do estado do Pará, no Brasil. Pertencente à empresa VALE, este site é considerado como sendo o maior complexo minerador de minério de ferro do mundo.

A Usina produz atualmente três produtos de diferentes granulometrias: *Sinter Feed*, *Granulado* e *Pellet Feed*. Ressalta-se que o elevado teor de ferro da hematita de Carajás é responsável por considerável redução dos custos de beneficiamento do minério, não sendo necessária a concentração do mesmo para obter os produtos comercializados.

Para permitir a adequação física dos produtos, as instalações são compostas de equipamentos que realizam as operações de cominuição em britadores giratórios, cônicos e de mandíbulas, classificação em peneiras, classificadores espirais e ciclones, desaguamento em

filtros horizontal, vertical e de prensa, e espessamento em espessadores para a recuperação de água reutilizada no processo.

A usina de beneficiamento contém, ainda, um sistema de captação e distribuição de água, estação de amostragens, uma central de ar comprimido, rede de distribuição de energia, pátio de estocagem, recuperação e carregamento de produtos. Os prédios que abrigam as instalações são separados para permitir futuras expansões e são interligados por transportadores de correia. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam vistas gerais das instalações que fazem parte da Usina de Beneficiamento do Complexo.



**Figura 4.1:** Vista de montante para jusante da Usina de Beneficiamento; ao fundo Pátio de Estocagem

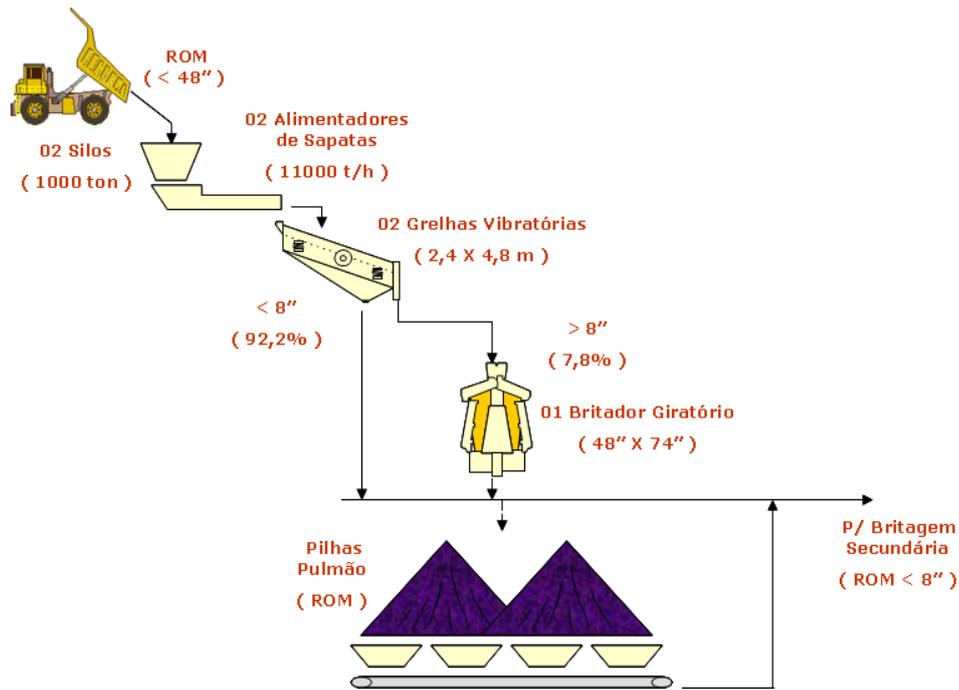


**Figura 4.2:** Vista de jusante da Usina de Beneficiamento

Pode-se dizer que as correias são como artérias na usina. Através delas se dá todo o transporte do minério durante as fases do processo. Para a elaboração deste trabalho utilizou-se como referências transportadores de correias que fazem parte dos processos de britagem semimóvel, britagem primária, britagem secundária e peneiramento secundário. Tais processos são explicados na sequência.

#### **4.2.1 Britagem Primária (Brit 1)**

O primeiro estágio de cominuição (quebra) do minério ocorre nas britagens primárias. A Figura 4.3 mostra um fluxograma de sua operação. A britagem primária reduz a granulometria do minério de ferro a frações menores que 200 mm (8”), a partir do produto originário da mina e transfere-o à britagem secundária, com um fluxo o mais contínuo e uniforme possível.



**Figura 4.3:** Fluxograma da Britagem Primária

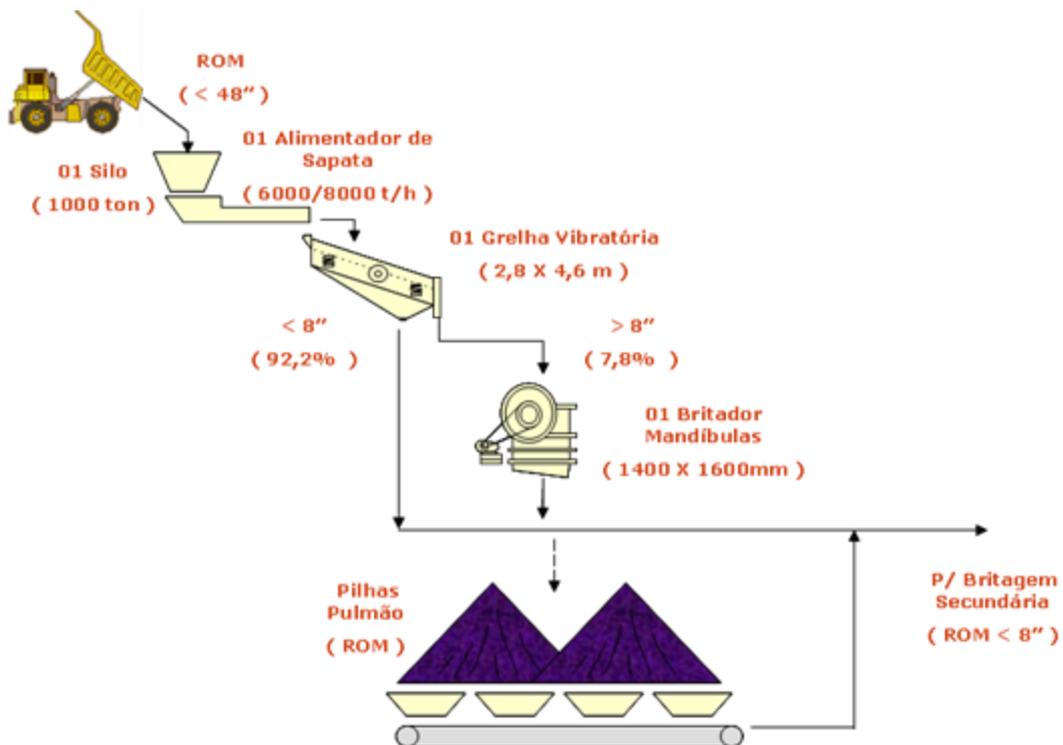
A Britagem Primária possui um britador giratório, que reduz o material abaixo de oito polegadas. A alimentação do britador é o material retido em duas grelhas vibratórias; o passante da grelha e o material britado alimenta o circuito de britagem secundária.

#### 4.2.2 Britagem Semimóvel (BSM)

As Britagens Semimóveis - BSMs são instalações destinadas ao processamento primário do minério de ferro, ou seja, constituem o início do processo industrial (similar à britagem primária). Atualmente estão instaladas em pontos distintos quatro estruturas de britagem semimóveis com características similares, que são responsáveis por aproximadamente 90% da alimentação da usina; são elas: BSM 1, BSM 2, BSM 3 e BSM 4 localizadas respectivamente nas minas de N4WN, N4E, N5E e N4WN. Essas estruturas são realocadas em função da mudança do centro de massa da mina. Esses quatro pontos de alimentação, juntamente com a britagem primária, respondem pelo processo de britagem inicial de todo minério alimentado na usina de beneficiamento industrial de Carajás. A figura 4.4 ilustra uma dessas estruturas, que estão em operação no Complexo; a figura 4.5 apresenta o fluxograma de operação das mesmas.



**Figura 4.4:** Britagem Semimóvel 3



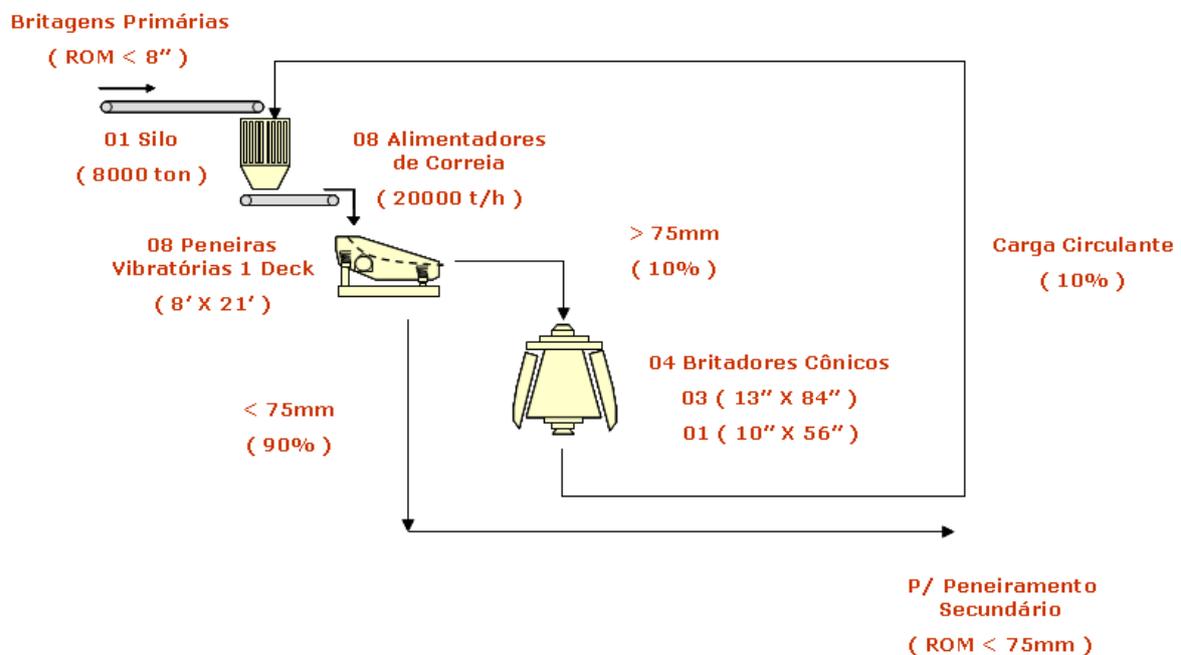
**Figura 4.5:** Fluxograma Britagem Semimóvel (BSM 1, 2, 3 e 4)

As BSMs são implantadas nos centros de massa das cavas e permanecem em cada local durante um período mínimo de 5 anos, quando então podem ser deslocadas para outra cava. As

britagens semimóveis possuem britadores de mandíbulas que reduzem o material abaixo de oito polegadas. A alimentação do britador é realizada a partir do material que fica retido em uma grelha vibratória. O passante da grelha e o material britado alimentam o circuito de britagem secundária.

### 4.2.3 Britagem Secundária (Brit 2)

A função principal da britagem secundária é adequar (reduzir para menor que 75mm) o tamanho máximo do material para a classificação da etapa seguinte e, por este motivo, opera em circuito fechado, garantindo a adequação do produto. A figura 4.6 mostra as etapas do processo de Britagem Secundária.



**Figura 4.6:** Etapas da Britagem Secundária

Composta por oito linhas com oito peneiras de deck simples, o retido de cada duas peneiras alimenta um britador cônico e o britado destes fecha o circuito formando a nova alimentação da britagem secundária. O passante das peneiras, que consiste de material abaixo de 75 mm, segue para o peneiramento secundário.

A britagem secundária possui ainda uma pilha pulmão com capacidade de aproximadamente 100 mil toneladas de minério, que garante uma flexibilidade operacional em caso de paradas do circuito, mantendo as BSMs e a britagem primária operando.

#### 4.2.4 Peneiramento Secundário (Pen 2)

O peneiramento secundário é a principal unidade do beneficiamento de minério de ferro, onde é obtida a maior parte dos produtos finais, a partir da classificação granulométrica do minério de ferro anteriormente cominuído nas unidades de britagem. É constituído por 17 linhas de produção e possui as maiores dimensões no conjunto de edificações da usina de beneficiamento de minério de ferro de Carajás. A Figura 4.7 mostra um fluxograma de sua operação.

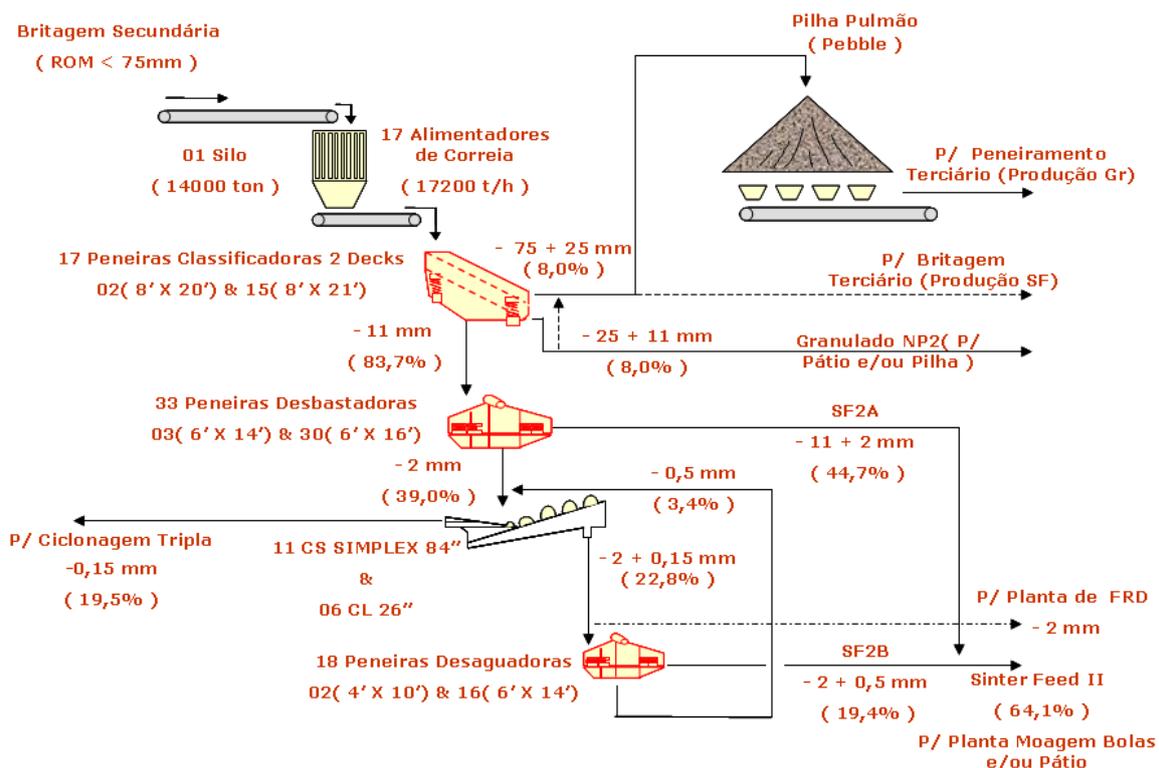


Figura 4.7: Etapas do Peneiramento Secundário

As peneiras classificadoras são de duplo deck, com abertura que varia de 45 milímetros no primeiro deck a 11 milímetros no segundo.

O peneiramento secundário está operando atualmente com nove linhas a úmido compostas por: peneiras classificadoras, peneiras desbastadoras, peneiras desaguadoras e classificadores espirais. O peneiramento é efetuado com adição permanente de água sobre as peneiras em todos os decks, cuja função é separar as frações mais finas do minério. Além das nove linhas a úmido, existem também, oito linhas a umidade natural, que processam o minério de ferro apenas em uma peneira classificadora, simplificando o processo e eliminando a adição de água.

As peneiras classificadoras das linhas a úmido podem gerar três fluxos distintos: (i) material retido no 1º deck (*pebble*), que é direcionado para a britagem terciária para a adequação de granulometria e produção de granulado NP3; (ii) material passante no 1º deck e retido no 2º, o granulado NP2; e (iii) o passante no 2º deck, que vai para classificação na peneira desbastadora.

As peneiras classificadoras das linhas a umidade natural podem gerar dois fluxos distintos: (i) material retido no 1º e 2º deck (*pebble*), que é direcionado para a britagem terciária para a adequação de granulometria e produção de granulado NP3; e (ii) material passante no 2º deck, que é o *sinter feed* (SF2A).

As peneiras desbastadoras, duas por linha, recebem o passante do 2º deck das peneiras classificadoras. O retido desta peneira é o *sinter feed* (SF2A), enquanto o passante vai para os classificadores espirais. Nas linhas a umidade natural, as peneiras desbastadoras não geram passante.

O classificador espiral é um equipamento de classificação por granulometria, através do princípio de sedimentação, e possui uma grande "bacia" metálica onde a polpa é alimentada. Nesta bacia encontra-se instalado um eixo com espirais "sem fim" que se movimenta arrastando o material mais grosseiro (*underflow*) para descarga sobre a peneira desaguadora. O material fino que não sedimenta (*overflow* do classificador) sai por transbordo da calha traseira do equipamento e é direcionado para a planta de ciclonagem para obtenção do *pellet feed*. A função desses classificadores é separar a fração maior e menor que 0,15 milímetros, onde o *underflow* (fração maior que 0,15 mm) é transferido para uma peneira desaguadora e o *oversize* desta peneira constitui o *sinter feed* SF2B, que se junta ao *sinter feed* SF2A formando o SF2, ou seja, o *sinter feed* do peneiramento secundário. O *overflow* do classificador (fração menor que 0,15 mm) é encaminhado para a etapa de deslamagem em ciclones, onde é gerado o *pellet feed*. As peneiras desaguadoras, uma por linha, recebem o *underflow* do classificador espiral ou ciclone, e retira a água. O passante das peneiras desaguadoras retorna aos classificadores como carga circulante.

### **4.3 Realização da pesquisa qualitativa**

No método proposto, utilizam-se duas pesquisas qualitativas para a consolidação dos resultados. Primeiramente, realizou-se um estudo teórico do tópico degradação de correias, conforme descrito no Capítulo 2; em seguida, utilizou-se coleta de dados através da técnica de

Grupo Focado (GF). Para a realização de um GF foi necessário uma série de preparativos, de modo a garantir a obtenção de resultados satisfatórios. A seguir estão descritos os passos operacionais da realização deste GF.

- **Planejamento do Grupo Focado:** (i) Definição do objetivo: o objetivo foi levantar quais são as variáveis inerentes ao processo de mineração que impactam (e como) na degradação de correias, considerando a realidade onde os TCs estão inseridos; (ii) Identificação dos participantes: a ideia inicial era realizar dois Grupos Focados compostos por profissionais de manutenção que trabalham na Usina de Beneficiamento de Minério de Ferro de Carajás, especificamente na área de vulcanização (setor responsável pela manutenção de correias); entretanto, em função de dificuldades de agendamento de reunião em função de diferenças de horários de trabalho e localização, optou-se por realizar apenas um Grupo Focado com as pessoas mais experientes. A reunião com o Grupo Focado foi realizada na própria usina, em função de logística, de modo a facilitar a participação dos convidados. Realizou-se a reunião com um grupo de 8 participantes, com a seguinte composição: (i) um Gerente e dois ex-gerentes de Vulcanização, (ii) um Supervisor de Manutenção de Vulcanização, (iii) um Supervisor e dois ex-supervisores de Planejamento de Manutenção de Vulcanização e (iv) uma auxiliar técnica responsável pelas anotações. O grupo teve a condução realizada pelo autor deste trabalho; (iii) elaboração do roteiro ou questionário a ser utilizado. Foi adotado um questionário básico de modo a guiar o grupo e permitir uma melhor produtividade, sendo considerado no mesmo uma sequência lógica que pudesse fazer uma introdução ao assunto e um aprofundamento gradativo no tópico em questão. A Tabela 4.1 apresenta o questionário que foi utilizado.

<b>Etapa</b>	<b>Descrição</b>
<b>Questões Abertas</b>	Nome e tempo de experiência com vulcanização
<b>Questões introdutórias</b>	Em sua opinião como ocorre o processo de desgaste de correias?
<b>Questões de transição</b>	Considerando a degradação da camada superior das correias, existem diferenças de desgaste em função das características de cada transportador, como local de instalação, tamanho, velocidade, etc?
	Algumas dessas variáveis podem apresentar maior ou menor impacto no desgaste?
<b>Questões-chave</b>	Quais seriam as variáveis que impactam no processo de desgaste das correias?
<b>Questões finais</b>	Baseado na discussão anterior, considerando uma escala de 1 a 10, onde 1 representa um baixo impacto e 10 um alto, qual seria o impacto de cada variável no processo de desgaste das correias?
	Como seria a forma de impacto de cada uma dessas variáveis no processo de desgaste?

**Tabela 4.1:** Questionário Grupo Focado – Degradação de correias

A partir dos dados obtidos nesta etapa, foi possível realizar uma consolidação dos resultados do estudo teórico e do GF, correlacionando-os de modo a definir quais variáveis apresentam impacto significativo e quais suas influências no processo de desgaste de correias. Com os dados obtidos foi possível mapear quais são as principais variáveis, inerentes a um determinado processo, que impactam na degradação de correias transportadoras. Estes dados serão apresentados na seção 4.4.

- **Condução das sessões:** A condução do GF foi feita considerando a possibilidade de armazenamento dos dados para permitir posterior transcrição e análise, sendo que para isto utilizou-se uma filmadora de modo a permitir a obtenção de um vídeo, o que facilitou a análise posterior, pois permitiu identificar quem está falando. Além disso, uma assistente anotou todos os pontos relevantes, fazendo um breve resumo de toda a reunião. Como optou-se por realizar apenas uma reunião, que ocorreu no próprio ambiente de trabalho, não houve maiores dificuldades com a questão logística.
- **Análise dos dados obtidos:** A partir das transcrições realizadas, fez-se a escrituração da sessão e depuração das informações julgadas importantes de análise. Como o objetivo era correlacionar os dados levantados no estudo teórico como os obtidos pelo

GF, utilizou-se uma planilha, que permitiu uma rápida associação das ideias levantadas e preparação das informações para posterior análise global dos resultados.

#### 4.4 Preparação e análise dos dados obtidos da pesquisa qualitativa

A partir do estudo teórico e da realização do GF, foram identificadas variáveis que podem impactar na degradação de correias, considerando as delimitações deste trabalho, conforme descrito anteriormente na seção 4.1. Na sequência serão apresentadas estas variáveis, considerando seu impacto e como contribuem na degradação das correias.

- **Ciclo da correia:** define-se como ciclo da correia ( $ci$ ), o tempo total em segundos, que é gasto para que uma correia complete uma volta completa no transportador. É calculado através da equação (53):

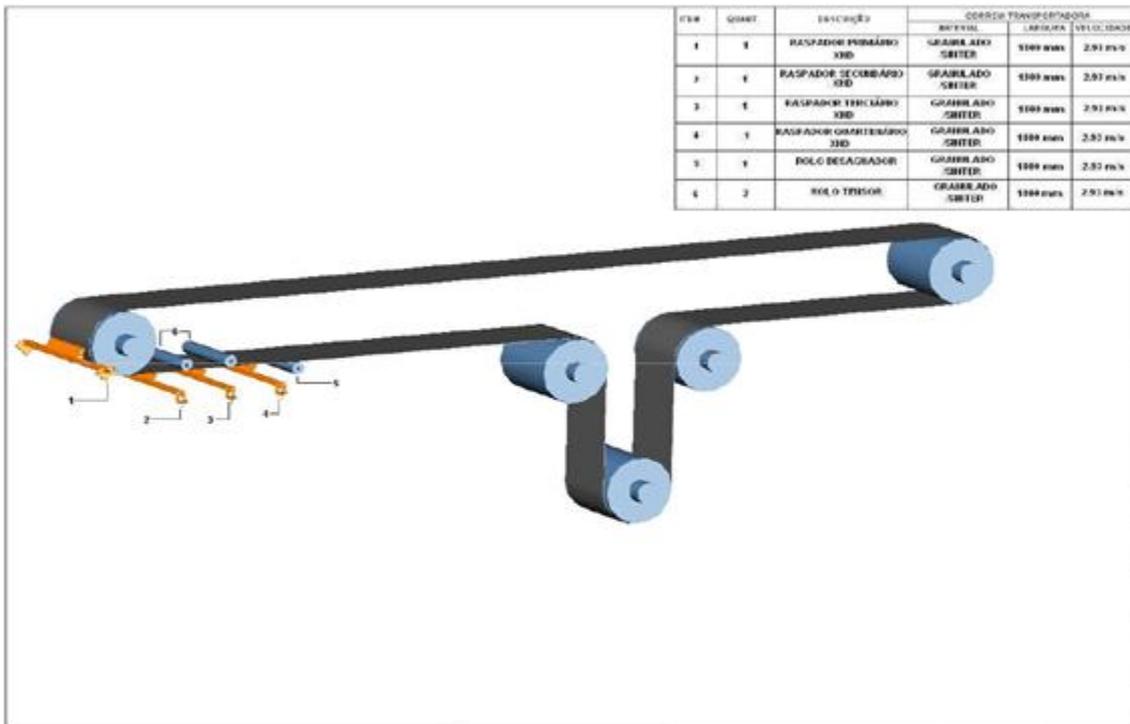
$$ci = \frac{c}{v} \quad (53)$$

onde  $c$  é o comprimento da correia em metros e  $v$  a velocidade da correia em metros por segundo. O ciclo é um valor fixo que depende do projeto de cada transportador de correia. A partir dos dados consolidados via GF, verifica-se que seu impacto em termos de desgaste é considerado alto, sendo inversamente proporcional ao seu valor, ou seja, quanto maior o ciclo, menor o desgaste, e vice-versa.

- **Comprimento da correia:** tamanho total da correia, considerando a unidade em metros. Assim como o ciclo, é um valor fixo que depende do projeto do transportador. Pela avaliação do GF, seu impacto no desgaste é médio e inversamente proporcional ao seu tamanho.
- **Contaminação:** refere-se a queda de material ao longo da estrutura de um transportador, provocando atrito entre este material e a correia. Tem alto impacto no desgaste da correia, sendo uma condição anormal de operação. Seu impacto é proporcional à quantidade de material que acumula ao longo da estrutura.
- **Desalinhamento:** conforme visto na seção 2.1.1, o desalinhamento provoca danos nas extremidades da correia, tendo grande impacto na sua degradação. Quanto mais tempo trabalhando desalinhada, maior o impacto provocado.
- **Queda do material:** todo transportador recebe o material através de um chute de recebimento (Figura 2.1), que tem diversas formas construtivas, com diferentes alturas

de queda. Essas variações podem provocar diferentes velocidades relativas do material em relação à correia, o que pode acentuar o desgaste da cobertura da correia em função da abrasão provocada pelo contato entre o material e a correia. Considerando a avaliação do GF, conclui-se que quanto maior a altura da queda (que no caso pode ser considerada como a própria altura do chute em metros), maior será o desgaste da correia, sendo alto o seu impacto no processo de degradação.

- **Largura da correia:** a largura de uma correia depende do projeto e é um valor fixo, sendo trabalhado com a unidade de milímetros. Seu impacto foi avaliado pelo GF como baixo, sendo inversamente proporcional à sua medida, entretanto, este foi um item que causou muitas dúvidas no grupo, pois pela observação prática das pessoas envolvidas, não estava claro qual é o seu real impacto no processo de desgaste.
- **Limpador de correias (raspadores):** tanto na literatura como na avaliação do GF, os sistemas de limpeza de correias impactam no seu desgaste. No caso específico deste trabalho, o sistema de limpeza é composto por raspadores, todos com a mesma especificação de material e de forma construtiva, alterando basicamente o quantitativo de raspadores. Um conjunto de raspadores é composto por um raspador primário, um secundário, podendo ainda existir um terciário, um quaternário e assim por diante (a Figura 4.8 traz um exemplo esquemático de montagem de um conjunto de raspadores), sendo que a quantidade dependerá das características do transportador no qual o conjunto está instalado. O impacto na degradação será proporcional ao número de raspadores instalados, tal que quanto maior a quantidade de raspadores, maior o desgaste.



**Figura 4.8:** Conjunto típico de raspadores em um transportador

- **Material no retorno:** refere-se à quantidade de material que cai no retorno de um transportador, geralmente próximo ao tambor de retorno. Provoca danos pela abrasão entre o material e a cobertura da correia, sendo seu impacto alto e proporcional ao tempo de operação nesta situação.
- **Material preso:** tem alto impacto na degradação (seção 2.1.1), sendo proporcional ao tempo de operação nesta situação.
- **Taxa de alimentação:** pela avaliação do GF, tem baixo impacto na degradação, sendo que o desgaste é provocado pela abrasão entre o material e a correia. Entretanto, a forma como esta variável realmente pode impactar não ficou totalmente clara nas discussões; acredita-se que seja proporcional ao volume alimentado, isto é, quanto maior a taxa, maior o desgaste.
- **Granulometria:** a granulometria do material foi avaliada como sendo uma variável de médio impacto na degradação das correias, provocando desgaste por abrasão ou extração de parte da cobertura superior. Seu impacto é proporcional à granulometria do material: quanto maior a granulometria, maior o desgaste.

- **Composto da correia:** trata-se da composição química da correia, tendo alto impacto no desgaste. O tipo do material de cobertura da correia irá ter maior ou menor resistência à abrasão. Sendo assim, seu impacto em termos de desgaste está diretamente ligado a sua composição.
- **Velocidade da correia:** trata-se da velocidade linear em que a correia trabalha. Geralmente é fixa e depende do projeto do transportador. Tem impacto proporcional à sua grandeza, tal que quanto maior a velocidade, maior o desgaste.

De modo a definir as variáveis com maior relevância ao objetivo do estudo, elaborou-se uma matriz de priorização (conforme descrito na seção 3.4) com os dados obtidos do estudo teórico e do GF, a qual pode ser vista na Tabela 4.2.

<b>MATRIZ PRIORIZAÇÃO</b>				
<b>Variável</b>	<b>Impacto</b>	<b>Disponibilidade</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>Relevância</b>
Ciclo da correia	9	10	10	900
Comprimento da Correia	5	10	9	450
Contaminação	10	1	1	10
Desalinhamento	10	2	1	20
Queda do material	8	7	8	448
Largura da Correia	3	10	10	300
Limpador de Correias (raspadores)	9	10	6	540
Material no Retorno	10	1	1	10
Material Preso	10	1	1	10
Taxa de alimentação	4	10	9	360
Granulometria	6	6	8	288
Composto Correia	10	10	7	700
Velocidade	5	10	9	450

**Tabela 4.2:** Matriz de priorização das variáveis que impactam o desgaste das correias

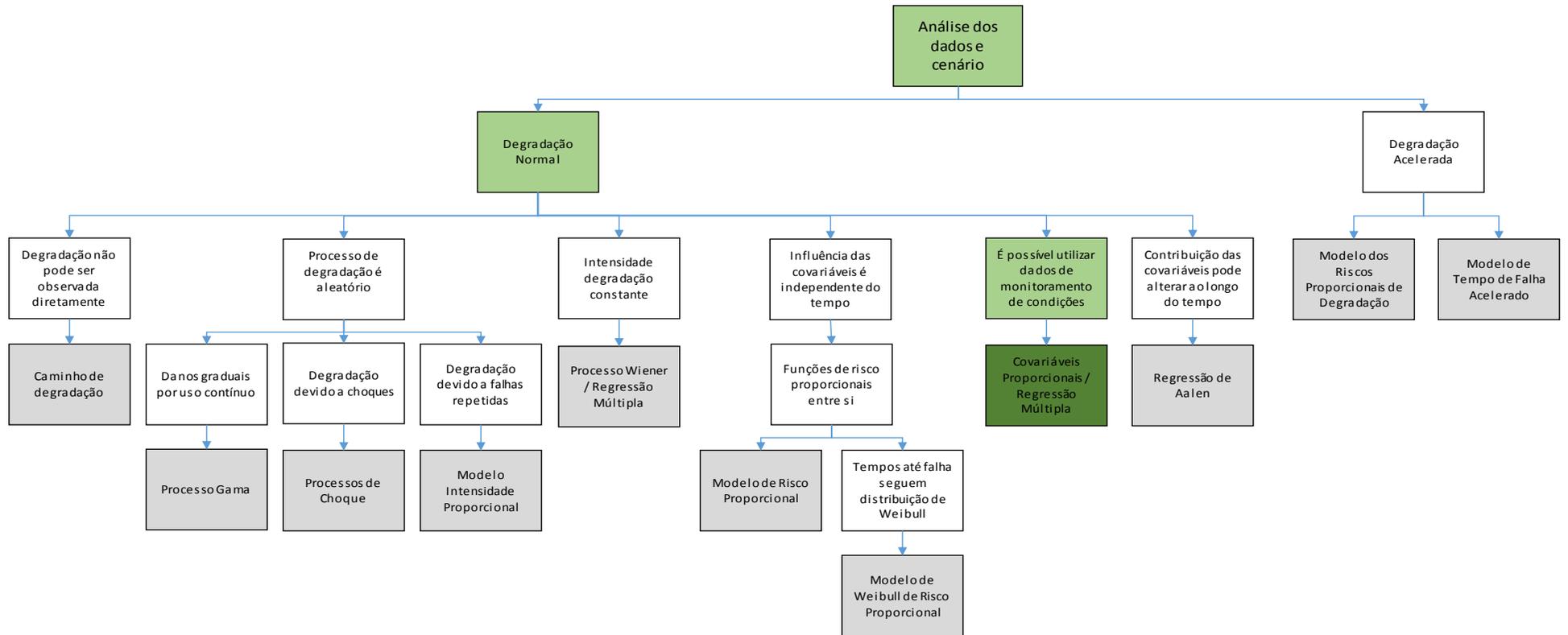
Considerando a Tabela 4.2, definem-se as variáveis que serão utilizadas no estudo: ciclo da correia, comprimento da correia, queda do material, largura da correia, limpador de correias (raspadores), taxa de alimentação, granulometria, composto e velocidade da correia.

Conforme visto anteriormente, a variável *ciclo da correia* é obtida a partir do produto da *velocidade* pelo *comprimento da correia*, dessa forma não se pode utilizar as três na regressão devido ao efeito de multicolinearidade. Sendo assim, apesar da variável *ciclo* apresentar maior relevância pela matriz de priorização, optou-se por utilizar as variáveis *velocidade* e *comprimento da correia* devido a possibilidade de interação das mesmas de forma separada com outras variáveis (o que não seria possível de avaliar com ciclo).

Considerando o cenário do trabalho, verifica-se que todas as correias utilizadas na usina têm o mesmo composto de cobertura, variando apenas especificações relativas a quantidade de lonas, tensão máxima admissível, largura e outras variações que não tem ligação direta com seu composto. Sendo assim, a variável *Composto da correia*, apesar de ter alto impacto e ser umas das priorizadas, não será utilizada.

#### **4.5 Definição da abordagem Quantitativa**

A partir da definição das covariáveis, é possível definir qual a metodologia mais adequada para a abordagem quantitativa. Considerando as definições feitas na seção 4.4, pode-se observar as seguintes características que irão compor a base de dados que será utilizada (o que permite a escolha do método mais adequado, conforme descrito na seção 3.6): (i) grande volume de dados disponíveis, (ii) existência de dados reais de desgaste monitorados ao longo do tempo, (iii) a relação de covariáveis ao longo do tempo é fixa e (iv) existência de covariáveis que são contínuas e também daquelas que variam ao longo do tempo. Sabendo dessas características, avaliando a Tabela 3.2 e o fluxograma da Figura 3.1, conclui-se que a regressão múltipla é o método mais adequado para esta situação (a Figura 4.9 mostra o fluxograma representando a situação descrita).



**Figura 4.9:** Fluxograma representado o método escolhido para análise dos dados

Verifica-se pelo fluxograma que poderia ser escolhido tanto a regressão múltipla como o método das covariáveis proporcionais para esta situação. Entretanto, como ressaltado na seção 3.6, deve-se privilegiar técnicas quantitativas de aplicação potencialmente simples, sendo este o motivo para a escolha da regressão múltipla.

#### **4.6 Levantamento e preparação de dados para a abordagem quantitativa**

A partir da definição das covariáveis a serem trabalhadas, deve-se realizar as coletas de dados necessárias para compor a base de dados a ser utilizada nas análises. Entretanto, antes de coletar os dados foi preciso definir quais seriam os transportadores abordados no trabalho. A escolha teve como norteador as seguintes características: (i) ser um transportador cujo desgaste da correia fosse monitorado através da técnica de ultrassom, e (ii) pertencer a um circuito dotado de balança, de modo a permitir o levantamento de sua taxa de alimentação. Considerando estes quesitos, foram definidos os transportadores apresentados na Tabela 4.3. Nesta tabela se encontram também as informações de algumas covariáveis que foram priorizadas.

Transportador	Velocidade (m/s)	Largura (mm)	Comprimento (m)	Raspador (quantidade)	Ciclo (s)	Queda material (m)	Circuito
113-02	4,2	1600,0	2160,0	2,0	520,5	6,3	BSM 1
113-03	4,2	1600,0	1322,0	2,0	318,6	6,2	BSM 1
113-04	4,3	2200,0	2251,0	2,0	525,9	6,0	BRIT 1
113-13	3,8	1600,0	280,0	0,0	74,1	5,2	BSM 2
113-14	3,9	1800,0	540,0	1,0	140,3	3,2	BSM 2
113-15	3,9	1800,0	1270,0	2,0	324,0	6,1	BSM 2
117-01	2,0	2200,0	75,5	1,0	37,8	3,0	BSM 3
117-03	3,9	1600,0	650,0	2,0	166,7	5,5	BSM 3
117-04	3,9	1600,0	1630,0	2,0	417,9	6,2	BSM 3
117-05	3,9	1600,0	1894,0	2,0	485,6	6,5	BSM 3
117-06	3,9	1600,0	3120,0	2,0	800,0	6,5	BSM 3
117-07	3,9	1600,0	1476,0	2,0	378,5	6,1	BSM 3
117-08	3,9	1800,0	452,0	2,0	115,9	8,8	BSM 3
121-04	5,0	2200,0	610,0	2,0	122,0	7,8	BRIT 1
121-07	5,0	1800,0	264,0	2,0	52,8	6,7	BSM 3
121-08	5,0	1800,0	246,0	2,0	49,2	4,4	BSM 3
122-01	4,7	2200,0	121,0	2,0	25,9	4,9	BRIT 1
122-07	5,2	1800,0	406,0	2,0	78,7	4,9	BRIT 2
122-08	3,6	1800,0	237,0	2,0	65,8	5,9	BRIT 2
122-09	3,5	1800,0	402,0	2,0	114,9	5,3	BRIT 2
131-01	5,2	2200,0	276,0	3,0	53,5	5,7	BRIT 2
131-10	4,2	1800,0	680,0	3,0	163,5	5,2	PEN 2
131-11a	4,8	1600,0	76,0	2,0	16,0	6,0	PEN 2
131-16	2,1	2200,0	65,0	0,0	31,7	6,7	BRIT 2
133-09	4,6	1800,0	385,0	3,0	83,3	6,6	PEN 2
133-15	4,7	1600,0	820,0	4,0	173,7	7,6	PEN 2
134-04	4,5	1800,0	507,0	3,0	112,7	5,5	PEN 2
151-05	4,4	1600,0	407,0	4,0	92,1	6,3	PEN 2
151-40	4,6	1600,0	360,0	4,0	78,3	10,6	PEN 2

**Tabela 4.3:** Relação de transportadores e suas covariáveis

Além das covariáveis na Tabela 4.3, tem-se ainda *taxa de alimentação* e *granulometria*. Os dados referentes a taxa de alimentação foram obtidos a partir do sistema informatizado de produção, que permite a obtenção de dados das balanças que se encontram instaladas em diversos transportadores. Tais dados são dados em toneladas de minério que passam no transportador em determinado intervalo de tempo, sendo o intervalo mínimo de 15 minutos. De posse dessas informações é possível obter a taxa de alimentação em determinado intervalo de tempo. Analisando de forma preliminar os dados obtidos para esta variável, verificou-se que o modo como os dados são armazenados não propicia um cálculo assertivo da taxa de alimentação, pois não se têm as informações do tempo total que o transportador rodou efetivamente naquele período. Para que fosse possível efetuar o cálculo, seria necessário realizar o cruzamento de informações dos sistemas informatizados de manutenção com os dados de produção. Entretanto, mesmo assim não se teriam exatamente as informações

requeridas, uma vez que no sistema informatizado de manutenção não são lançados os horários de parada, mas sim o tempo total de parada. Sendo assim, ao invés de trabalhar com a taxa de alimentação, optou-se por utilizar a quantidade total de minério transportado em determinado intervalo de tempo.

Em relação à variável granulometria, para os transportadores selecionados, verificou-se que existiam três situações: (i) material proveniente da mina, passando pelo processo de cominuição, via britagem primária ou BSM, sendo um material com distribuição granulométrica abaixo de 200 mm (na Tabela 4.3, correspondem aos transportadores pertencentes aos circuitos BRIT 1, BSM 1, BSM 2 e BSM 3); (ii) material proveniente da britagem secundária, com granulometria abaixo de 75 mm (transportadores pertencentes ao circuito BRIT 2); e (iii) material com granulometria abaixo de 11 mm, proveniente do peneiramento secundário (transportadores pertencentes ao circuito PEN 2).

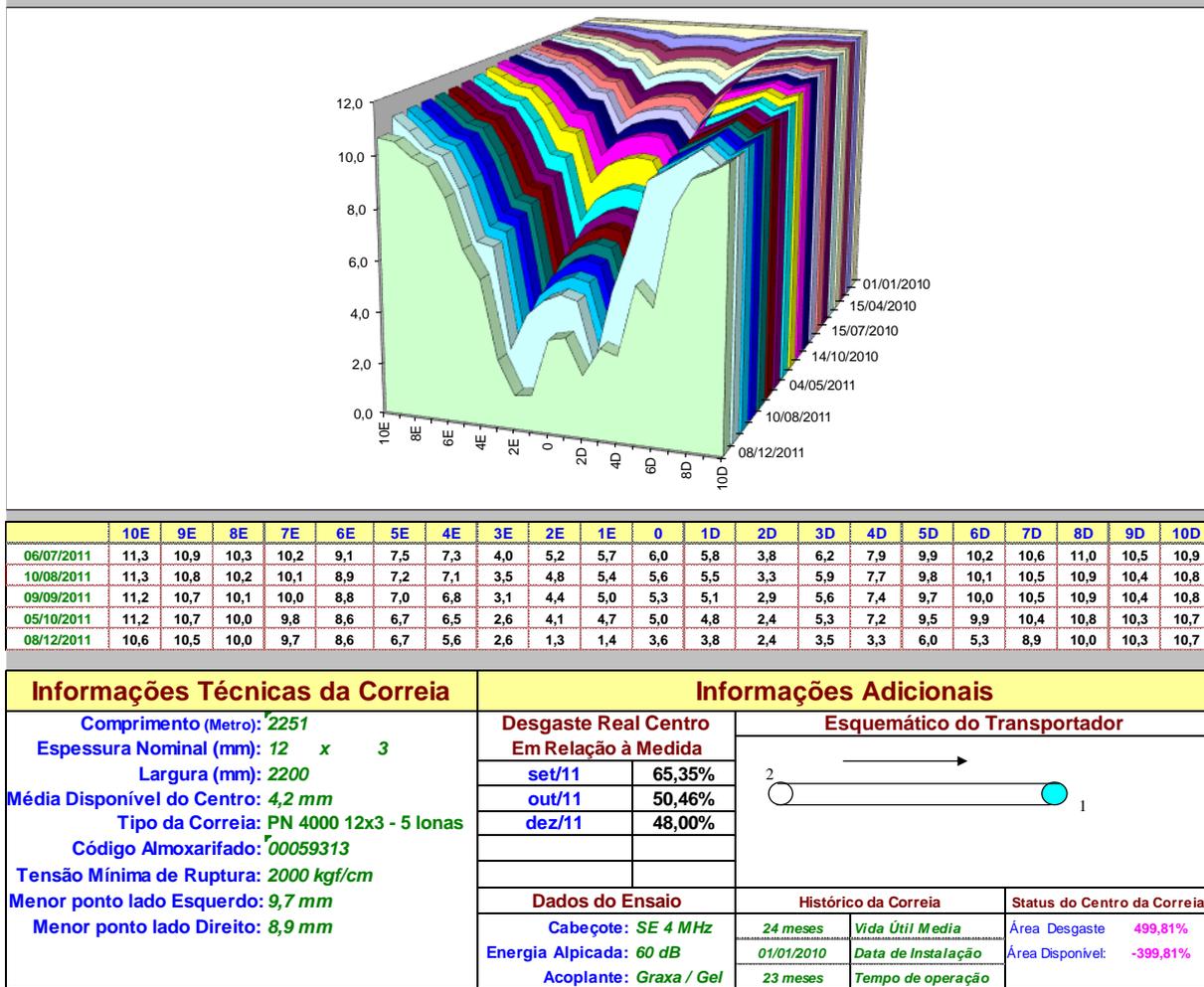
Verificou-se que para o caso da granulometria não seria possível trabalhar com valores, pois a distribuição granulométrica pode ter grandes variações de acordo com a frente de lavra, podendo inclusive se sobrepor para as três situações. Por exemplo, no material com granulometria abaixo de 200 mm, tem-se tamanhos diversos, sendo que a maioria se encontra na faixa de 1 a 11 mm, a mesma granulometria do material abaixo de 11 mm. Dessa forma, optou-se por considerar a granulometria como uma variável qualitativa e utilizar variáveis *dummies* para esta situação, sendo sua definição dada na Tabela 4.4.

Granulometria	Variável	
	M1	M2
Material abaixo 200 mm	0	0
Material abaixo 75 mm	1	0
Material abaixo 11 mm	0	1

**Tabela 4.4:** *Dummies* para variável Granulometria

Para que se possa realizar a análise de regressão, faz-se necessário ter dados referentes ao desgaste das correias (variável dependente ou de resposta). Tais dados foram obtidos a partir do controle de desgaste da cobertura das correias via ultrassom, que é realizado pela área de inspeção da usina. As medições de ultrassom ocorrem a priori a cada 30 dias (este período pode alterar em função de fatores diversos como mudança nas datas de paradas preventivas e indisponibilidade de mão de obra). Na Figura 4.10, tem-se um exemplo de controle de desgaste via ultrassom.

**TR - 113-04 / Relatório de Acompanhamento de Desgaste da Correia**



**Figura 4.10:** Exemplo de controle de desgaste de correias via ultrassom

A partir da Figura 4.10 observa-se que existem várias medidas ao longo do tempo, bem como 21 pontos de medição na seção transversal da correia (o número de pontos de medição é igual para todas as correias, independente da largura). Para se realizar o trabalho definiu-se o desgaste médio ( $DM$ ), dado pela diferença entre o valor atual em relação ao anterior dos 9 pontos centrais de medição (dos pontos 4E ao 4D), conforme equação (54):

$$DM = \frac{D4E_{t-1} - D4E_t + D3E_{t-1} - D3E_t + D2E_{t-1} - D2E_t + D1E_{t-1} - D1E_t + D0_{t-1} - D0_t + D4D_{t-1} - D4D_t + D3D_{t-1} - D3D_t + D2D_{t-1} - D2D_t + D1D_{t-1} - D1D_t}{9} \quad (54)$$

onde  $Dn_{t-1}$  representa o valor do desgaste anterior e  $Dn_t$  o valor do desgaste atual (todos os valores em mm). A escolha pelos 9 pontos centrais deve-se ao fato de que a região usual de

desgaste de uma correia se encontra no centro da mesma, sendo este o critério adotado pela manutenção do *site* em questão.

A partir da obtenção dos valores de  $DM$ , obteve-se também o desgaste médio acumulado ( $DMA$ ), definido pela equação (55):

$$DMA_t = DM + DMA_{t-1} \quad (55)$$

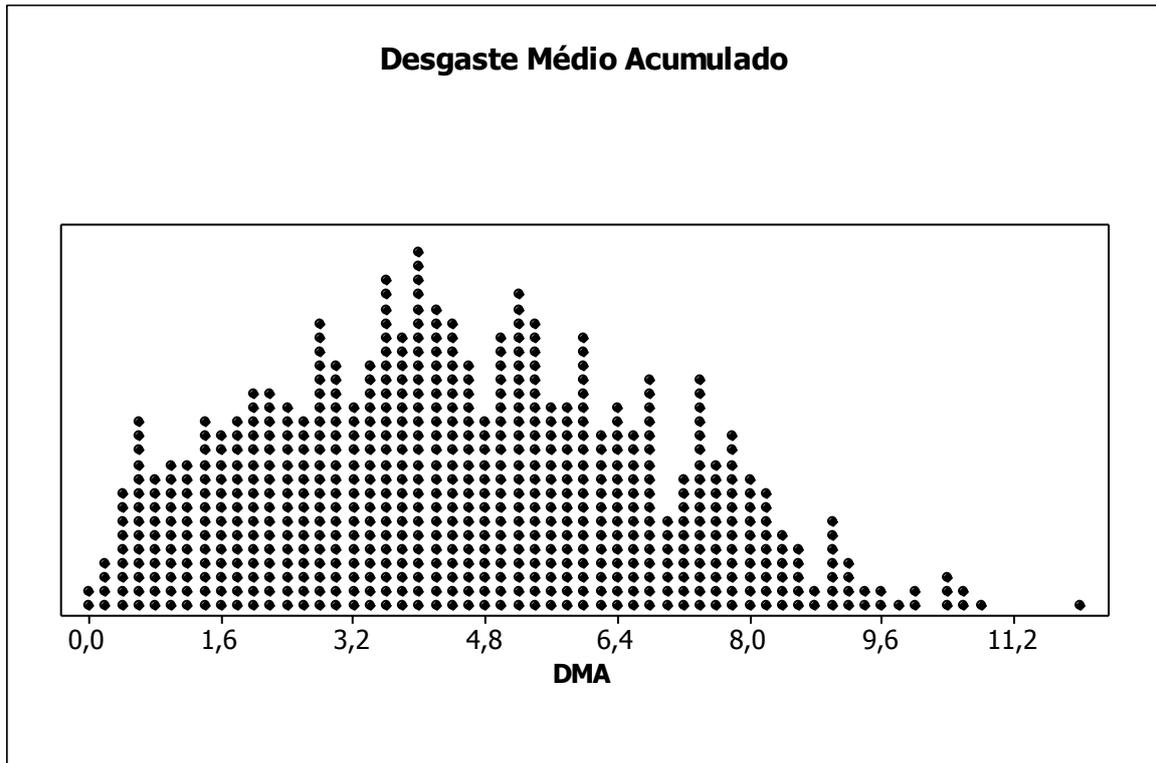
onde  $DMA_{t-1}$  é o desgaste médio acumulado anterior e  $DMA_t$  o atual.

A partir dessas definições, elaborou-se um banco de dados com a consolidação de todas as informações para posterior utilização na regressão e obtenção do modelo de degradação. A Tabela 4.5 traz uma visão parcial do banco de dados.

Transportador (TR)	Desgaste Médio (DM)	Desgaste Médio Acumulado (DMA)	DIAS (D)	Dias Acumulado (DAC)	Produção (PR)	Produção Acumulada (PRA)	Velocidade (VE)	Comprimento (CO)	Largura (LA)	M1	M2	Limpador de Correia (LC)	Ciclo (CI)	Queda de material (QM)
117-06	0,3	0,3	20,0	20,0	1266430,0	1266430,0	3,9	3120,0	1600,0	0,0	0,0	2,0	800,0	6,5
117-06	0,2	0,5	25,0	45,0	2457110,0	3723540,0	3,9	3120,0	1600,0	0,0	0,0	2,0	800,0	6,5
117-06	0,3	0,8	44,0	89,0	3451850,0	7175390,0	3,9	3120,0	1600,0	0,0	0,0	2,0	800,0	6,5
117-06	0,3	1,1	25,0	114,0	2242100,0	9417490,0	3,9	3120,0	1600,0	0,0	0,0	2,0	800,0	6,5
117-06	0,3	1,4	35,0	149,0	3181530,0	12599020,0	3,9	3120,0	1600,0	0,0	0,0	2,0	800,0	6,5
117-06	0,2	1,6	21,0	170,0	1888150,0	14487170,0	3,9	3120,0	1600,0	0,0	0,0	2,0	800,0	6,5
131-10	0,6	5,0	33,0	223,0	5983660,0	35070830,0	4,2	680,0	1800,0	0,0	1,0	3,0	163,5	5,2
131-10	0,4	5,4	42,0	265,0	6653620,0	41724450,0	4,2	680,0	1800,0	0,0	1,0	3,0	163,5	5,2
131-10	0,7	6,1	30,0	295,0	3427840,0	45152290,0	4,2	680,0	1800,0	0,0	1,0	3,0	163,5	5,2
131-10	0,1	6,3	32,0	327,0	4334600,0	49486890,0	4,2	680,0	1800,0	0,0	1,0	3,0	163,5	5,2
131-01	1,5	1,5	28,0	28,0	5224130,0	5224130,0	5,2	276,0	2200,0	1,0	0,0	3,0	53,5	5,7
131-01	1,5	3,0	35,0	63,0	6765350,0	11989480,0	5,2	276,0	2200,0	1,0	0,0	3,0	53,5	5,7
131-01	1,6	4,6	28,0	91,0	5728590,0	17718070,0	5,2	276,0	2200,0	1,0	0,0	3,0	53,5	5,7
133-15	0,1	0,1	31,0	31,0	3556000,0	3556000,0	4,7	820,0	1600,0	0,0	1,0	4,0	173,7	7,6
133-15	0,7	0,8	19,0	50,0	2066800,0	5622800,0	4,7	820,0	1600,0	0,0	1,0	4,0	173,7	7,6
133-15	0,9	1,7	21,0	71,0	1830050,0	7452850,0	4,7	820,0	1600,0	0,0	1,0	4,0	173,7	7,6
133-15	0,6	2,3	23,0	94,0	1884830,0	9337680,0	4,7	820,0	1600,0	0,0	1,0	4,0	173,7	7,6
133-15	0,4	2,7	49,0	143,0	3857090,0	13194770,0	4,7	820,0	1600,0	0,0	1,0	4,0	173,7	7,6
133-15	0,1	2,8	33,0	176,0	2555070,0	15749840,0	4,7	820,0	1600,0	0,0	1,0	4,0	173,7	7,6
122-08	0,3	0,3	28,0	28,0	1480341,0	1480341,0	3,6	237,0	1800,0	1,0	0,0	2,0	65,8	5,9
122-08	0,3	0,5	35,0	63,0	2046753,0	3527094,0	3,6	237,0	1800,0	1,0	0,0	2,0	65,8	5,9
122-08	0,8	1,4	70,0	133,0	3825450,0	7352544,0	3,6	237,0	1800,0	1,0	0,0	2,0	65,8	5,9
122-08	0,3	1,7	34,0	167,0	1336710,0	8689254,0	3,6	237,0	1800,0	1,0	0,0	2,0	65,8	5,9
122-08	0,3	1,9	27,0	194,0	1922790,0	10612044,0	3,6	237,0	1800,0	1,0	0,0	2,0	65,8	5,9

**Tabela 4.5:** Visão parcial do banco de dados

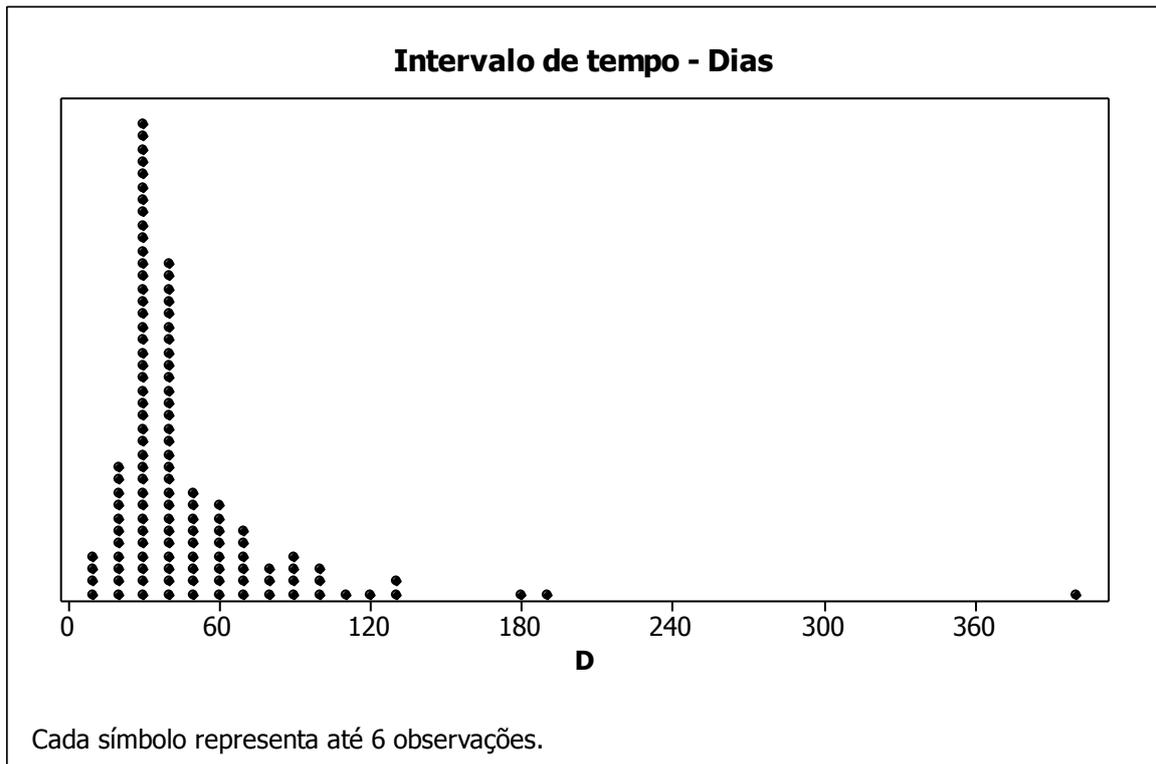
Após a consolidação do banco de dados, foi realizada uma análise exploratória dos dados o que permitiu visualizar possíveis inconsistências, bem como ter uma visão geral do comportamento das variáveis que irão compor o estudo. A Figura 4.11 representa o perfil de desgaste médio acumulado (*DMA*), que é a variável resposta da regressão, das amostras que compõem a base de dados.



**Figura 4.11:** Perfil do desgaste médio das amostras

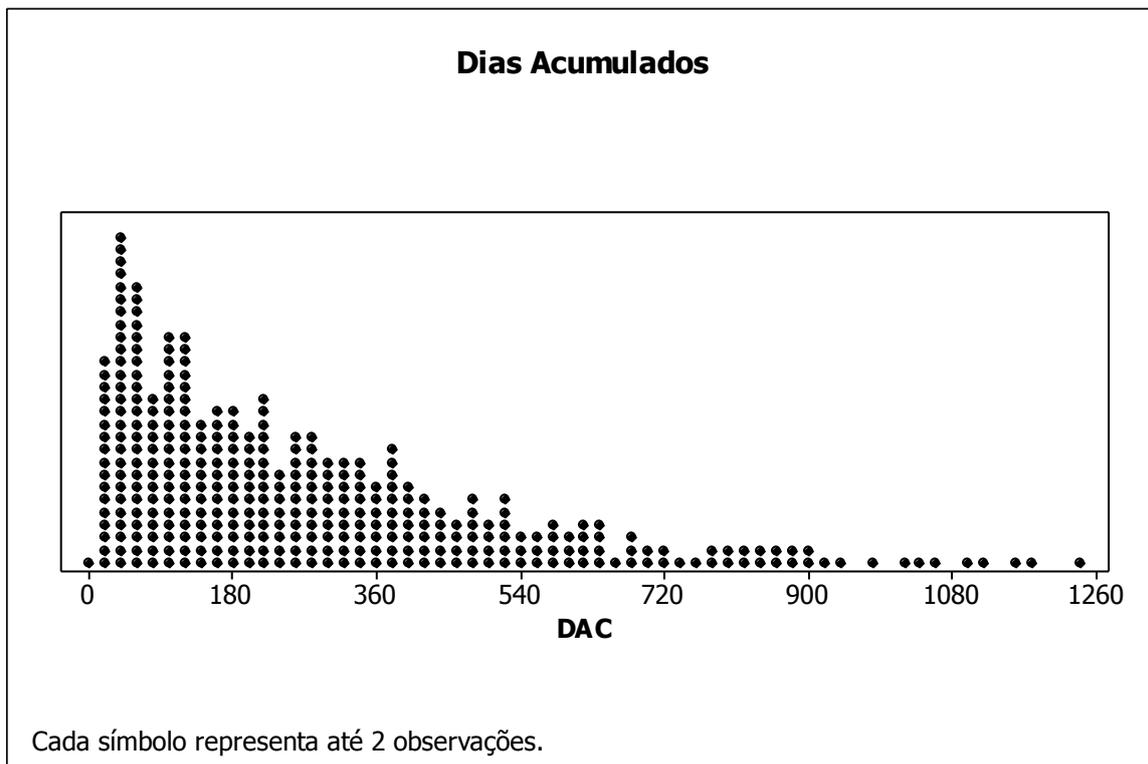
Pela Figura 4.11 pode-se verificar que a maioria das observações apresentam desgaste médio acumulado entre 0,6 e 8,2 mm; acima destes valores, a quantidade de observações cai significativamente.

A Figura 4.12 representa o perfil da quantidade de dias (*D*) entre cada observação (este período foi obtido a partir do controle de desgaste de correias via ultrassom de cada correia) para o conjunto de dados em análise.



**Figura 4.12:** Perfil da quantidade de dias entre cada observação

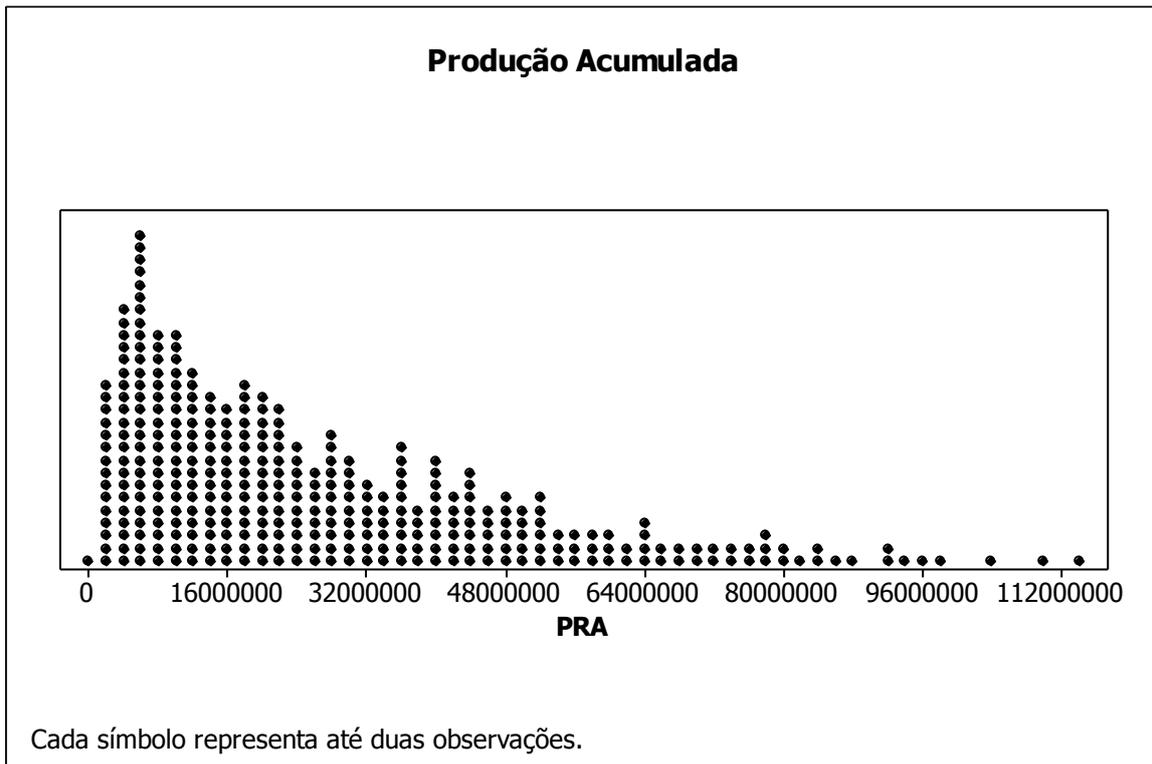
Verifica-se que a maioria das amostras se constitui de medições tomada durante um período que varia de 30 a 40 dias (o que já era esperado devido ser este o intervalo para as medições via ultrassom). Muitas poucas amostras incluem medições por períodos superiores a 120 dias, indicando a possibilidade de se tratarem de *outliers*. O perfil da quantidade de dias acumulados a partir da primeira medição é apresentado na Figura 4.13.



**Figura 4.13:** Perfil da quantidade de dias acumulados

Observando a figura anterior, pode-se verificar que grande parte das observações se encontram com no máximo 360 dias, acima deste número, há uma redução considerada.

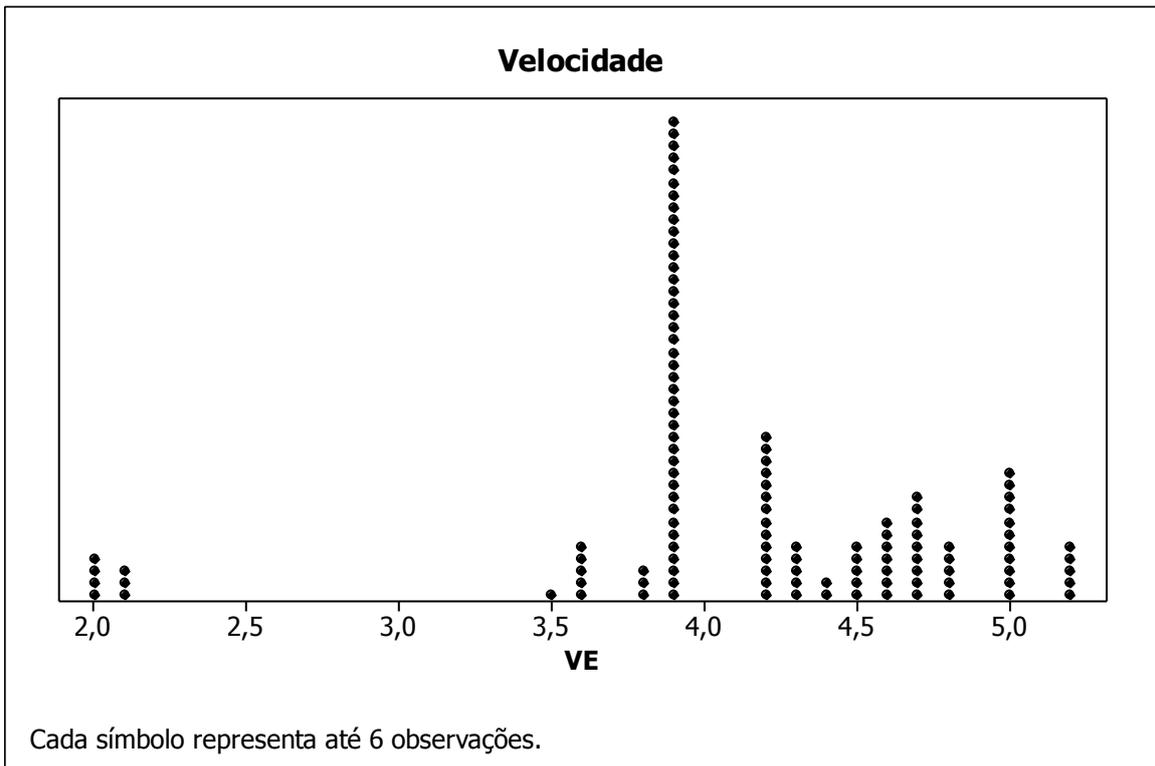
A Figura 4.14 mostra o perfil da variável produção acumulada (*PRA*), que representa a produção total acumulada em toneladas de minério de ferro, no período da observação, transportada pela correia.



**Figura 4.14:** Perfil da produção acumulada transportada

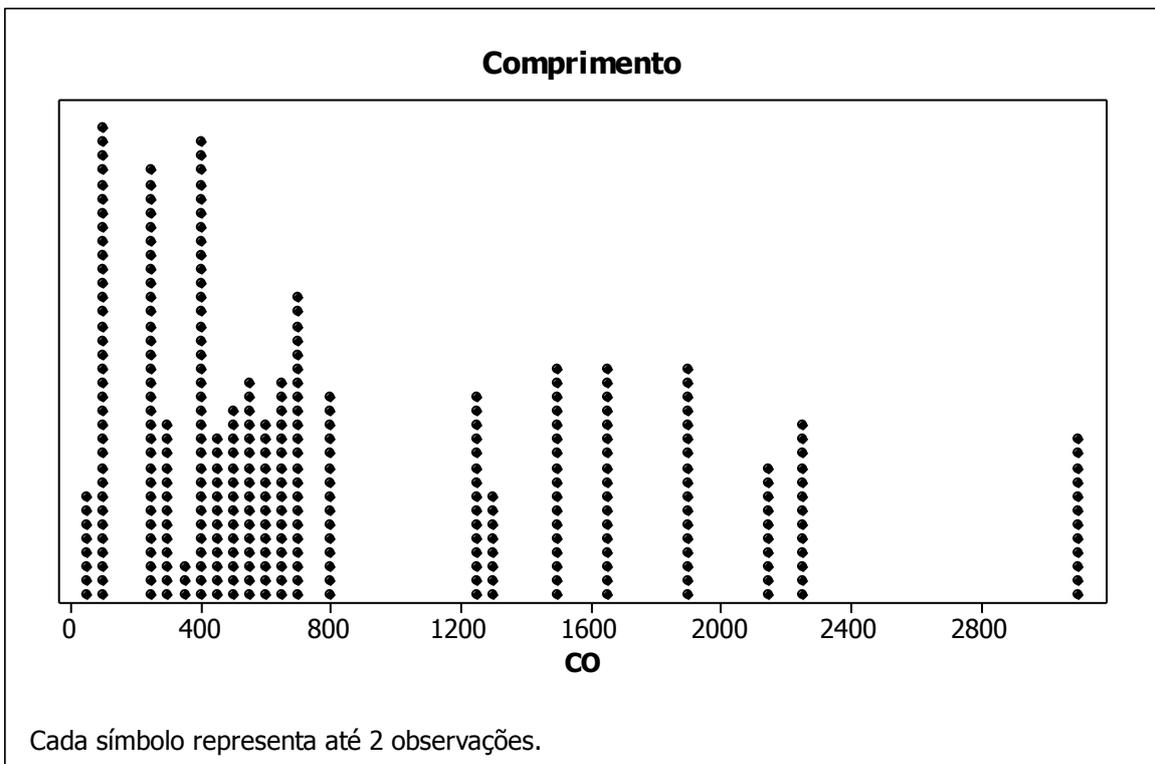
Analisando a Figura 4.14 pode-se observar que esta variável tem a concentração de valores entre 2.000.000 e 52.000.000 de toneladas, sendo o perfil de distribuição desta variável muito similar à da variável *DAC*, o que está condizente com a realidade, uma vez que com o passar do tempo, maior quantidade de minério é transportado pelas correias.

O perfil da variável da variável velocidade (*VE*) é apresentado na Figura 4.15. Observa-se que grande parte das amostras apresentam velocidade de 3,9 m/s, sendo que a maioria se encontra no intervalo entre 3,9 e 5,0 m/s.



**Figura 4.15:** Perfil da velocidade das correias

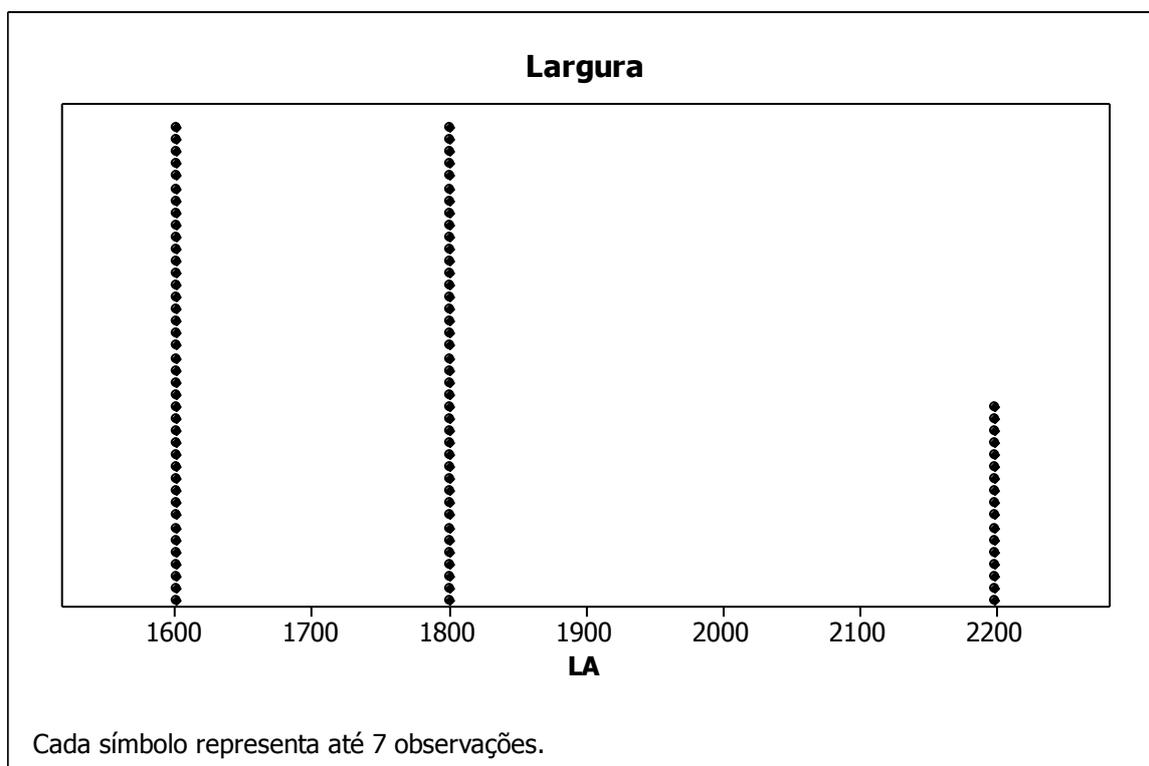
A Figura 4.16 retrata o perfil da variável comprimento (*CO*).



**Figura 4.16:** Perfil do comprimento das correias

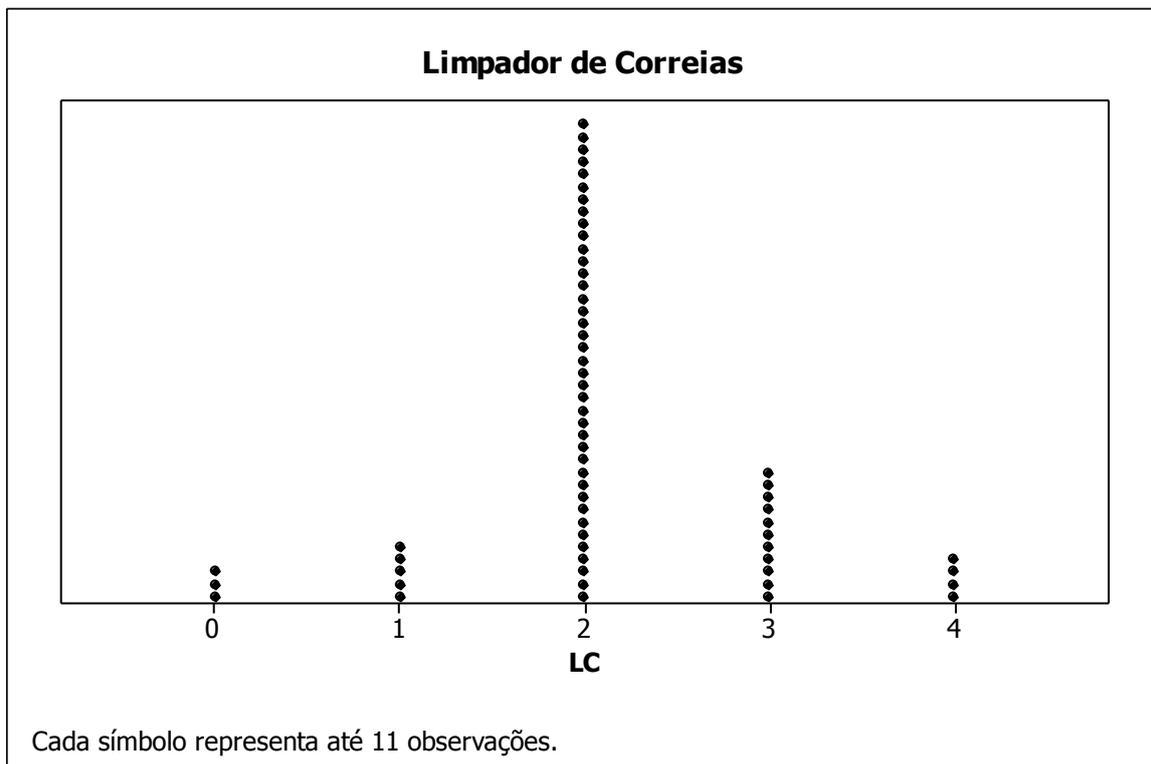
Pelo gráfico da Figura 4.16 pode-se verificar que a maior parte das amostras refere-se a correias com comprimento no intervalo de 50 a 800 m. É possível avaliar também que existe uma quantidade significativa com comprimento entre 1200 e 3200 m.

A variável largura da correia ( $LA$ ) tem seu perfil representado na Figura 4.17. Observam-se larguras concentradas nas medidas 1600 e 1800 mm, existindo também uma quantidade menor na largura de 2200 mm.



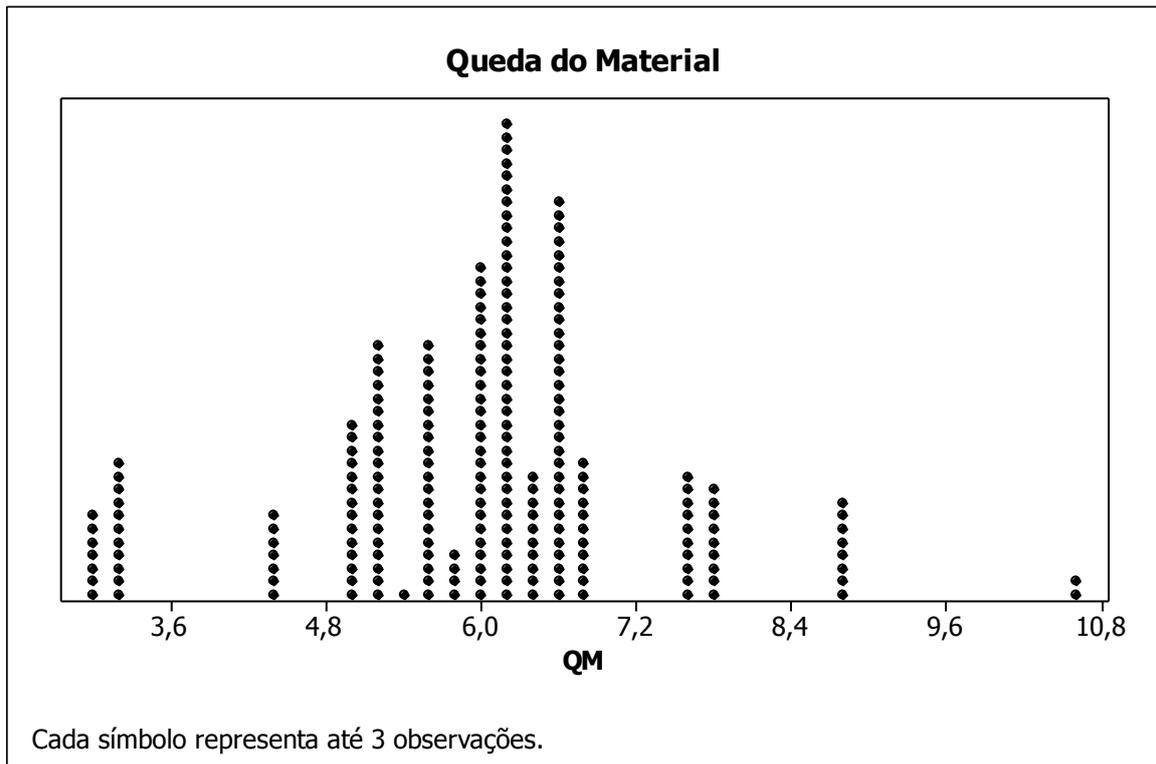
**Figura 4.17:** Perfil da largura das correias

A Figura 4.18 traz o perfil da variável limpador de correias ( $LC$ ). Nota-se que a maioria das amostras apresenta o valor 2 para a variável, ainda que existam também amostras com valores 3, 1, 4 e 0 (nesta ordem, em termos de incidência).



**Figura 4.18:** Perfil da variável Limpador de Correias

Por fim, a Figura 4.19 representa o perfil da distribuição da variável queda do material. Pode-se observar que a variável apresenta a maioria das observações entre 5,0 e 6,8 metros.



**Figura 4.19:** Perfil da variável Queda do Material

Após a realização da análise exploratória e avaliação de toda a base de dados, foram eliminados *outliers* e dados considerados inconsistentes, resultando em uma planilha com 626 observações e 14 variáveis. Da base original foram excluídos todos os dados referentes a três transportadores (TR131-16, TR131-01 e TR122-09), devido a erros nas medições de desgaste.

#### 4.7 Implementação do método quantitativo

Com os dados obtidos anteriormente foi possível implementar o método escolhido, a regressão múltipla. Para tanto, utilizou-se o software IBM SPSS *Statistics Version 20*.

A primeira etapa consistiu em lançar todos os dados e tentar obter um único modelo de regressão que representasse todos os transportadores. A metodologia utilizada foi a *backward*, onde primeiramente foram consideradas todas as variáveis no modelo e verificados os resultados considerando a significância de cada variável. A cada rodada da metodologia foram sendo retiradas as variáveis que apresentaram menor significância, considerando um valor limítrofe de significância  $Sig. \leq 0,05$  como critério de manutenção da variável no modelo. A Tabela 4.6 traz o resultado da primeira rodada.

Variável Dependente: *DMA*

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2158,653 <sup>a</sup>	9	239,850	105,622	0,000
<i>Intercepto</i>	15,031	1	15,031	6,619	0,010
<i>DAC</i>	148,309	1	148,309	65,311	0,000
<i>PRA</i>	57,290	1	57,290	25,229	0,000
<i>VE</i>	113,433	1	113,433	49,952	0,000
<i>CO</i>	116,228	1	116,228	51,183	0,000
<i>LA</i>	12,104	1	12,104	5,330	0,021
<i>M1</i>	0,865	1	0,865	0,381	0,537
<i>M2</i>	18,141	1	18,141	7,989	0,005
<i>LC</i>	10,867	1	10,867	4,785	0,029
<i>QM</i>	106,990	1	106,990	47,115	0,000
Erro	1432,891	631	2,271		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,601 (R-Quadrado Ajustado = 0,595)

**Tabela 4.6:** Resultados para primeira rodada da seleção *backward*

Avaliando as significâncias na Tabela 4.6, verificou-se que nesta primeira rodada a variável M1 apresentou  $Sig. > 0,05$ , sendo assim eliminada do modelo. A Tabela 4.7 traz os resultados de significância dos termos do modelo após a exclusão da variável.

Variável Dependente: *DMA*

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2157,787 <sup>a</sup>	8,000	269,723	118,894	0,000
Intercepto	14,223	1,000	14,223	6,269	0,013
<i>DAC</i>	153,366	1,000	153,366	67,604	0,000
<i>PRA</i>	56,439	1,000	56,439	24,878	0,000
<i>VE</i>	113,789	1,000	113,789	50,158	0,000
<i>CO</i>	124,875	1,000	124,875	55,045	0,000
<i>LA</i>	11,354	1,000	11,354	5,005	0,026
<i>M2</i>	17,911	1,000	17,911	7,895	0,005
<i>LC</i>	10,010	1,000	10,010	4,413	0,036
<i>QM</i>	106,424	1,000	106,424	46,912	0,000
Erro	1433,756	632,000	2,269		
Total	16625,850	641,000			
Total Corrigido	3591,544	640,000			

a. R-Quadrado = 0,601 (R-Quadrado Ajustado = 0,595)

**Tabela 4.7:** Resultado da modelagem após eliminação da variável *M1*

Analisando a Tabela 4.7, verifica-se que nenhuma variável apresenta *Sig.* > 0,05; desta forma, pode-se então considerar este resultado como o final. A partir desta análise, tem-se então os parâmetros para cada variável (Tabela 4.8).

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: *DMA*

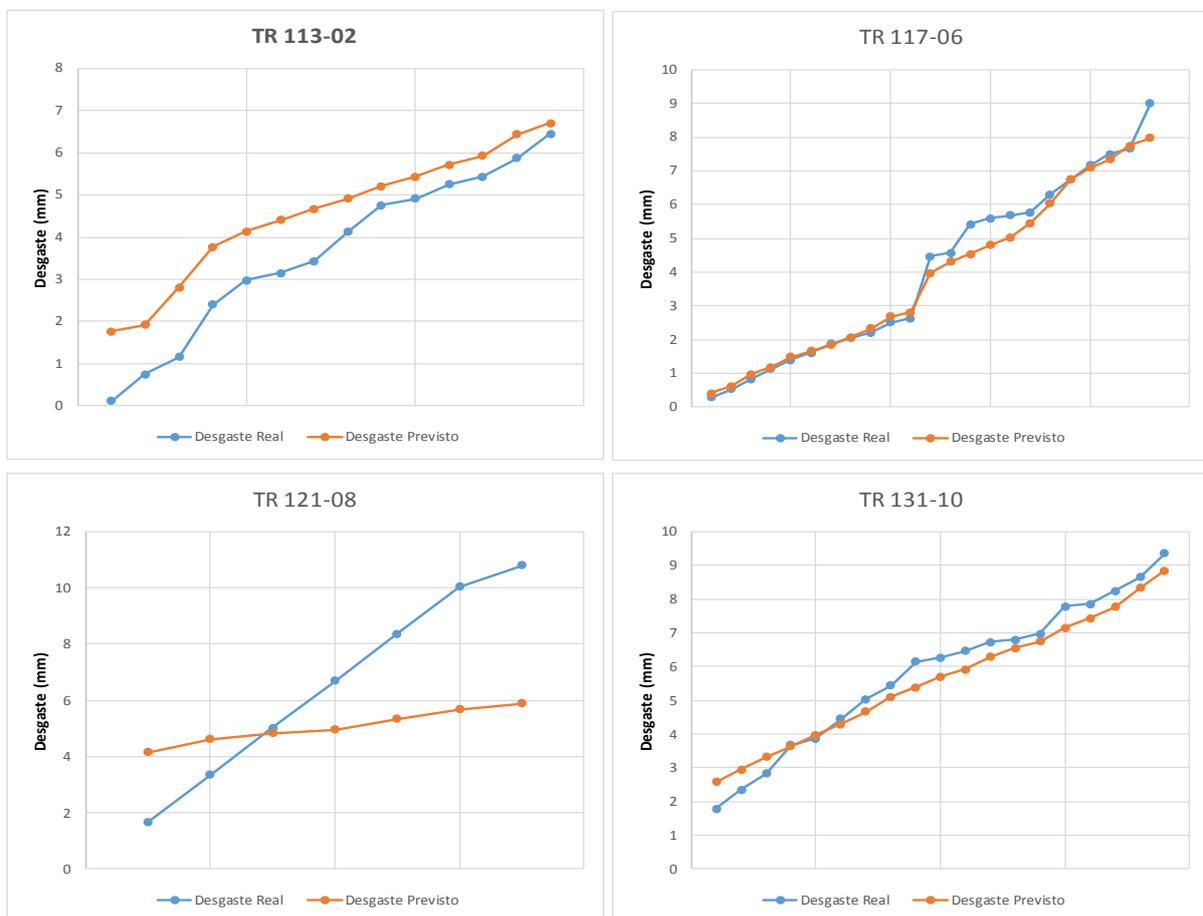
Parâmetro	<i>B</i>	Erro Padrão	<i>t</i>	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	2,370	0,946	2,504	0,013	0,511	4,228
<i>DAC</i>	0,005	0,001	8,222	0,000	0,004	0,007
<i>PRA</i>	3,350E-08	6,716E-09	4,988	0,000	2,031E-08	4,669E-08
<i>VE</i>	0,895	0,126	7,082	0,000	0,647	1,143
<i>CO</i>	-0,001	9,939E-05	-7,419	0,000	-0,001	-0,001
<i>LA</i>	-0,001	0,000	-2,237	0,026	-0,002	0,000
<i>M2</i>	-0,692	0,246	-2,810	0,005	-1,176	-0,208
<i>LC</i>	0,311	0,148	2,101	0,036	0,020	0,601
<i>QM</i>	-0,398	0,058	-6,849	0,000	-0,512	-0,284

**Tabela 4.8:** Estimativa dos parâmetros do modelo

Ao término do processo de seleção de variáveis descrito acima, obteve-se o modelo de regressão na eq. (56).

$$DMA = 2,370 + 0,005DAC + 3,350 \times 10^{-8}PRA + 0,895VE - 0,001CO - 0,001LA - 0,692M2 + 0,311LC - 0,398QM \quad (56)$$

Apesar dos termos na eq. (56) serem estatisticamente significativos, o valor de  $R^2$  do modelo resultante foi de 0,601, que pode ser considerado baixo para representar de modo assertivo o comportamento de degradação das correias. Isto pode ser melhor retratado na Figura 4.20, onde se tem o comparativo do desgaste real com o previsto pelo modelo para algumas correias.



**Figura 4.20:** Gráficos comparativos entre desgaste real e desgaste previsto pelo modelo

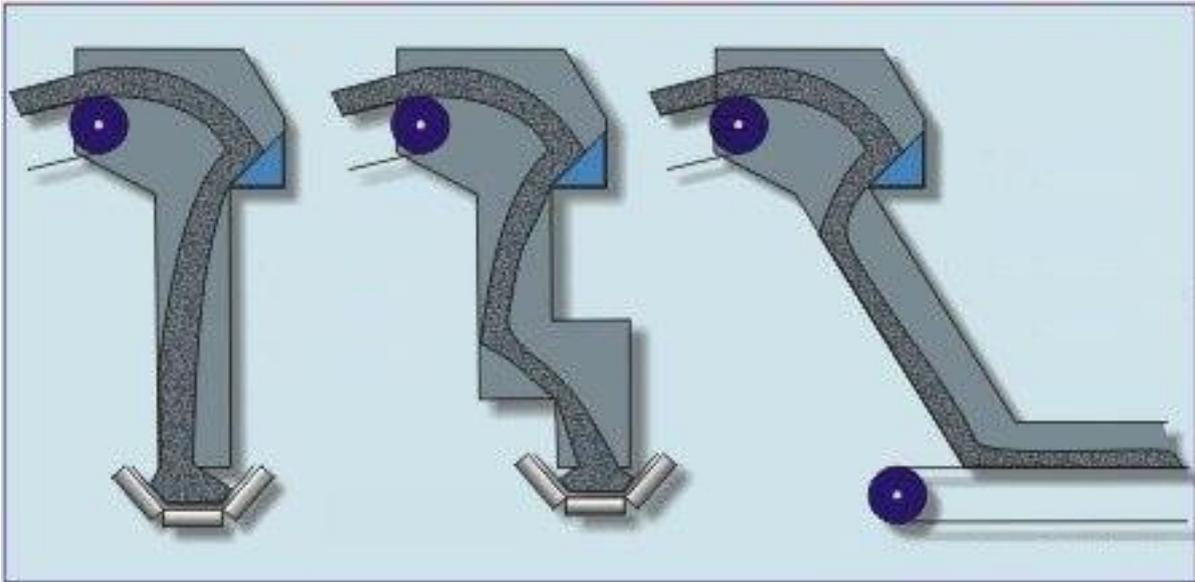
Analisando os gráficos da Figura 4.20, pode-se verificar que para a correia TR117-06 o modelo tem uma boa representatividade; em contrapartida, a previsão do desgaste da correia TR121-08 é pouco representativa da realidade.

O modelo, mesmo apresentando pouca assertividade para algumas correias, permite avaliar o comportamento das variáveis em relação ao desgaste e comparar com o resultado do GF. Dessa forma pode-se observar que quanto maior a variável *DAC*, maior será o desgaste da correia. Esta variável não foi diretamente abordada pelo GF, mas sim a taxa de alimentação, a qual não se utilizou, conforme explicado na seção 4.6. De toda forma, o impacto de *DAC* é coerente com a avaliação do GF, pois quanto maior o intervalo de tempo, maior será a produção transportada e conseqüentemente o desgaste.

Raciocínio semelhante pode ser feito em relação à variável *PRA* (produção acumulada), que apresenta o mesmo comportamento que *DAC*, ou seja, quanto maior a produção, maior o desgaste, também coerente com a análise do GF. As variáveis *VE* e *LC* têm comportamento similar às variáveis comentadas anteriormente: quanto maior a velocidade ou a quantidade de raspadores (limpadores de correias), maior será o impacto no desgaste das correias, resultado este alinhado à avaliação do GF e literatura.

Já as variáveis *CO* e *LA* apresentam resultados opostos as variáveis *DAC*, *PRA*, *VE* e *LC*; quanto maior o comprimento ou largura da correia, menor será o desgaste, o que também coincide com a avaliação do GF. Já a variável *dummy M2* também está coerente, pois sua presença indica, nestes casos, materiais com granulometria abaixo de 11 mm (a menor dos casos estudados), que pela avaliação feita pelo GF apresenta menor desgaste, sendo este o seu impacto no modelo.

A única divergência é a variável *QM*, que pelo modelo apresenta comportamento inverso ao esperado pelo GF, sendo seu impacto inversamente proporcional à altura total de queda. Uma possível explicação pode ser dada devido ao fato dos dados representarem apenas a diferença de altura entre a descarga de uma correia e o recebimento da outra. Na prática, a maioria dos *chutes* das correias apresentam anteparos internos que interferem no fluxo e na velocidade de queda do material (Figura 4.21). Este fato pode acabar alterando significativamente a forma como ocorre a queda do material.



**Figura 4.21:** Diferentes formas do fluxo de material em chutes de transferência (adaptado de Rozentals (1991))

A baixa aderência do modelo aos dados pode ser explicada pela ausência de termos de interação e de termos quadráticos na equação de regressão. Com base nestes resultados, o modelo não pode ser considerado apropriado, sendo necessário testar um modelo onde interações e efeitos quadráticos estejam presentes.

A escolha das interações será baseada na existência de significado físico para as mesmas, ou seja, somente serão avaliadas aquelas que tiverem uma lógica que justifique sua existência. A Tabela 4.9 apresenta as interações e efeitos quadráticos que foram testados a partir das considerações feitas anteriormente.

Variável	Efeito Quadrático	Interação	
DAC	PRA <sup>2</sup>	DAC × PRA	
		DAC × VE	
PRA		DAC × VE <sup>2</sup>	
		DAC × PRA <sup>2</sup>	
VE		PRA × VE	
		PRA × CO	
CO		PRA × LA	
		PRA × LC	
LA		VE <sup>2</sup>	PRA × QM
			PRA × VE <sup>2</sup>
M1			VE × LA
			VE × LC
M2	VE × QM		
LC	VE × VE <sup>2</sup> (VE <sup>3</sup> )		
	VE × PRA <sup>2</sup>		
QM			

**Tabela 4.9:** Variáveis, efeitos quadráticos e interações utilizadas

A Tabela 4.10 apresenta os resultados da primeira rodada da seleção *backward* considerando os dados da Tabela 4.9.

Variável Dependente: *DMA*

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2695,257 <sup>a</sup>	26	103,664	71,015	0,000
Intercepto	2,901	1	2,901	1,988	0,159
<i>DAC</i>	10,381	1	10,381	7,111	0,008
<i>PRA</i>	5,072	1	5,072	3,474	0,063
<i>VE</i>	3,900	1	3,900	2,672	0,103
<i>CO</i>	68,176	1	68,176	46,704	0,000
<i>LA</i>	0,272	1	0,272	0,186	0,666
<i>M1</i>	32,421	1	32,421	22,210	0,000
<i>M2</i>	1,025	1	1,025	0,702	0,402
<i>LC</i>	111,779	1	111,779	76,574	0,000
<i>QM</i>	7,864	1	7,864	5,387	0,021
<i>VE</i> <sup>2</sup>	3,609	1	3,609	2,473	0,116
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,987	1	0,987	0,676	0,411
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,576	1	3,576	2,450	0,118
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	8,524	1	8,524	5,839	0,016
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	9,176	1	9,176	6,286	0,012
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	7,339	1	7,339	5,027	0,025
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	3,657	1	3,657	2,506	0,114
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	8,303	1	8,303	5,688	0,017
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	24,923	1	24,923	17,073	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	2,561	1	2,561	1,754	0,186
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	78,981	1	78,981	54,106	0,000
<i>PRA</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	1,384	1	1,384	0,948	0,331
<i>VE</i> × <i>LA</i>	2,192	1	2,192	1,501	0,221
<i>VE</i> × <i>LC</i>	114,509	1	114,509	78,444	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	5,514	1	5,514	3,777	0,052
<i>VE</i> <sup>3</sup>	17,453	1	17,453	11,956	0,001
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,019	1	4,019	2,753	0,098
Erro	896,287	614	1,460		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,750 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

**Tabela 4.10:** Resultados para primeira rodada após inclusão dos efeitos quadráticos e interações

Pelos resultados da Tabela 4.10, verifica-se que houve uma melhora sensível em relação ao  $R^2$ ; entretanto, diversas variáveis apresentaram  $Sig. > 0,05$ , mostrando a necessidade de novas rodadas para eliminação das mesmas, conforme descrito na seção 4.6. As Tabelas 4.11 e 4.12, trazem os resultados finais após a execução deste processo, incluindo os parâmetros obtidos (ver Apêndice A para detalhamento do passo a passo).

Variável Dependente: *DMA*

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2682,842 <sup>a</sup>	20	134,142	91,524	0,000
Intercepto	26,609	1	26,609	18,155	0,000
<i>DAC</i>	17,758	1	17,758	12,116	0,001
<i>PRA</i>	15,940	1	15,940	10,876	0,001
<i>VE</i>	27,414	1	27,414	18,704	0,000
<i>CO</i>	97,221	1	97,221	66,333	0,000
<i>M1</i>	38,293	1	38,293	26,127	0,000
<i>LC</i>	157,127	1	157,127	107,206	0,000
<i>QM</i>	8,626	1	8,626	5,885	0,016
<i>VE</i> <sup>2</sup>	16,858	1	16,858	11,502	0,001
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	12,773	1	12,773	8,715	0,003
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	11,142	1	11,142	7,602	0,006
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	15,644	1	15,644	10,674	0,001
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	17,821	1	17,821	12,159	0,001
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	10,830	1	10,830	7,389	0,007
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	53,501	1	53,501	36,503	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	8,568	1	8,568	5,846	0,016
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	74,646	1	74,646	50,931	0,000
<i>VE</i> × <i>LA</i>	82,781	1	82,781	56,481	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	167,225	1	167,225	114,096	0,000
<i>VE</i> <sup>3</sup>	62,459	1	62,459	42,615	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	53,648	1	53,648	36,604	0,000
Erro	908,702	620	1,466		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,747 (R-Quadrado Ajustado = 0,739)

**Tabela 4.11:** Resultados finais após inclusão dos efeitos quadráticos e interações

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: *DMA*

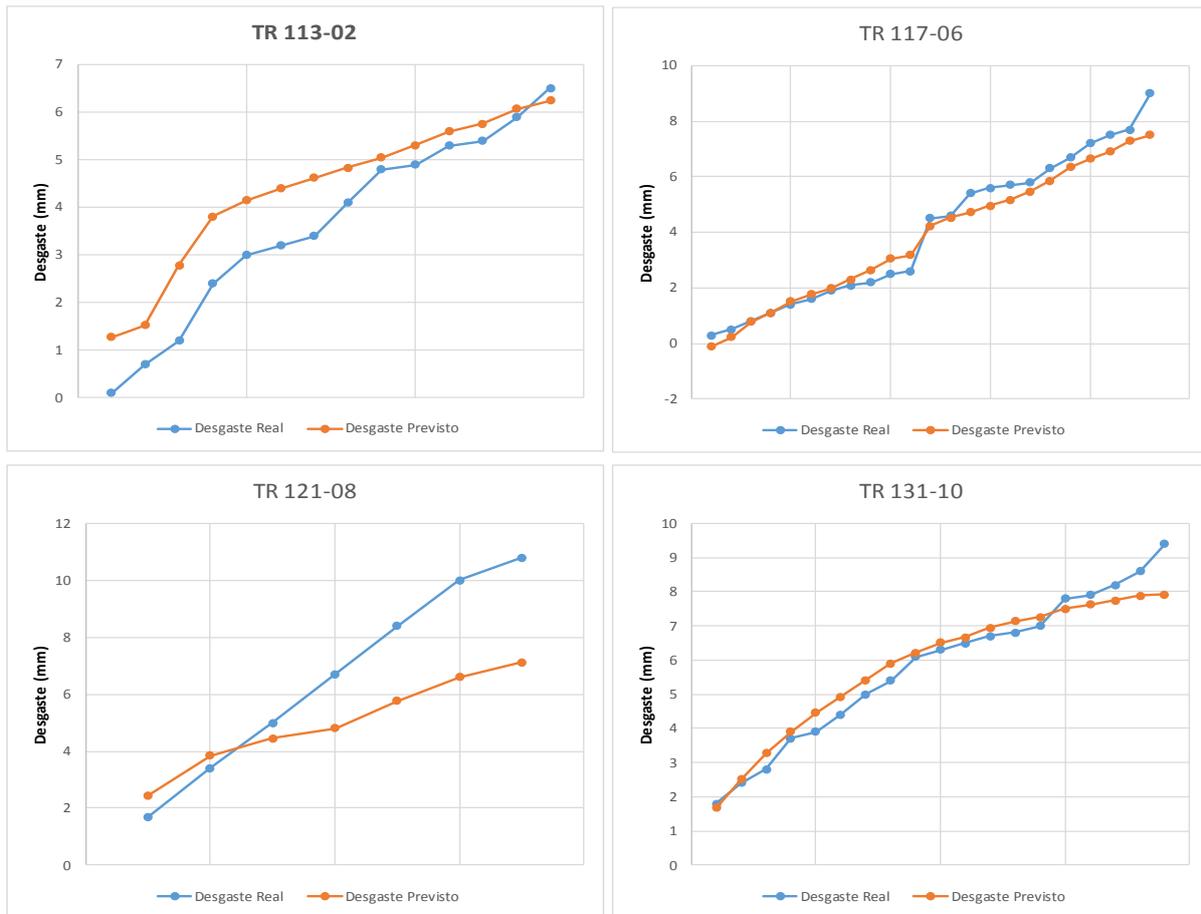
Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-8,076	1,895	-4,261	0,000	-11,798	-4,354
<i>DAC</i>	0,041	0,012	3,481	0,001	0,018	0,064
<i>PRA</i>	-3,154E-07	9,565E-08	-3,298	0,001	-5,033E-07	0,000
<i>VE</i>	3,802	0,879	4,325	0,000	2,075	5,528
<i>CO</i>	-0,001	0,000	-8,145	0,000	-0,001	-0,001
<i>M1</i>	-1,234	0,241	-5,111	0,000	-1,708	-0,760
<i>LC</i>	11,112	1,073	10,354	0,000	9,004	13,220
<i>QM</i>	0,179	0,074	2,426	0,016	0,034	0,324
<i>VE</i> <sup>2</sup>	-0,659	0,194	-3,391	0,001	-1,041	-0,277
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	-0,016	0,005	-2,952	0,003	-0,026	-0,005
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	0,002	0,001	2,757	0,006	0,001	0,003
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	5,924E-19	1,813E-19	3,267	0,001	2,363E-19	9,485E-19
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	6,970E-08	1,999E-08	3,487	0,001	3,045E-08	1,090E-07
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	9,256E-12	3,405E-12	2,718	0,007	2,569E-12	1,594E-11
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	9,974E-11	1,651E-11	6,042	0,000	6,732E-11	1,322E-10
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	1,431E-08	5,917E-09	2,418	0,016	2,687E-09	2,593E-08
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	-1,744E-08	2,443E-09	-7,137	0,000	-2,224E-08	-1,264E-08
<i>VE</i> × <i>LA</i>	-0,001	0,000	-7,515	0,000	-0,001	-0,001
<i>VE</i> × <i>LC</i>	-2,662	0,249	-10,682	0,000	-3,151	-2,172
<i>VE</i> <sup>3</sup>	0,157	0,024	6,528	0,000	0,110	0,204
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	-3,565E-16	5,893E-17	-6,050	0,000	-4,722E-16	-2,408E-16

**Tabela 4.12:** Estimativa dos parâmetros do modelo

A partir dos dados obtidos na Tabela 4.12, obteve-se o modelo de regressão na eq. (57).

$$\begin{aligned}
 DMA = & -8,076 + 0,041DAC - 3,154 \times 10^{-7}PRA + 3,802VE - 0,001CO - 1,234M1 + \\
 & 11,112LC + 0,179QM - 0659VE^2 - 0,016DAC \times VE + 0,002DAC \times VE^2 + 5,924 \times \\
 & 10^{-19}DAC \times PRA^2 + 6,970 \times 10^{-8}PRA \times VE + 9,256 \times 10^{-12}PRA \times CO + 9,974 \times \\
 & 10^{-11}PRA \times LA + 1,431 \times 10^{-8}PRA \times LC - 1,744 \times 10^{-8}PRA \times QM - 0,001VE \times LA - \\
 & 2,662VE \times LC + 0,157VE^3 - 3,565 \times 10^{-16}VE \times PRA^2
 \end{aligned} \tag{57}$$

Para esta situação, obteve-se  $R^2 = 0,747$ , superior ao primeiro caso, onde não se trabalhou com efeitos quadráticos ou interações. A melhora significativa no ajuste do modelo pode ser melhor visualizada na Figura 4.22, onde apresentam-se 4 gráficos confrontando valores reais e previstos de desgaste médio acumulado (*DMA*), considerando o modelo da eq. (54), para os TR's 113-02, 117-06, 121-08 e 131-10.



**Figura 4.22:** Gráficos comparativos entre desgaste real e desgaste previsto pelo modelo da eq. (57)

Analisando os gráficos da Figura 4.22, observa-se uma boa aderência do modelo para os TR's 117-06 e 131-10, e previsões que comportam melhorias no caso do TR 121-08. Desta forma, pode-se dizer que um modelo global para representar o *DMA* de todas as correias não é ideal, uma vez que as mesmas são distintas em termos de desgaste, sendo que algumas são dominantes em função de fatores que acabam tendo maior peso ou devido à magnitude do desgaste ser diferente entre elas (as Figuras 4.23 e 4.24 trazem os gráficos comparativos do desgaste acumulado pela produção acumulada e pelo número de dias acumulados, para cada transportador, evidenciando este fato).

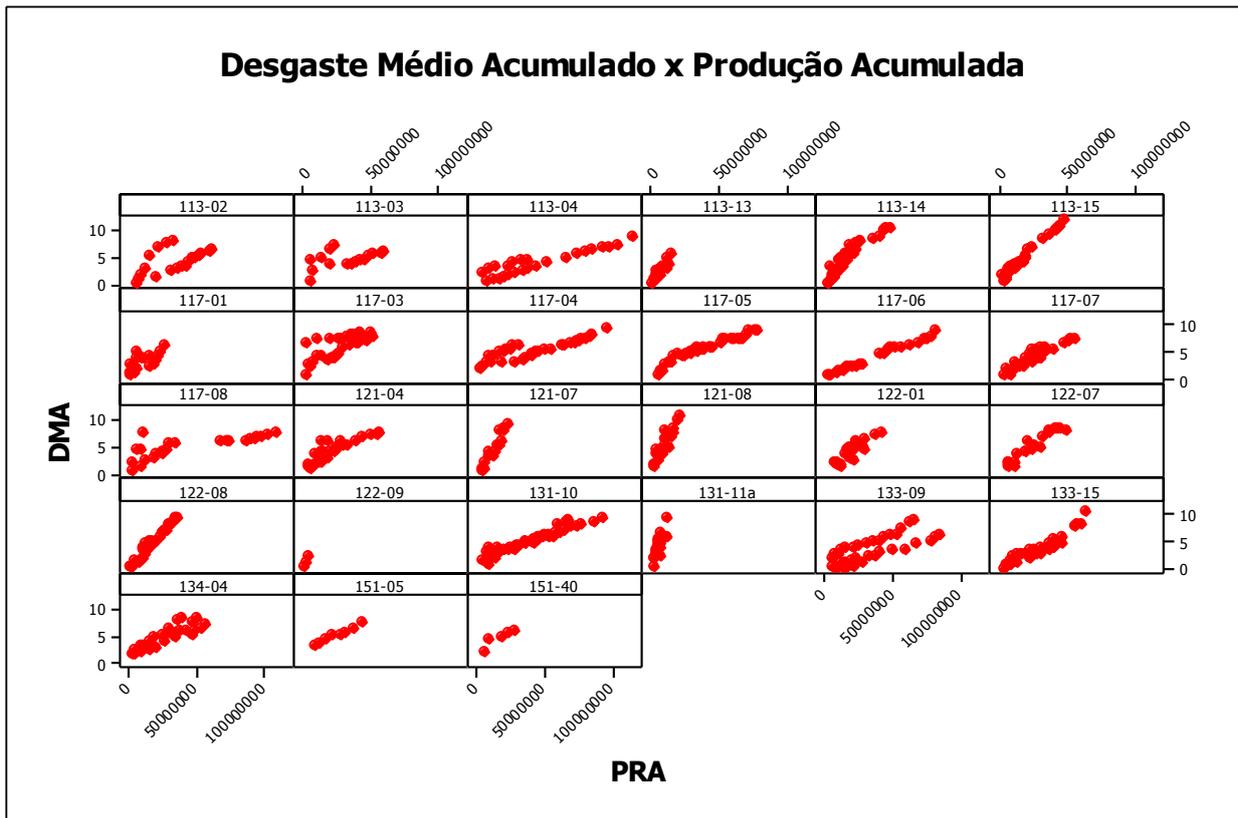


Figura 4.23: Gráficos comparativos  $DMA \times PRA$

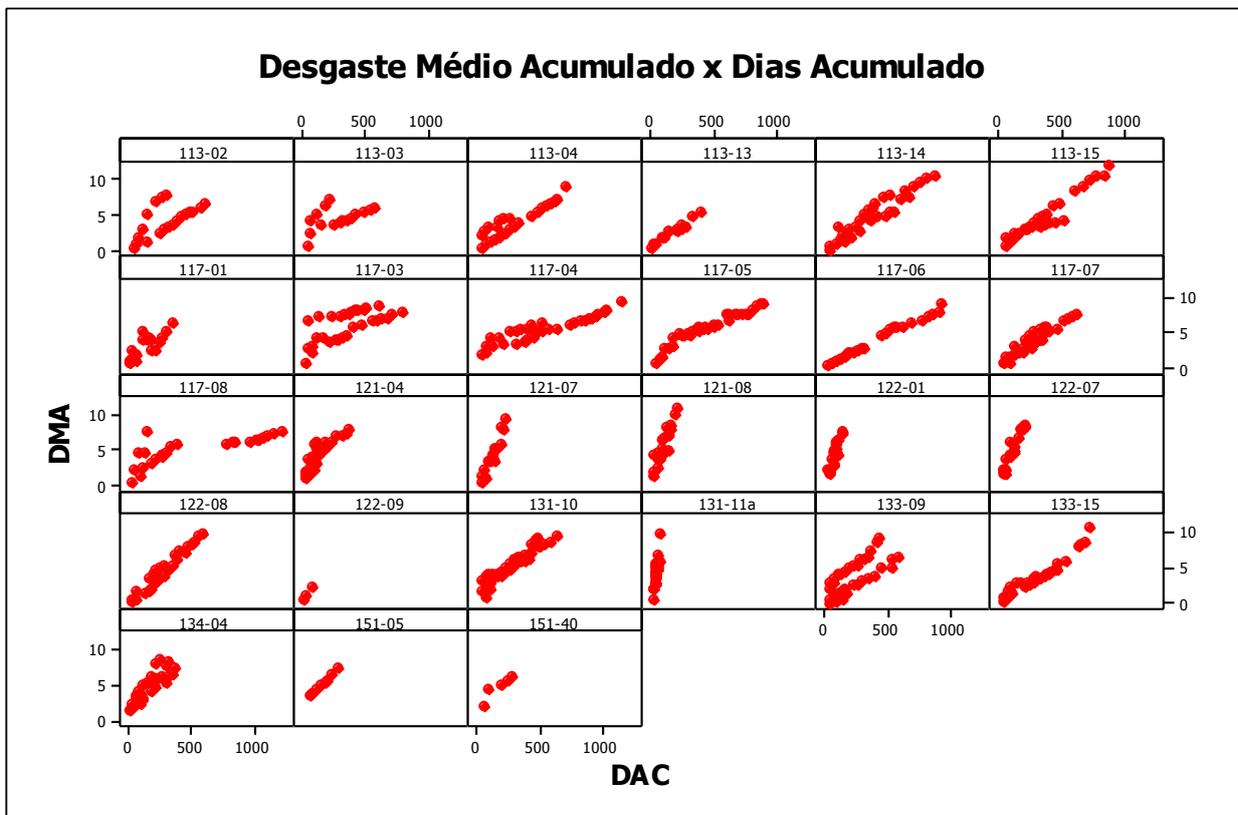


Figura 4.24: Gráficos comparativos  $DMA \times DAC$

Analisando os gráficos das Figuras 4.22 e 4.24, fica clara a diferença de magnitude do desgaste entre as diferentes correias. Nesta situação, modelos individuais (ou de correias submetidas a situações similares) provavelmente serão mais indicados e terão resultados mais adequados.

Considerando as observações feitas anteriormente, foram elaborados modelos de regressão para cada correia, sendo detalhado, a título de ilustração, o procedimento para o TR 131-10 (ver Apêndice B para detalhamento da análise do restante das correias). As Tabelas 4.13 e 4.14 mostram os resultados obtidos para este transportador.

Variável Dependente: *DMA*

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	168,441 <sup>a</sup>	3	56,147	153,660	0,000
Intercepto	14,827	1	14,827	40,578	0,000
<i>PRA</i>	15,508	1	15,508	42,442	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,931	1	1,931	5,283	0,027
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,923	1	1,923	5,262	0,027
Erro	14,251	39	0,365		
Total	1384,210	43			
Total Corrigido	182,692	42			

a. R-Quadrado = 0,922 (R-Quadrado Ajustado = 0,916)

**Tabela 4.13:** Resultados finais para TR131-10

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: *DMA*

Parâmetro	<i>B</i>	Erro Padrão	<i>t</i>	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	1,764	,277	6,370	0,000	1,204	2,324
<i>PRA</i>	9,372E-08	1,439E-08	6,515	0,000	6,462E-08	1,228E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-2,759E-15	1,200E-15	-2,299	0,027	-5,188E-15	-3,312E-16
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,832E-10	1,670E-10	2,294	0,027	4,529E-11	7,211E-10

**Tabela 4.14:** Estimativa dos parâmetros do modelo para TR131-10

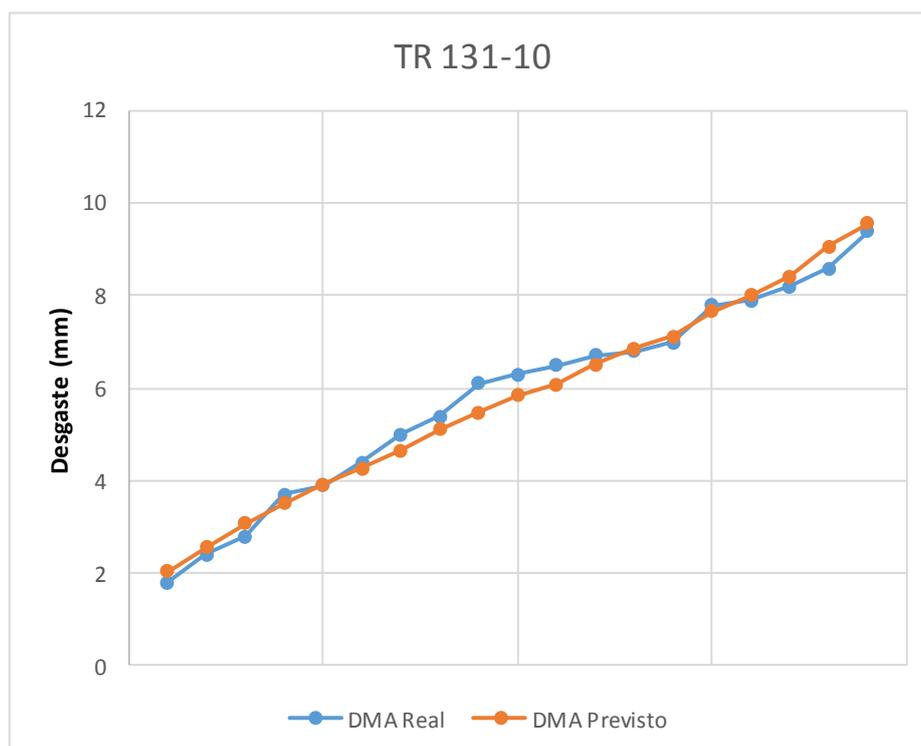
Verifica-se que ao se adotar um modelo individual, o ajuste melhora consideravelmente, obtendo-se um  $R^2 = 0,922$ . O modelo se torna mais enxuto, uma vez que apenas as variáveis *PRA*, *PRA*<sup>2</sup> e *DAC* × *PRA* aparecem como significativas. É importante ressaltar que as variáveis *VE*, *CO*, *LA*, *M1*, *M2*, *LC* e *QM* apresentam valores fixos para cada transportador

(conforme descrito na seção 4.4), não sendo consideradas nos modelos. A eq. (58) apresenta o modelo obtido.

$$DMA = 1,764 + 9,372 \times 10^{-8}PRA - 2,759 \times 10^{-15}PRA^2 + 3,832 \times 10^{-10}DAC \times PRA \quad (58)$$

Um ponto de observação em relação à eq. (58) é a magnitude dos coeficientes, que se apresenta com valores muito pequenos. Isto ocorre pois a variável *PRA* que representa a produção acumulada no período de observação têm valores muito altos (pode-se ver na Tabela 4.5 alguns exemplos onde os valores dessa variável chegam a atingir quase  $50 \times 10^6$  toneladas), além disso, o desgaste médio acumulado (*DMA*) tem diferenças pequenas entre uma observação e a subsequente (na Tabela 4.5 verifica-se casos com diferença de apenas 0,1 mm).

A Figura 4.25 traz o gráfico comparativo entre os valores de *DMA* real e previstos pelo modelo da eq. (58).



**Figura 4.25:** Gráfico comparativo entre *DMA* real e previsto pelo modelo da eq. (58)

Observando-se a Figura 4.25, verifica-se que existe uma boa aderência entre os valores reais e previstos para o desgaste médio acumulado, o que reforça a necessidade de se elaborar modelos individuais para os TRs.

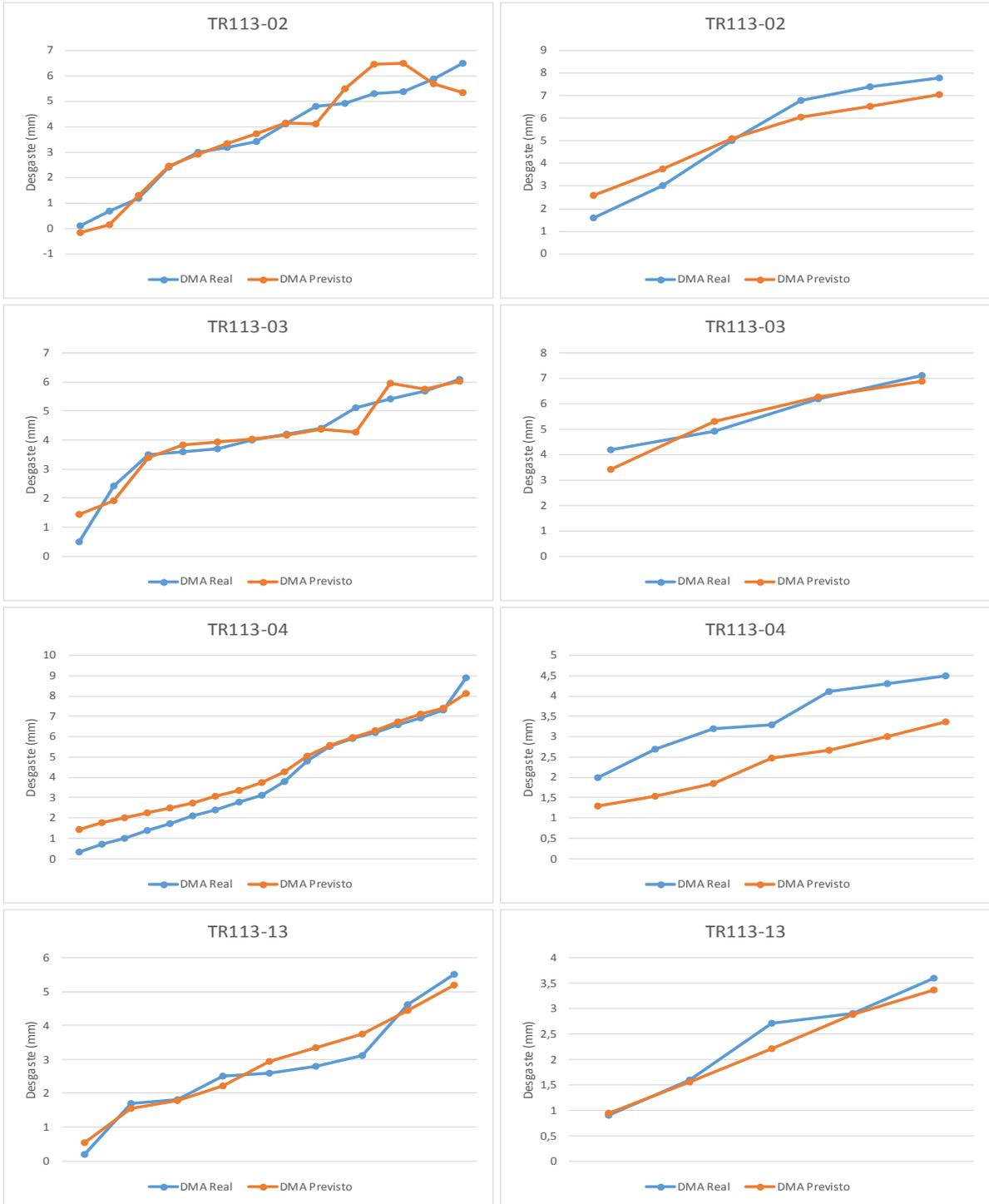
A Tabela 4.18 apresenta as equações obtidas que representam os modelos de regressão e os valores de  $R^2$  para cada correia, com exceção do TR151-40 que não dispunha de observações suficientes para a modelagem (o detalhamento da modelagem das correias pode ser encontrado no Apêndice B).

TR	Equação do Modelo Individual	$R^2$
113-02	$DMA = -1,318 + 0,117DAC - 6,542 \times 10^{-7}PRA - 6,088 \times 10^{-10}DAC \times PRA$	0,908
113-03	$DMA = -0,648 + 0,114DAC - 4,401 \times 10^{-7}PRA - 1,640 \times 10^{-9}DAC \times PRA + 1,165 \times 10^{-17}DAC \times PRA^2$	0,921
113-04	$DMA = 1,069 + 6,140 \times 10^{-8}PRA$	0,863
113-13	$DMA = 0,483 + 0,012DAC$	0,945
113-14	$DMA = -0,260 + 0,006DAC + 2,067 \times 10^{-7}PRA - 2,349 \times 10^{-18}DAC \times PRA^2$	0,967
113-15	$DMA = 0,308 + 0,013DAC + 1,397 \times 10^{-14}PRA^2 - 7,700 \times 10^{-10}DAC \times PRA$	0,983
117-01	$DMA = -0,038 + 0,133DAC - 1,16 \times 10^{-6}PRA + 9,837 \times 10^{-14}PRA^2 - 1,131 \times 10^{-8}DAC \times PRA + 1,078 \times 10^{-16}DAC \times PRA^2$	0,898
117-03	$DMA = 1,573 + 1,204 \times 10^{-7}PRA$	0,925
117-04	$DMA = 2,155 + 0,031DAC - 3,150 \times 10^{-7}PRA + 6,234 \times 10^{-15}PRA^2 - 5,028 \times 10^{-10}DAC \times PRA$	0,960
117-05	$DMA = -0,336 + 3,057 \times 10^{-7}PRA - 5,251 \times 10^{-15}PRA^2 + 3,233 \times 10^{-18}DAC \times PRA^2$	0,972
117-06	$DMA = 0,434 - 0,077DAC + 9,786 \times 10^{-7}PRA - 1,590 \times 10^{-14}PRA^2 + 1,383 \times 10^{-9}DAC \times PRA$	0,994
117-07	$DMA = 0,413 + 0,038DAC - 2,980 \times 10^{-7}PRA$	0,907
117-08	$DMA = 0,703 + 0,115DAC - 1,039 \times 10^{-6}PRA + 1,342 \times 10^{-14}PRA^2 - 1,559 \times 10^{-9}DAC \times PRA + 1,949 \times 10^{-18}DAC \times PRA^2$	0,950
121-04	$DMA = 0,384 + 2,220 \times 10^{-7}PRA - 1,760 \times 10^{-15}PRA^2$	0,812
121-07	$DMA = -0,989 + 0,042DAC$	0,929
121-08	$DMA = 1,272 + 0,043DAC$	0,858
122-01	$DMA = 0,435 + 0,051DAC$	0,839
122-07	$DMA = 0,575 + 0,038DAC$	0,938
122-08	$DMA = -0,455 - 0,075DAC + 1,735 \times 10^{-6}PRA - 5,191 \times 10^{-14}PRA^2 + 2,237 \times 10^{-9}DAC \times PRA + 1,541 \times 10^{-17}DAC \times PRA^2$	0,977
131-10	$DMA = 1,764 + 9,372 \times 10^{-8}PRA - 2,759 \times 10^{-15}PRA^2 + 3,832 \times 10^{-10}DAC \times PRA$	0,922
131-11a	$DMA = -1,247 + 2,076 \times 10^{-6}PRA - 2,840 \times 10^{-13}PRA^2 + 2,470 \times 10^{-15}DAC \times PRA^2$	0,822
133-09	$DMA = 1,453 + 1,577 \times 10^{-14}PRA^2 - 1,941 \times 10^{-9}DAC \times PRA - 3,635 \times 10^{-18}DAC \times PRA^2$	0,777
133-15	$DMA = -0,147 + 0,23DAC - 5,805 \times 10^{-10}DAC \times PRA + 7,066 \times 10^{-18}DAC \times PRA^2$	0,980
134-04	$DMA = 0,756 + 2,058 \times 10^{-7}PRA - 2,394 \times 10^{-10}DAC \times PRA$	0,808
151-05	$DMA = 3,129 - 2,134 \times 10^{-14}PRA^2 + 3,631 \times 10^{-9}DAC \times PRA$	0,996
$R^2$ médio		<b>0,914</b>

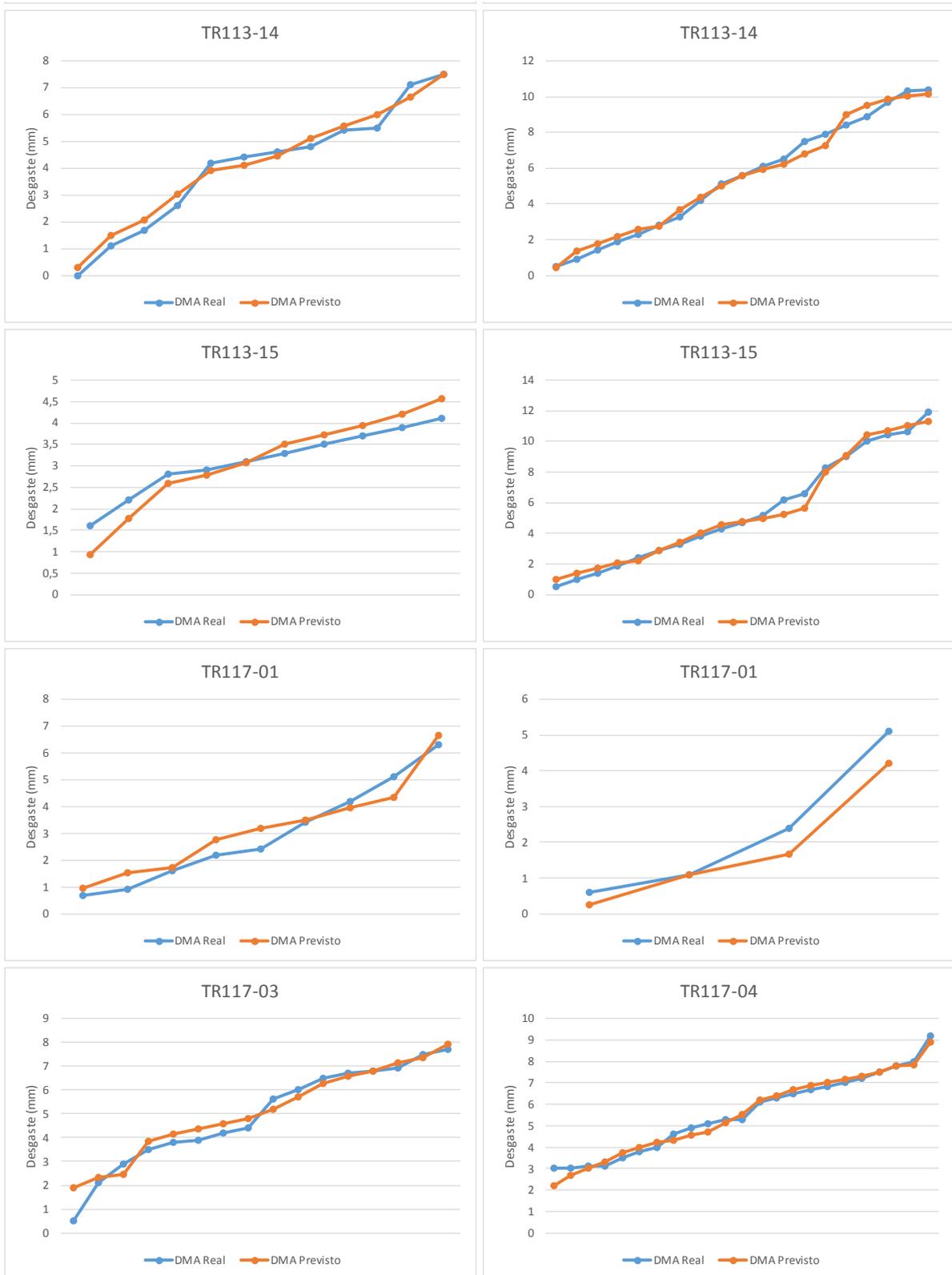
**Tabela 4.15:** Modelos de regressão e  $R^2$  para cada correia

Pela análise da Tabela 4.15 pode-se verificar que de um modo geral, os modelos individuais apresentam ajustes superiores aos modelos globais obtidos anteriormente, apresentando valores de  $R^2$  que variam de 0,777 à 0,996, obtendo-se um valor médio de 0,914.

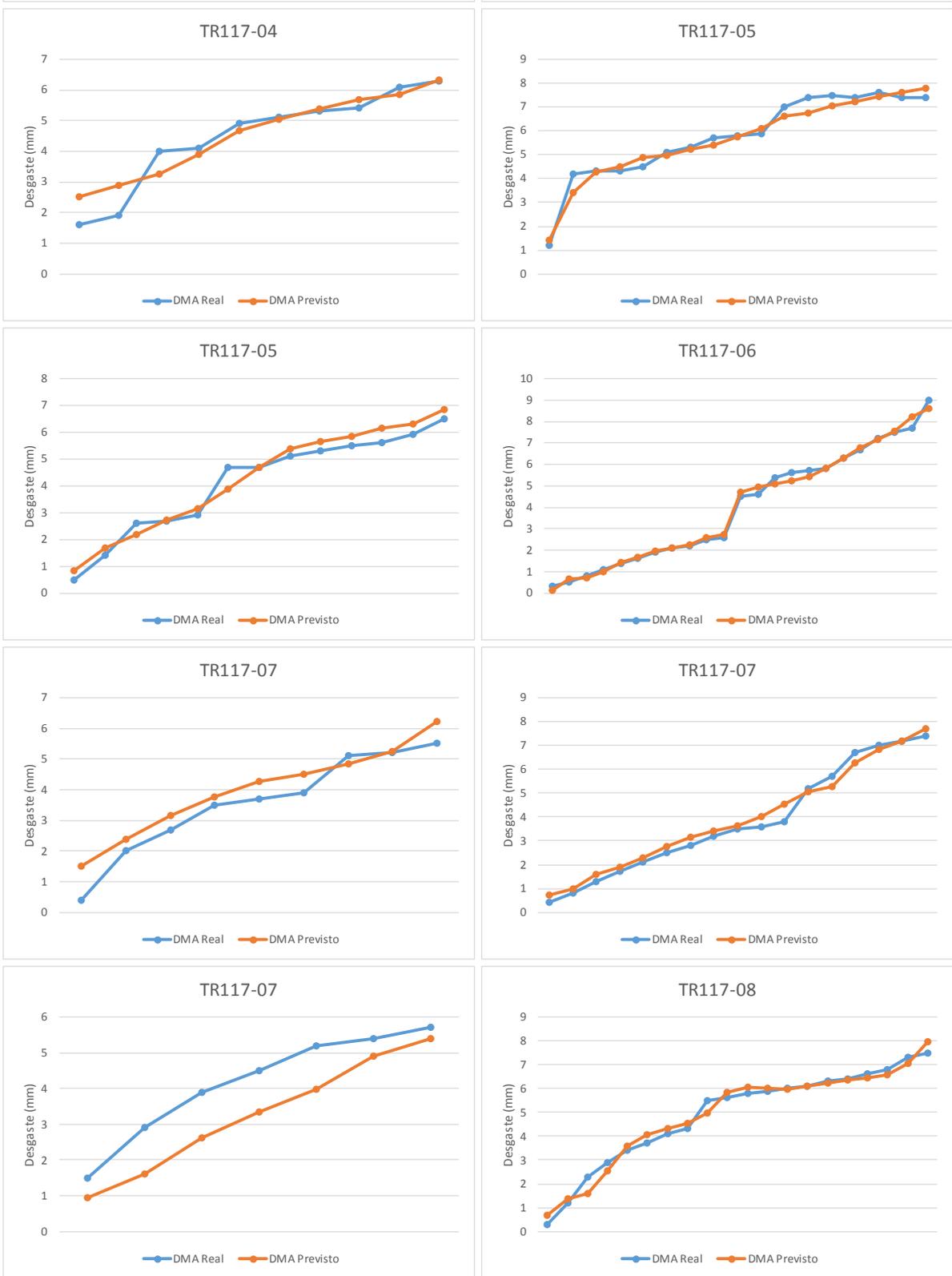
Os gráficos comparativos entre os desgastes reais acumulados e previstos pelos modelos da Tabela 4.15 são mostrados nas figuras a seguir.



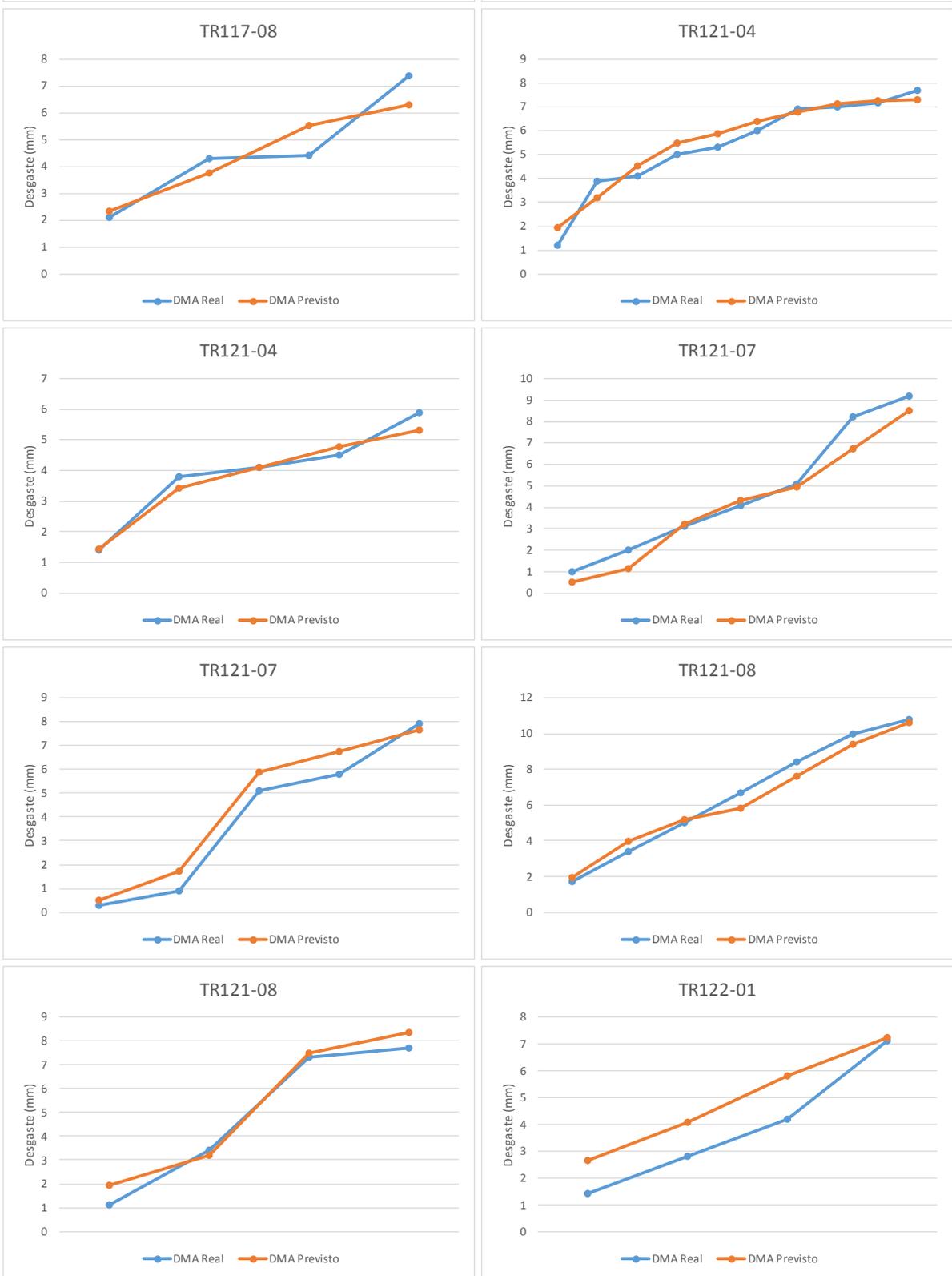
**Figura 4.26:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 113-02, 113-03, 113-04 e 113-13



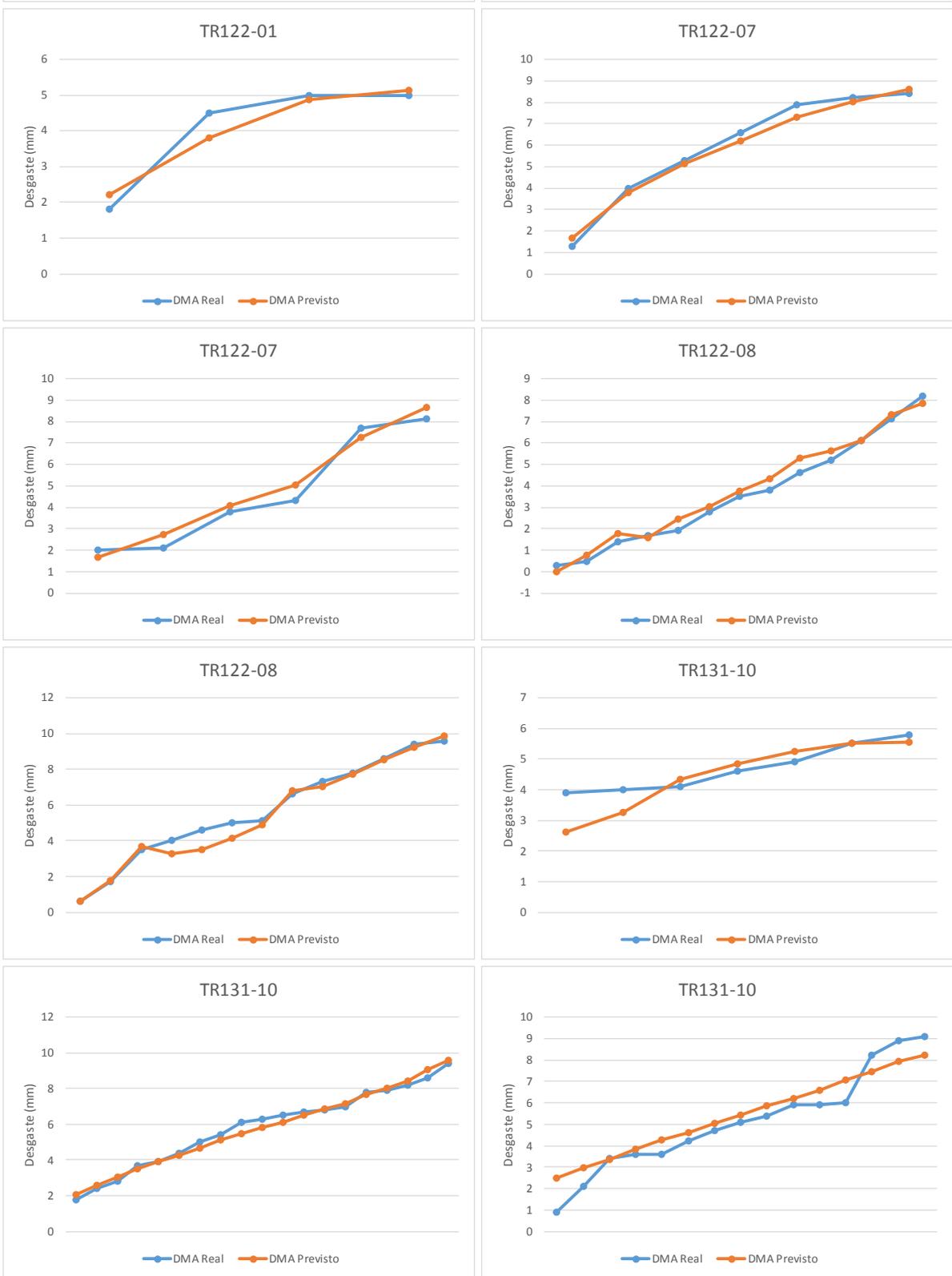
**Figura 4.27:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 113-14, 113-15, 117-01, 117-03 e 117-04



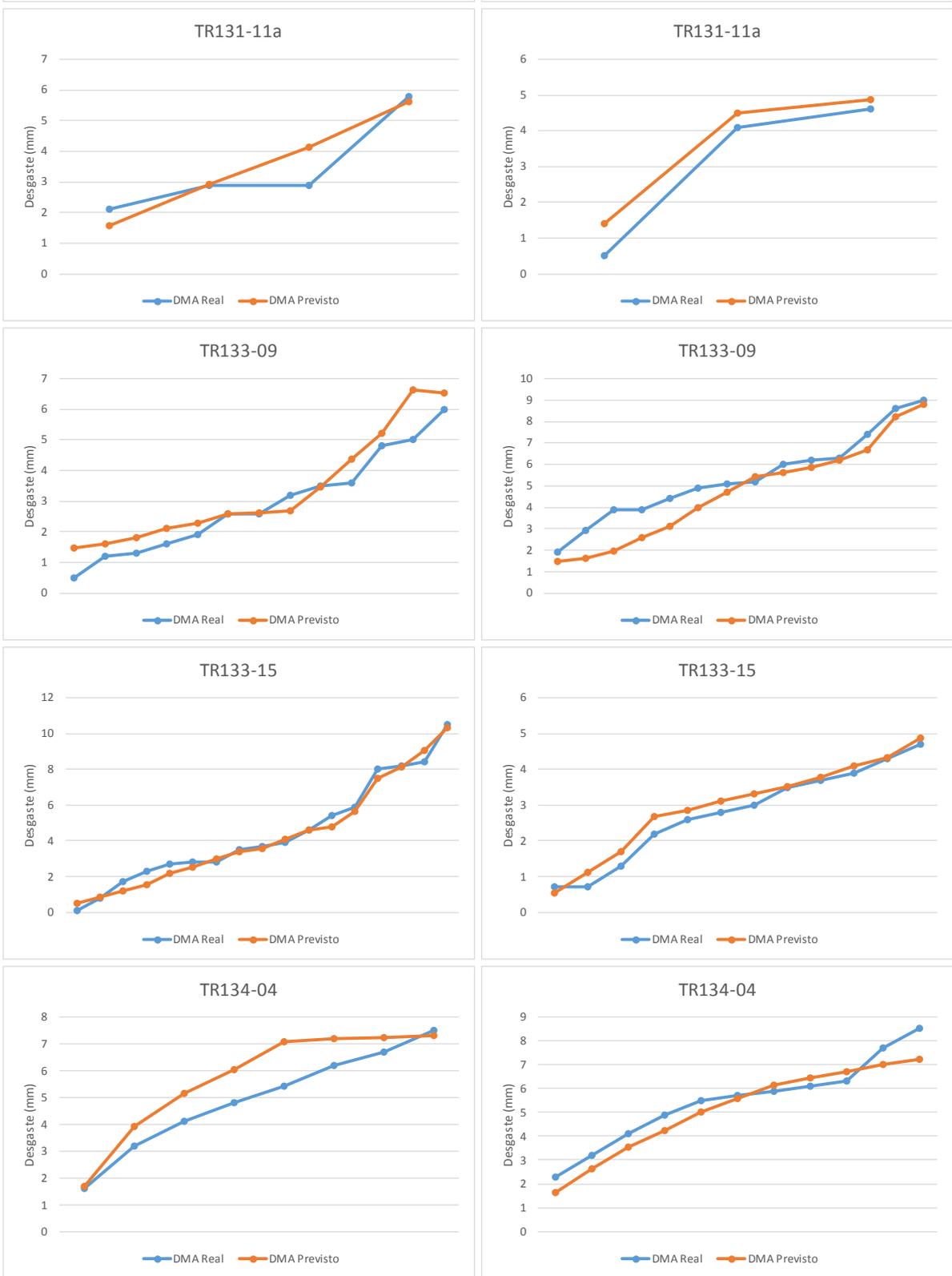
**Figura 4.28:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 117-04, 117-05, 117-06, 117-07 e 117-08



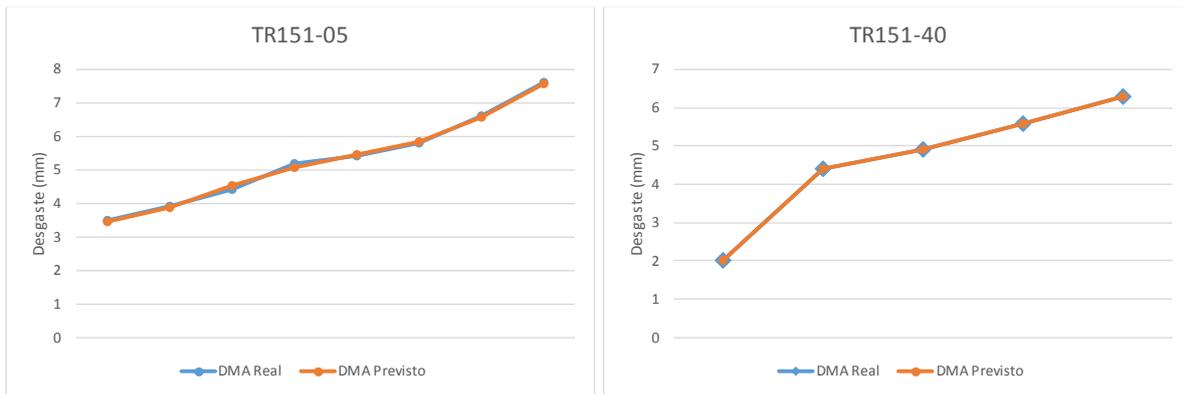
**Figura 4.29:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 117-08, 121-04, 121-07, 121-08 e 122-01



**Figura 4.30:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 122-01, 122-07, 122-08 e 131-10



**Figura 4.31:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 131-11a, 133-09, 133-15 e 134-04



**Figura 4.32:** Gráficos comparativos entre *DMA* real e *DMA* previsto para as correias 151-05 e 151-40

Pela análise das Figuras 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32, verifica-se uma boa aderência para a maioria dos modelos, ou seja, os mesmos representam de modo fidedigno o desgaste das correias. Pelas figuras anteriores, observa-se que a maioria das correias apresentam dois gráficos comparativos que representam as observações separadas por amostra (as observações de uma amostra ocorrem até que a correia seja trocada por desgaste ou acidente; desta forma, cada amostra representa uma nova correia).

No gráfico da correia 113-04, na Figura 4.17, verifica-se que a aderência do modelo tem uma boa representatividade para a primeira amostra; para a segunda, a aderência não é tão boa, o que pode ter algumas explicações como alterações internas no chute de descarga (que podem ocorrer por desgaste ou mesmo durante manutenções preventivas) ou diferentes fornecedores das correias (apesar de ter a mesma especificação, podem ocorrer diferenças na dureza final do produto, dentro de limites de tolerância, que variam em até 10%). Entretanto, o comportamento do desgaste apresenta o mesmo perfil com variações de desgaste em torno de 1 mm, o que é aceitável para esta situação. Observa-se comportamento semelhante nas correias 117-07 (Figura 4.28), 122-01 (Figura 4.30), 133-09 (Figura 4.31) e 134-04 (Figura 4.31).

#### 4.8 Validação do Modelo Obtido

A partir dos resultados obtidos na seção 4.7, foi realizada a validação de modelo através da análise por parte de especialistas da área de vulcanização da usina de Carajás, sendo estes os mesmos que participaram do GF.

Para esta validação foi realizada uma reunião onde foram apresentados todos os resultados e discutidos a coerência dos mesmos. Além disso foram realizadas simulações com o intuito de comparar o intervalo de tempo até a degradação das correias (momento de se efetuar uma troca, o que corresponde à vida da correia) previstos pelos modelos em relação ao tempo esperado pelos especialistas. Para este cálculo, considerou-se como desgaste limite o valor de 8 mm (na usina de Carajás, a vulcanização trabalha, como limite para troca, com valores de 8 a 10 mm de desgaste na região central da correia). Na Tabela 4.16 são apresentados os resultados comparativos.

TR	$R^2$	Vida Calculada (meses)	Vida Esperada (meses)	Diferença
113-02	0,908	12,0	15,0	-3,0
113-03	0,921	26,7	24,0	2,7
113-04	0,863	25,4	24,0	1,4
113-13	0,945	21,2	24,0	-2,8
113-14	0,967	20,5	22,0	-1,5
113-15	0,983	34,0	24,0	10,0
117-01	0,898	13,4	8,0	5,4
117-03	0,925	23,4	14,0	9,4
117-04	0,960	47,5	30,0	17,5
117-05	0,972	26,7	30,0	-3,3
117-06	0,994	28,9	30,0	-1,1
117-07	0,907	21,5	25,0	-3,5
117-08	0,950	41,9	30,0	11,9
121-04	0,812	13,0	12,0	1,0
121-07	0,929	7,1	10,0	-2,9
121-08	0,858	5,2	6,0	-0,8
122-01	0,839	4,9	4,0	0,9
122-07	0,938	6,5	8,0	-1,5
122-08	0,977	17,3	21,0	-3,7
131-10	0,922	16,0	18,0	-2,0
131-11a	0,822	2,3	3,0	-0,7
133-09	0,777	17,4	15,0	2,4
133-15	0,980	20,7	18,0	2,7
134-04	0,808	15,0	11,0	4,0
151-05	0,996	8,6	10,0	-1,4

**Tabela 4.16:** Comparativo da vida calculada pelos modelos em relação à vida esperada pelos especialistas

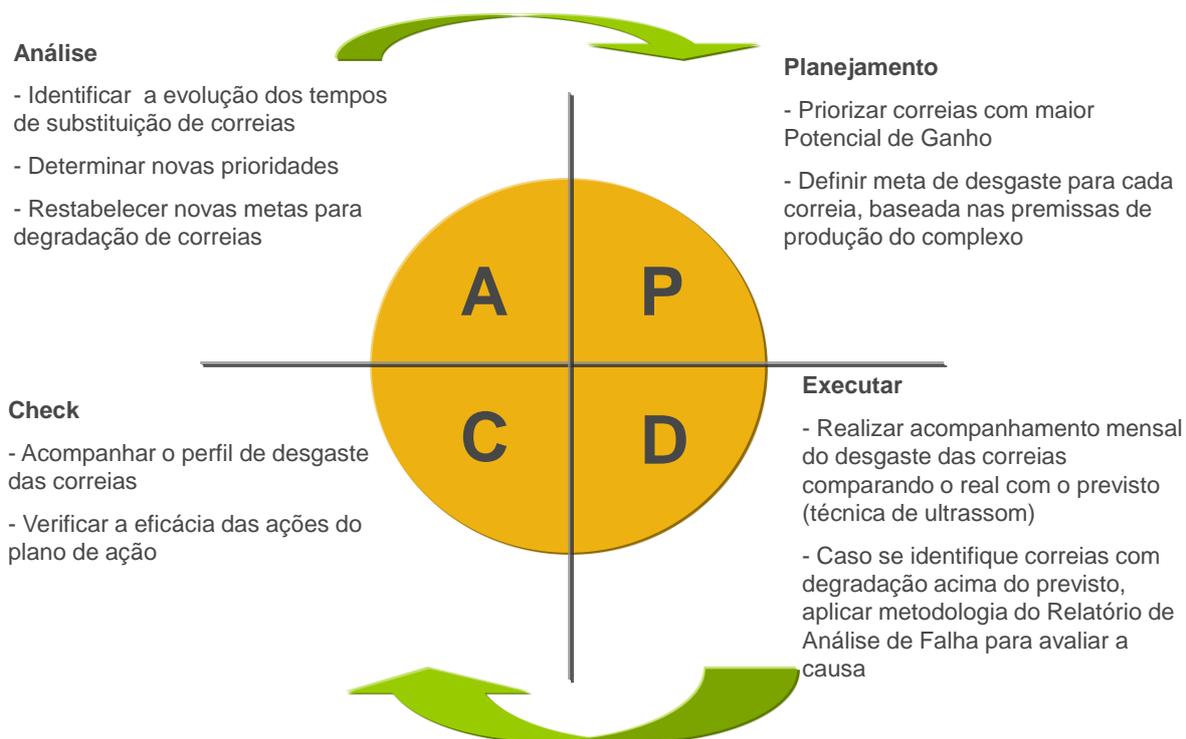
Avaliando-se a Tabela 4.16 observa-se que a vida útil obtida através da modelagem está coerente com os resultados esperados pela área de vulcanização, apesar de serem encontradas divergências, o que já era esperado, pois para efeito de cálculo, utilizou-se a produção média histórica, bem como base histórica, a qual contém situações de desgaste acelerado em função de acidentes operacionais e situações diversas que podem ter provocado desgaste prematuro das correias. Além disso, a vida esperada pelos especialistas está baseada na experiência e prática destes profissionais, o que engloba todas as situações que podem alterar o comportamento de degradação das correias, sendo na verdade um tempo médio da vida destas correias. Com base nos resultados obtidos, pode-se considerar como validado o modelo.

#### **4.9 Implicações Gerenciais da Modelagem**

A partir dos modelos obtidos é possível obter uma ferramenta de gestão para auxiliar na tomada de decisões no que tange ao acompanhamento e controle do desgaste das correias, possibilitando substituições mais assertivas, reaproveitamento das correias (o que permite a redução dos custos) e melhor dimensionamento dos estoques de reposição. Aliado a estes fatos, pode-se realizar a gestão de forma mais eficaz, permitindo comparações entre o desgaste real e previsto, possibilitando ações corretivas caso se detecte uma degradação acelerada, o que contribuirá para redução de custos com trocas de correias.

Para isto, é proposto a seguinte sistemática de gestão da degradação das correias, representada na Figura 4.33.

## GESTÃO DE DEGRADAÇÃO DE CORREIAS



**Figura 4.33:** Sistemática proposta para gestão de degradação de correias

A sistemática proposta consiste basicamente em comparar a evolução do desgaste real com o previsto, de modo a se detectar possíveis desvios. Assim, possibilita-se a elaboração de ações de correção, visando minimizar degradação acelerada e maximizando a vida útil das correias. O acompanhamento deverá ser realizado através da comparação dos dados de ultrassom das correias com valores calculados através os modelos obtidos na seção 4.7. Para se fazer este acompanhamento é proposto um modelo, representado na Figura 4.34.

Transportador TR117-06  
 Modelo de Desgaste  $DMA = 0,434 - 0,077DAC + 9,786 \times 10^{-7}PRA - 1,590 \times 10^{-14}PRA^2 + 1,383 \times 10^{-9}DAC \times PRA$

Desgaste Limite 8 mm

Produção Diária Média Circuito 85.585,28 ton

Data de Troca 30/11/2009

Vida Esperada 28,9 meses

Próxima Troca 16/04/2012

Data Medição	TR	Desgaste Médio Período (DM)	Desgaste Médio Acumulado (DMA)	Dias Período (D)	Dias Acumulado (DAC)	Produção Período (PR)	Produção Acumulada (PRA)	Desgaste Médio Acumulado Previsto (DMAP)	Diferença % desgaste	Observações
20/12/2009	117-06	0,3	0,3	20	20	1266430	1266430	0,15	99%	Desgaste Acelerado
14/01/2010	117-06	0,2	0,5	25	45	2457110	3723540	0,64	-22%	Normal
27/02/2010	117-06	0,3	0,8	44	89	3451850	7175390	0,70	14%	Desgaste Acelerado
24/03/2010	117-06	0,3	1,1	25	114	2242100	9417490	0,99	11%	Desgaste Acelerado
28/04/2010	117-06	0,3	1,4	35	149	3181530	12599020	1,42	-1%	Normal
19/05/2010	117-06	0,2	1,6	21	170	1888150	14487170	1,65	-3%	Normal
09/06/2010	117-06	0,3	1,9	21	191	1977990	16465160	1,95	-2%	Normal
08/07/2010	117-06	0,2	2,1	29	220	2363860	18829020	2,09	0%	Normal
11/08/2010	117-06	0,1	2,2	34	254	2714610	21543630	2,24	-2%	Normal
23/09/2010	117-06	0,3	2,5	43	297	3693140	25236770	2,61	-4%	Normal
08/10/2010	117-06	0,1	2,6	15	312	1313470	26550240	2,75	-5%	Normal

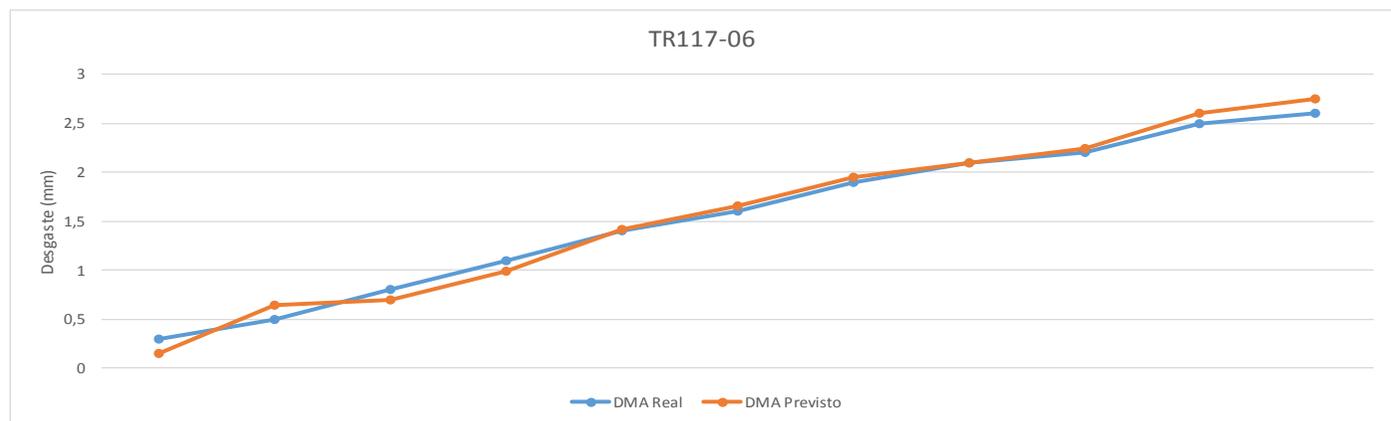


Figura 4.34: Modelo de acompanhamento da degradação de correias

O modelo proposto e representado na Figura 4.34 leva em consideração os dados acumulados de produção e dias decorridos desde a última troca da correia. Desta forma é possível avaliar se o desgaste médio acumulado está acima ou abaixo do previsto pelo modelo, permitindo, assim, a tomada de decisão a cada nova medição de ultrassom. É possível verificar também a vida útil prevista, bem como a provável data de troca da correia, o que auxiliará no planejamento da manutenção (bem como na orçamentação).

Considerando os dados da Tabela 4.16, observa-se que há um potencial de ganho financeiro para as correias dos TRs 113-03, 113-04, 113-15, 117-01, 117-03, 117-04, 117-08, 121-04, 122-01, 133-09, 133-15 e 134-04, uma vez que a vida útil prevista a partir dos modelos obtidos apresenta valores maiores que a estimativa atual dos especialistas. Considerando o valor de cada correia e a diferença na vida útil, pode-se calcular este ganho potencial, o que pode ser verificado na Tabela 4.17.

TR	Vida Calculada (meses)	Vida Esperada (meses)	Diferença	Comprimento	Custo Unitário	Custo Total	Ganho Potencial Anual
113-03	26,7	24,0	2,7	1.322,00	770,00	1.017.940,00	50.897,00
113-04	25,4	24,0	1,4	2.251,00	1.254,00	2.822.754,00	76.040,02
113-15	34,0	24,0	10,0	1.270,00	933,00	1.184.910,00	174.251,47
117-01	13,4	8,0	5,4	75,50	1.254,00	94.677,00	57.018,69
117-03	23,4	14,0	9,4	650,00	770,00	500.500,00	172.698,44
117-04	47,5	30,0	17,5	1.630,00	770,00	1.255.100,00	184.962,11
117-08	41,9	30,0	11,9	452,00	770,00	348.040,00	39.617,91
121-04	13,0	12,0	1,0	610,00	1.254,00	764.940,00	58.841,54
122-01	4,9	4,0	0,9	121,00	1.254,00	151.734,00	86.119,30
133-09	17,4	15,0	2,4	385,00	933,00	359.205,00	40.110,08
133-15	20,7	18,0	2,7	820,00	770,00	631.400,00	54.313,98
134-04	15,0	11,0	4,0	507,00	933,00	473.031,00	137.609,02
<b>Ganho Potencial Anual Total</b>							<b>1.132.479,55</b>

**Tabela 4.17:** Estimativa de ganho potencial anual de algumas correias

Analisando-se a Tabela 4.17 verifica-se que o potencial de ganho anual nos custos de correias (este ganho não pode ser capturado no ano, mas sim ao longo do ciclo de cada correia) é equivalente à R\$ 1.132.479,55.

## 5 Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, fazendo-se uma comparação entre os objetivos iniciais e os resultados obtidos, bem como a aplicabilidade do método proposto. Além disso, sugestões de trabalhos futuros são apresentados.

Dentre os objetivos específicos, tem-se a identificação das covariáveis inerentes ao processo de mineração que impactam na degradação das correias. Com a execução do trabalho, foi possível identificar através da literatura, bem como via Grupo Focado (GF), que as variáveis ciclo da correia, comprimento e largura da correia, queda do material, limpador de correias (raspadores), taxa de alimentação, granulometria, composto e velocidade da correia potencialmente impactariam na degradação de correias. Já com o uso da regressão multivariada, constatou-se que as mesmas realmente são significativas e influentes, corroborando os dados obtidos via GF. Entretanto, para a covariável queda do material (*QM*) verificou-se um resultado contrário ao esperado pelo GF, fato este explicado pelas possíveis variações de geometria e formatos internos dos chutes de transferência, o que impacta a forma e velocidade da queda do material nas correias.

Outro objetivo específico era o desenvolvimento de equações que modelassem o desgaste das correias, o que foi obtido através do uso da regressão linear múltipla. A partir das simulações realizadas, verificou-se que a obtenção de um modelo único para todas as correias do complexo analisado não era o ideal, uma vez que o perfil de desgaste de cada correia era muito distinto, sendo que o ajuste obtido não foi adequado. Outro ponto importante que pode ser verificado foi a importância da interação entre as covariáveis, bem como do efeito quadrático de algumas delas, o que pode ser comprovado através da melhora significativa do ajuste do modelo com a inclusão desses termos. Apesar da melhora, o ajuste ainda não representou de forma adequada todas as correias, sendo necessário então trabalhar com modelos individuais.

Para a elaboração de modelos individuais, não foi possível trabalhar com todas as covariáveis, uma vez que, nesta situação, apenas as variáveis dias acumulados (*DAC*) e produção acumulada (*PRA*) apresentavam variações, sendo todas as outras fixas para cada transportador. Apesar deste fato, foi possível obter modelos que tiveram bons ajustes, apresentado valores de  $R^2$  que variaram de 0,777 à 0,996, com um valor médio de 0,914. Tais modelos foram apresentados aos especialistas em vulcanização que trabalham na usina de Carajás, sendo os mesmos validados por esta equipe.

A partir da obtenção dos modelos individuais de desgaste das correias, foi possível estimar a vida útil de cada uma delas, considerando os valores médios históricos de produção da usina de Carajás e os valores limites de degradação admitidos pela equipe de vulcanização. Observou-se algumas variações em relação à vida útil considerada pela área, o que já era esperado em função de alterações que podem ocorrer devido diferentes fornecedores para uma mesma correia (apesar de se ter uma especificação padrão, pequenas diferenças ocorrem em função de processos distintos de fabricação), alterações de chutes de alimentação provocados por desgaste ou manutenções e históricos de acidentes que acabam sendo considerados pela equipe de manutenção. Desta forma, foi possível obter a previsão de desgaste padrão para cada correia analisada, que era também um dos objetivos específicos.

De posse dos modelos de degradação obtidos para cada correia e a validação da metodologia utilizada, foi proposta uma sistemática de gestão da degradação de correias (último dos objetivos específicos) baseada na comparação da evolução do desgaste real com o previsto, de modo a se detectar possíveis desvios e permitir a elaboração de ações de correção, visando minimizar a degradação acelerada e maximizar a vida útil das correias.

O objetivo geral deste trabalho era a modelagem de degradação de correias, o que foi obtido a partir dos modelos individuais. Conseguiu-se estimar um ganho financeiro potencial a partir da comparação entre a vida útil calculada pelos modelos de degradação e a vida estimada pela área, sendo este ganho em torno de R\$ 1.132.000,00 por ano (valor obtido considerando os custos médios de cada correia no ano de 2013).

Com a elaboração deste trabalho, verificou-se que existem outras perspectivas as quais podem ser abordadas em novas pesquisas. A seguir algumas possibilidades sugeridas: (i) elaboração de modelos de degradação considerando uma correia padrão com possibilidade de alterações controladas de velocidade, taxa de alimentação, largura, comprimento, queda de material e limpadores de correia; (ii) uso de técnicas de regressão não linear para obtenção dos modelos de degradação; (iii) avaliação do impacto da otimização das variáveis de projeto (velocidade, comprimento, grau de enchimento, características do material e especificações da correia) na vida útil da correias e no custo total de manutenção das mesmas; e (iv) comparação da degradação entre correias originais e recuperadas.

## Referências Bibliográficas

- BAGDONAVICIUS, V.; NIKULIN, M. Estimation in degradation models with explanatory variables. **Lifetime data analysis**, vol. 7, nº 1, p. 85-103, 2000.
- BAGDONAVICIUS, V.; NIKULIN, M. Statistical Models to Analyze Failure, Wear, Fatigue, and Degradation Data with Explanatory Variables. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, vol. 38, nº 16-17, p. 3031-3047, 2009.
- BHATTACHARYYA, M.; KLEIN, J. P. A note on testing in Aalen ' s additive hazards regression models. n. December 2003, p. 2235-2240, 2005.
- CAI, G.; CHEN, X.; LI, B.; CHEN, B.; HE, Z. Operation Reliability Assessment for Cutting Tools by Applying a Proportional Covariate Model to Condition Monitoring Information. **Sensors**, v. 12, n. 10, p. 12964-12987, 25 set 2012.
- CHEN, H.-T; YUAN, H.-J. Reliability Assessment Based on Proportional Degradation Hazards Model. **IEEE Transactions on Reliability**, nº X, p. 958-962, 2010.
- CHOU, C.-S.; LIU, C.-L.; TSENG, C.-S. Optimum conditions for field vulcanizing a fabric conveyor belt with a better capability of elongation. **Materials & Design**, vol. 34, p. 279-284, ago 2011.
- CRK, V. Reliability Assessment from Degradation Data. **Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium. Anais...** p. 155-161, 2000.
- DANTAS, M. A.; VALENÇA, D. M.; FREIRE, M. P. DA S. Modelo de regressão Weibull para estudar dados de falha de equipamentos de sub-superfície em poços petrolíferos. **Revista Produção**, v. 20, nº 1, p. 127-134, 2010.
- DENSON, W. The History of Reliability Prediction. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 47, nº 3, p. 321-328, 1998.
- DESSAUNE, M. B. **Noções básicas transportadores de correia**. Martin Engineering, 1999.
- DUEK, C. **Análise de confiabilidade na manutenção de componente mecânico de aviação**. Universidade Federal de Santa Maria, 2005.
- EBEL, G. H.; SENZOR, L.; IEEE, M. Reliability Physics in Electronics : A Historical View. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 47, nº 3, p. 379-389, 1998.
- FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. L.; CHAN, B. L. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. 1ª Ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 1ª Ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- FOURIE, J. H.; ALPORT, M. J.; BASSON, J. F.; PADAYACHEE, T. Condition monitoring of fabric-reinforced conveyor belting using digital x-ray imaging. **Advanced Imaging**, nº 1, p. 1-9, 2004.

FREITAS, MARTA A; SANTOS, T. R.; PIRES, M. C.; COLOSIMO, ENRICO A. A Closer Look at Degradation Models : Classical and Bayesian Approaches. **Advanced in Degradation Modeling**, p. 157-180, 2010.

GORJIAN, N.; MA, L.; MITTINTY, M.; YARLAGADDA, P.; SUN, Y. A review on reliability models with covariates. **Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management. Anais...** Athens, Greece, 2009a.

GORJIAN, N.; MA, L.; MITTINTY, M.; YARLAGADDA, P.; SUN, Y. A review on degradation models in reliability analysis. **Proceedings of the 4th World Congress on Engineering Asset Management. Anais...** Athens, Greece, 2009b.

GUZZON, S. DE O. **Proposta de análise quantitativa de confiabilidade a partir de dados qualitativos provenientes da FMEA.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

GÓRNIAK-ZIMROZ, J.; ZIMROZ, R.; KRÓL, R.; JURDZIAK, LESZEK. The application of GISs to support belt conveyor maintenance management. **Studia i Materialy**, v. 36, n. 128, p. 271-284, 2009.

GRONNESBY, J. K. Testing Covariate Effects in Aalen 's Linear Hazard Model. **Foundation of the Scandinavian Journal of Statistics**, v. 24, n. 1, p. 125-135, 1997.

HAGHIGHI, F.; NOORAEI, N.; RAD, N. N. On the general degradation path model: review and simulation. **Advanced in Degradation Modeling**, p. 147-155, 2010.

HOSMER, D. W.; ROYSTON, P. Using Aalen's linear hazards model to investigate time-varying effects in the proportional hazards regression model. **The Stata Journal**, v. 2, n. 4, p. 331 - 350, 2002.

JARDINE, A. K. S.; ANDERSON, P. M.; MANN, D. S. Application of the weibull proportional hazards model aircraft and marine engine failure data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 3, n. October, p. 77-82, 1986.

JARDINE, A. K. S.; RALSTON, P.; STAFFORD, N. R. & J. Proportional hazards analysis of diesel. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 5, n. January, p. 207-216, 1989.

JIANG, S- T.; LANDERS, T.L.; RHOADS, T. R. Semi-parametric proportional intensity models robustness for right-censored recurrent failure data. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 90, n. 1, p. 91-98, out 2005.

JIANG, S-T.; LANDERS, T. L.; RHOADS, T. R. Proportional Intensity Models Robustness with Overhaul Intervals. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 22, n. 3, p. 251-263, abr 2006a.

JIANG, S.-T.; LANDERS, T.L.; RHOADS, T. R. Assessment of Repairable-System Reliability Using Proportional Intensity Models: A Review. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 55, n. 2, p. 328-336, jun 2006b.

JIN, Z.; LIN, D. Y.; WEI, L. J.; YING, Z. Rank-based inference for the accelerated failure time model. **Biometrika**, v. 90, n. 2, p. 341-353, 2003.

JOZWIAK, I. R. E. N. E. U. S. Z. J. An introduction to the studies of reliability of systems using the weibull proportional hazards model. **Pergamon**, v. 37, n. 6, p. 915-918, 1997.

JURDZIAK, L.; HARDYGÓRA, M. Determination of the distribution function of conveyor belt operating time. **Mine Planning and Equipment Selection**, p. 427-430, 1995.

KAHLE, W.; LEHMANN, A. The Wiener Process as a Degradation Model: Modeling and Parameter Estimation. **Advanced in Degradation Modeling**, p. 127-146, 2010.

KARIM, M. R.; SUZUKI, K. Analysis of warranty data with covariates. **Risk and Reliability**, v. 221, p. 249-255, 2007.

KOZHUSHKO, G. G.; KOPNOV, V. A. Fatigue strength functions in shear loading of fabric conveyor belts. **Int. J. Fatigue**, v. 17, n° 8, p. 539-544, 1995.

KUMAR, D.; KLEFSJO, B. Proportional hazards model: a review. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 44, p. 177-188, 1994.

KUMAR, D.; WESTBERG, U. Proportional Hazards Modeling of Time-Dependent Covariates Using Linear Regression: **IEEE Transactions on Reliability**, v. 45, n. 3, p. 386-392, 1996.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. 1ª Ed., Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LAKSHMI, S.; SUNDARI, P. G. A new mathematical model in Weibull proportional hazards regression using GABA. **International Journal of Advanced Scientific Research & Technology**, v. 1, n° 2, p. 185-192, 2012.

LEHMANN, A. Failure Time Models Based on Degradation Processes. **Advanced in Degradation Modeling**, p. 209-233, 2010.

LEMOS, F. D. O. **Metodologia para seleção de métodos de previsão de demanda**. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

LENG, C.; MA, S. Accelerated Failure Time Models With Nonlinear Covariates Effects. **Australian & New Zealand Journal of Statistics**, v. 49, n. 2, p. 155-172, jun 2007.

LIAO, H. **Degradation models and design of accelerated degradation testing plans**. The State University of New Jersey, 2004.

LU, C. J.; MEEKER, W. Q. Using Degradation Measures to Estimate a Time-to-Failure Distribution. **Technometrics**, v. 35, n° 2, p. 161-174, 1993.

MAZURKIEWICZ, D. Analysis of the ageing impact on the strength of the adhesive sealed joints of conveyor belts. **Journal of materials processing technology**, v. 8, n° 208, p. 477-485, 2008.

MENDES, A. A. **Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma abordagem quantitativa.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

MENEZES, I. M. DE; ALMEIDA, M. DE L.; CASTRO, C. H.; CRUZ, M. M. Tecnologias inovadoras para maximizar a vida econômica de correias transportadoras. **1º Congresso Mundial de Manutenção. Anais...**, p. 19, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** 4ª Ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

NOORTWIJK, J. M. VAN. A survey of the application of gamma processes in maintenance. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, nº 1, p. 2-21, jan 2009.

NOORTWIJK, J. M. VAN; WEIDE, J. A. M. VAN DER; KALLEN, M. J.; PANDEY, M. D. Gamma processes and peaks-over-threshold distributions for time-dependent reliability. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 92, nº 12, p. 1651-1658, dez 2007.

PAN, Z.; BALAKRISHNAN, N. Reliability modeling of degradation of products with multiple performance characteristics based on gamma processes. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 96, nº 8, p. 949-957, ago 2011.

PANG, Y. **Intelligent Belt Conveyor Monitoring and Control.** Netherlands: TRAIL Thesis Series, 2010. p. 196

PEREIRA, F. J. D. **Modelos de Fiabilidade em Equipamentos Mecânicos.** Universidade do Porto, 1996.

POHL, L.; RIBEIRO, JOSÉ LUÍS DUARTE; CALCAGNOTO, J.; SILVA, M. H. M. Modelos de degradação aplicados a melhoria da confiabilidade de produtos. **XVIII ENEGEP. Anais...**, 1998.

QURESHI, WA. M.; LANDERS, THOMAS L.; GBUR, E. E. Robustness evaluation of a semi-parametric proportional intensity model. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 44, p. 103-109, 1994.

RENGIFO, P. E. New splice assembly technique for wire reinforced belting. **Bulk Solids Handling by Conveyor Belt**, v. 5, nº 24, p. 24-30, 2004.

ROBINS, J.; TSIATIS, A. A. Semiparametric estimation of an accelerated failure time model with time-dependent covariates. **Biometrika**, v. 79, n. 2, p. 311-319, 1992.

ROZENTALS, J. **Flow Of Bulk Solids In Chute Design.** Disponível em: <<http://www.ckit.co.za/secure/conveyor/papers/bionic-research-1/c-bri1-paper02.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2013.

SANTOS, G. T. DOS. **Modelo de confiabilidade associando dados de garantia e pós-garantia a três comportamentos de falhas.** [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

- SANTOS, G. T. DOS; FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, JOSÉ LUIZ DUARTE; RAUSAND, M. Aplicação de um modelo de riscos concorrentes na análise de confiabilidade de dados de garantia. **Produto & Produção**, v. 9, n° 3, p. 55-65, 2008.
- SARANGA, H.; KNEZEVIC, J. Reliability analysis using multiple relevant condition parameters. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 6, n° 3, p. 165-176, 2000.
- SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Revista Produção**, v. 15, n° 1, p. 44-59, 2005.
- SILVA, R. R. DA; MATTOS, N. M. C. Análise Bayesiana da confiabilidade de itens submetidos a testes de degradação. **XXI ENEGEP. Anais...**, 2001
- SINGPURWALLA, N. D. Survival in Dynamic Environments. **Statistical Science**, v. 10, n° 1, p. 86-103, 1995.
- SUN, Y.; MA, L.; MATHEW, J.; WANG, W.; ZHANG, S. Mechanical systems hazard estimation using condition monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 5, p. 1189-1201, jul 2006.
- SWINDERMAN, R. T.; MARTI, A. D.; GOLDEBECK, L. J.; MARSHALL, D.; STREBEL, M. G. **Foundations - The practical resource for cleaner, safer, more productive dust & material control**, 4a Ed., Neponset: Martin Engineering Company, 2009. p. 574
- SYAMSUNDAR, A.; NAIKAN, V. N. A. Imperfect Repair Proportional Intensity Models for Maintained Systems. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 60, n. 4, p. 782-787, 2011.
- TANG, J.; SU, T.-SHU. Estimating Failure Time Distribution and Its Parameters Based on Intermediate Data from a Wiener Degradation Model. **Naval Research Logistics**, v. 55, p. 265-276, 2008.
- TÖRNER, A. Proportional hazards and additive regression analysis of survival for severe breast cancer. [S.l.]: Stockholm University, 2004.
- XU, Q.; YOU, J. Covariate Selection for Linear Errors-in-Variables Regression Models. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v. 36, n. 2, p. 375-386, 6 fev 2007.
- WALLACE, J. M.; MAVRIS, D. N.; SCHRAGE, D. P. System Reliability Assessment Using Covariate Theory. **Annual Symposium Reliability and Maintainability**, p. 18-24, 2004.
- WARBURTON, D.; STRUTT, J. E.; ALLSOPP, K. Reliability prediction procedures for mechanical components at the design stage. **Process Mechanical Engineering**, v. 212, n° 4, p. 213-224, 1 jan 1998.
- WHITMORE, G. A.; SCHENKELBERG, F. Modelling Accelerated Degradation Data Using Wiener Diffusion With A Time Scale Transformation. **Lifetime Data Analysis**, v. 45, n° 3, p. 27-45, 1997.
- ZHAO, L.; LIN, Y. Typical Failure Analysis and Processing of Belt Conveyor. **Procedia Engineering**, v. 26, p. 942-946, jan 2011.

**Apêndice A** – Passo a passo da seleção *backward* considerando interação e efeito quadrático das covariáveis

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2695,257 <sup>a</sup>	26	103,664	71,015	0,000
Intercepto	2,901	1	2,901	1,988	0,159
<i>DAC</i>	10,381	1	10,381	7,111	0,008
<i>PRA</i>	5,072	1	5,072	3,474	0,063
<i>VE</i>	3,900	1	3,900	2,672	0,103
<i>CO</i>	68,176	1	68,176	46,704	0,000
<i>LA</i>	0,272	1	0,272	0,186	0,666
<i>M1</i>	32,421	1	32,421	22,210	0,000
<i>M2</i>	1,025	1	1,025	0,702	0,402
<i>LC</i>	111,779	1	111,779	76,574	0,000
<i>QM</i>	7,864	1	7,864	5,387	0,021
<i>VE</i> <sup>2</sup>	3,609	1	3,609	2,473	0,116
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,987	1	0,987	0,676	0,411
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,576	1	3,576	2,450	0,118
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	8,524	1	8,524	5,839	0,016
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	9,176	1	9,176	6,286	0,012
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	7,339	1	7,339	5,027	0,025
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	3,657	1	3,657	2,506	0,114
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	8,303	1	8,303	5,688	0,017
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	24,923	1	24,923	17,073	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	2,561	1	2,561	1,754	0,186
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	78,981	1	78,981	54,106	0,000
<i>PRA</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	1,384	1	1,384	0,948	0,331
<i>VE</i> × <i>LA</i>	2,192	1	2,192	1,501	0,221
<i>VE</i> × <i>LC</i>	114,509	1	114,509	78,444	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	5,514	1	5,514	3,777	0,052
<i>VE</i> <sup>3</sup>	17,453	1	17,453	11,956	0,001
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,019	1	4,019	2,753	0,098
Erro	896,287	614	1,460		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,750 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

## 2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2694,985 <sup>a</sup>	25	107,799	73,946	0,000
Intercepto	24,830	1	24,830	17,032	0,000
<i>DAC</i>	10,547	1	10,547	7,235	0,007
<i>PRA</i>	5,195	1	5,195	3,564	0,060
<i>VE</i>	9,690	1	9,690	6,647	0,010
<i>CO</i>	68,518	1	68,518	47,000	0,000
<i>M1</i>	32,320	1	32,320	22,170	0,000
<i>M2</i>	1,980	1	1,980	1,358	0,244
<i>LC</i>	113,301	1	113,301	77,720	0,000
<i>QM</i>	9,252	1	9,252	6,346	0,012
<i>VE</i> <sup>2</sup>	4,450	1	4,450	3,052	0,081
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,000	1	1,000	0,686	0,408
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,708	1	3,708	2,544	0,111
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	8,936	1	8,936	6,130	0,014
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	10,016	1	10,016	6,870	0,009
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	7,338	1	7,338	5,034	0,025
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	3,860	1	3,860	2,648	0,104
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	8,078	1	8,078	5,541	0,019
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	26,750	1	26,750	18,349	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	2,315	1	2,315	1,588	0,208
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	78,842	1	78,842	54,082	0,000
<i>PRA</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	1,618	1	1,618	1,110	0,292
<i>VE</i> × <i>LA</i>	40,233	1	40,233	27,598	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	116,719	1	116,719	80,064	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	6,850	1	6,850	4,699	0,031
<i>VE</i> <sup>3</sup>	28,988	1	28,988	19,884	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,018	1	4,018	2,756	0,097
Erro	896,559	615	1,458		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,750 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

## 3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2693,985 <sup>a</sup>	24	112,249	77,037	0,000
Intercepto	24,891	1	24,891	17,083	0,000
<i>DAC</i>	9,592	1	9,592	6,583	0,011
<i>PRA</i>	4,205	1	4,205	2,886	0,090
<i>VE</i>	9,992	1	9,992	6,857	0,009
<i>CO</i>	72,860	1	72,860	50,004	0,000
<i>M1</i>	32,980	1	32,980	22,634	0,000
<i>M2</i>	1,735	1	1,735	1,190	0,276
<i>LC</i>	112,339	1	112,339	77,099	0,000
<i>QM</i>	9,225	1	9,225	6,331	0,012
<i>VE</i> <sup>2</sup>	5,006	1	5,006	3,436	0,064
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,156	1	3,156	2,166	0,142
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	7,953	1	7,953	5,458	0,020
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	9,077	1	9,077	6,230	0,013
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	14,845	1	14,845	10,188	0,001
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	3,081	1	3,081	2,115	0,146
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	9,615	1	9,615	6,599	0,010
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	27,628	1	27,628	18,961	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	2,689	1	2,689	1,845	0,175
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	80,420	1	80,420	55,193	0,000
<i>PRA</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	1,319	1	1,319	,905	0,342
<i>VE</i> × <i>LA</i>	39,959	1	39,959	27,424	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	115,749	1	115,749	79,440	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	6,837	1	6,837	4,692	0,031
<i>VE</i> <sup>3</sup>	31,513	1	31,513	21,627	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	41,970	1	41,970	28,805	0,000
Erro	897,559	616	1,457		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,750 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

## 4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2692,666 <sup>a</sup>	23	117,072	80,360	0,000
Intercepto	31,784	1	31,784	21,817	0,000
<i>DAC</i>	16,939	1	16,939	11,627	0,001
<i>PRA</i>	6,009	1	6,009	4,124	0,043
<i>VE</i>	25,827	1	25,827	17,728	0,000
<i>CO</i>	73,112	1	73,112	50,185	0,000
<i>M1</i>	33,847	1	33,847	23,233	0,000
<i>M2</i>	2,048	1	2,048	1,406	0,236
<i>LC</i>	111,312	1	111,312	76,406	0,000
<i>QM</i>	8,908	1	8,908	6,115	0,014
<i>VE</i> <sup>2</sup>	21,977	1	21,977	15,086	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,661	1	3,661	2,513	0,113
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	13,084	1	13,084	8,981	0,003
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	13,179	1	13,179	9,046	0,003
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	14,359	1	14,359	9,856	0,002
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	10,768	1	10,768	7,391	0,007
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	10,087	1	10,087	6,924	0,009
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	26,838	1	26,838	18,422	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	3,074	1	3,074	2,110	0,147
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	79,112	1	79,112	54,304	0,000
<i>VE</i> × <i>LA</i>	38,643	1	38,643	26,525	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	114,683	1	114,683	78,720	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	6,625	1	6,625	4,547	0,033
<i>VE</i> <sup>3</sup>	63,729	1	63,729	43,745	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	40,878	1	40,878	28,059	0,000
Erro	898,878	617	1,457		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,750 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

## 5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2690,618 <sup>a</sup>	22	122,301	83,894	0,000
Intercepto	30,458	1	30,458	20,893	0,000
<i>DAC</i>	17,817	1	17,817	12,222	0,001
<i>PRA</i>	10,224	1	10,224	7,013	0,008
<i>VE</i>	29,380	1	29,380	20,154	0,000
<i>CO</i>	103,025	1	103,025	70,671	0,000
<i>M1</i>	43,261	1	43,261	29,675	0,000
<i>LC</i>	109,265	1	109,265	74,951	0,000
<i>QM</i>	7,199	1	7,199	4,938	0,027
<i>VE</i> <sup>2</sup>	21,942	1	21,942	15,051	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	2,638	1	2,638	1,810	0,179
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	12,393	1	12,393	8,501	0,004
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	11,450	1	11,450	7,854	0,005
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	13,425	1	13,425	9,209	0,003
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	15,386	1	15,386	10,554	0,001
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	12,589	1	12,589	8,636	0,003
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	32,836	1	32,836	22,524	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	6,483	1	6,483	4,447	0,035
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	78,491	1	78,491	53,842	0,000
<i>VE</i> × <i>LA</i>	51,401	1	51,401	35,259	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	113,113	1	113,113	77,591	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	5,172	1	5,172	3,548	0,060
<i>VE</i> <sup>3</sup>	61,730	1	61,730	42,344	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	45,382	1	45,382	31,130	0,000
Erro	900,926	618	1,458		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,749 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

## 6ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2687,980 <sup>a</sup>	21	127,999	87,688	0,000
Intercepto	31,115	1	31,115	21,316	0,000
<i>DAC</i>	18,757	1	18,757	12,849	0,000
<i>PRA</i>	15,335	1	15,335	10,506	0,001
<i>VE</i>	32,542	1	32,542	22,293	0,000
<i>CO</i>	101,200	1	101,200	69,329	0,000
<i>M1</i>	43,237	1	43,237	29,620	0,000
<i>LC</i>	109,599	1	109,599	75,082	0,000
<i>QM</i>	7,106	1	7,106	4,868	0,028
<i>VE</i> <sup>2</sup>	21,954	1	21,954	15,040	0,000
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	13,802	1	13,802	9,455	0,002
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	12,233	1	12,233	8,381	0,004
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	14,523	1	14,523	9,949	0,002
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	18,348	1	18,348	12,569	0,000
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	11,768	1	11,768	8,062	0,005
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	49,155	1	49,155	33,674	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	7,487	1	7,487	5,129	0,024
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	79,322	1	79,322	54,341	0,000
<i>VE</i> × <i>LA</i>	58,551	1	58,551	40,111	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	113,746	1	113,746	77,924	0,000
<i>VE</i> × <i>QM</i>	5,138	1	5,138	3,520	0,061
<i>VE</i> <sup>3</sup>	60,182	1	60,182	41,229	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	51,637	1	51,637	35,374	0,000
Erro	903,564	619	1,460		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,748 (R-Quadrado Ajustado = 0,740)

7ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	2682,842 <sup>a</sup>	20	134,142	91,524	0,000
Intercepto	26,609	1	26,609	18,155	0,000
<i>DAC</i>	17,758	1	17,758	12,116	0,001
<i>PRA</i>	15,940	1	15,940	10,876	0,001
<i>VE</i>	27,414	1	27,414	18,704	0,000
<i>CO</i>	97,221	1	97,221	66,333	0,000
<i>M1</i>	38,293	1	38,293	26,127	0,000
<i>LC</i>	157,127	1	157,127	107,206	0,000
<i>QM</i>	8,626	1	8,626	5,885	0,016
<i>VE</i> <sup>2</sup>	16,858	1	16,858	11,502	0,001
<i>DAC</i> × <i>VE</i>	12,773	1	12,773	8,715	0,003
<i>DAC</i> × <i>VE</i> <sup>2</sup>	11,142	1	11,142	7,602	0,006
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	15,644	1	15,644	10,674	0,001
<i>PRA</i> × <i>VE</i>	17,821	1	17,821	12,159	0,001
<i>PRA</i> × <i>CO</i>	10,830	1	10,830	7,389	0,007
<i>PRA</i> × <i>LA</i>	53,501	1	53,501	36,503	0,000
<i>PRA</i> × <i>LC</i>	8,568	1	8,568	5,846	0,016
<i>PRA</i> × <i>QM</i>	74,646	1	74,646	50,931	0,000
<i>VE</i> × <i>LA</i>	82,781	1	82,781	56,481	0,000
<i>VE</i> × <i>LC</i>	167,225	1	167,225	114,096	0,000
<i>VE</i> <sup>3</sup>	62,459	1	62,459	42,615	0,000
<i>VE</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	53,648	1	53,648	36,604	0,000
Erro	908,702	620	1,466		
Total	16625,850	641			
Total Corrigido	3591,544	640			

a. R-Quadrado = 0,747 (R-Quadrado Ajustado = 0,739)

**Apêndice B** – Passo a passo da seleção *backward* para os modelos individuais das correias

**TR113-02**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	87,618 <sup>a</sup>	5	17,524	34,363	0,000
Intercepto	3,792	1	3,792	7,436	0,016
<i>DAC</i>	6,430	1	6,430	12,609	0,003
<i>PRA</i>	1,075	1	1,075	2,108	0,169
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,184	1	0,184	0,361	0,558
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,256	1	0,256	0,503	0,490
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,797	1	0,797	1,562	0,232
Erro	7,139	14	0,510		
Total	435,070	20			
Total Corrigido	94,758	19			

a. R-Quadrado = 0,925 (R-Quadrado Ajustado = 0,898)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	87,434 <sup>a</sup>	4	21,859	44,771	0,000
Intercepto	3,627	1	3,627	7,428	0,016
<i>DAC</i>	52,064	1	52,064	106,637	0,000
<i>PRA</i>	13,722	1	13,722	28,106	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	4,370	1	4,370	8,950	0,009
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,390	1	1,390	2,848	0,112
Erro	7,323	15	0,488		
Total	435,070	20			
Total Corrigido	94,758	19			

a. R-Quadrado = 0,923 (R-Quadrado Ajustado = 0,902)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	86,044 <sup>a</sup>	3	28,681	52,664	0,000
Intercepto	2,570	1	2,570	4,719	0,045
<i>DAC</i>	54,835	1	54,835	100,687	0,000
<i>PRA</i>	34,736	1	34,736	63,782	0,000
<i>DAC × PRA</i>	34,899	1	34,899	64,081	0,000
Erro	8,714	16	0,545		
Total	435,070	20			
Total Corrigido	94,758	19			

a. R-Quadrado = 0,908 (R-Quadrado Ajustado = 0,891)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-1,318	0,607	-2,172	0,045	-2,605	-0,032
<i>DAC</i>	0,117	0,012	10,034	0,000	0,092	0,141
<i>PRA</i>	-6,542E-07	8,192E-08	-7,986	0,000	-8,279E-07	-4,806E-07
<i>DAC × PRA</i>	-6,088E-10	7,606E-11	-8,005	0,000	-7,701E-10	-4,476E-10

**TR113-03**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	35,907 <sup>a</sup>	5	7,181	31,086	0,000
Intercepto	0,348	1	0,348	1,508	0,248
<i>DAC</i>	8,626	1	8,626	37,341	0,000
<i>PRA</i>	3,401	1	3,401	14,721	0,003
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,725	1	0,725	3,137	0,107
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	2,294	1	2,294	9,931	0,010
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,349	1	2,349	10,167	0,010
Erro	2,310	10	0,231		
Total	353,280	16			
Total Corrigido	38,218	15			

a. R-Quadrado = 0,940 (R-Quadrado Ajustado = 0,909)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	35,183 <sup>a</sup>	4	8,796	31,881	0,000
Intercepto	0,218	1	0,218	0,790	0,393
<i>DAC</i>	25,959	1	25,959	94,091	0,000
<i>PRA</i>	4,880	1	4,880	17,688	0,001
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	4,025	1	4,025	14,589	0,003
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,694	1	1,694	6,140	0,031
Erro	3,035	11	0,276		
Total	353,280	16			
Total Corrigido	38,218	15			

a. R-Quadrado = 0,921 (R-Quadrado Ajustado = 0,892)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,648	0,729	-0,889	0,393	-2,253	0,957
<i>DAC</i>	0,114	0,012	9,700	0,000	0,088	0,139
<i>PRA</i>	-4,401E-07	1,046E-07	-4,206	0,001	-6,704E-07	-2,098E-07
<i>DAC × PRA</i>	-1,640E-09	4,293E-10	-3,820	0,003	-2,585E-09	-6,948E-10
<i>DAC × PRA</i> <sup>2</sup>	1,165E-17	4,701E-18	2,478	0,031	1,302E-18	2,200E-17

### TR113-04

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	106,270 <sup>a</sup>	5	21,254	25,903	0,000
Intercepto	1,573	1	1,573	1,918	0,182
<i>DAC</i>	0,463	1	0,463	0,565	0,462
<i>PRA</i>	0,675	1	0,675	0,823	0,376
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,352	1	0,352	0,429	0,520
<i>DAC × PRA</i>	0,276	1	0,276	0,336	0,569
<i>DAC × PRA</i> <sup>2</sup>	0,505	1	0,505	0,615	0,443
Erro	15,590	19	0,821		
Total	486,670	25			
Total Corrigido	121,860	24			

a. R-Quadrado = 0,872 (R-Quadrado Ajustado = 0,838)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	105,995 <sup>a</sup>	4	26,499	33,405	0,000
Intercepto	1,758	1	1,758	2,216	0,152
<i>DAC</i>	0,211	1	0,211	0,266	0,611
<i>PRA</i>	0,587	1	0,587	0,741	0,400
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,274	1	0,274	0,346	0,563
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,265	1	0,265	0,334	0,570
Erro	15,865	20	0,793		
Total	486,670	25			
Total Corrigido	121,860	24			

a. R-Quadrado = 0,870 (R-Quadrado Ajustado = 0,844)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	105,784 <sup>a</sup>	3	35,261	46,060	0,000
Intercepto	1,688	1	1,688	2,205	0,152
<i>PRA</i>	1,662	1	1,662	2,171	0,155
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,231	1	0,231	0,302	0,588
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,329	1	0,329	0,429	0,519
Erro	16,076	21	0,766		
Total	486,670	25			
Total Corrigido	121,860	24			

a. R-Quadrado = 0,868 (R-Quadrado Ajustado = 0,849)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	105,153 <sup>a</sup>	1	105,153	144,758	0,000
Intercepto	10,209	1	10,209	14,054	0,001
<i>PRA</i>	105,153	1	105,153	144,758	0,000
Erro	16,707	23	0,726		
Total	486,670	25			
Total Corrigido	121,860	24			

a. R-Quadrado = 0,863 (R-Quadrado Ajustado = 0,857)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	1,069	0,285	3,749	0,001	0,479	1,659
PRA	6,140E-08	5,103E-09	12,032	0,000	5,084E-08	7,196E-08

### TR113-13

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	26,810 <sup>a</sup>	5	5,362	58,916	0,000
Intercepto	0,111	1	0,111	1,224	0,297
<i>DAC</i>	0,720	1	0,720	7,915	0,020
<i>PRA</i>	0,095	1	0,095	1,045	0,333
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,027	1	0,027	0,295	0,600
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,196	1	0,196	2,149	0,177
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,289	1	0,289	3,179	0,108
Erro	0,819	9	0,091		
Total	120,880	15			
Total Corrigido	27,629	14			

a. R-Quadrado = 0,970 (R-Quadrado Ajustado = 0,954)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	26,783 <sup>a</sup>	4	6,696	79,148	0,000
Intercepto	0,195	1	0,195	2,308	0,160
<i>DAC</i>	1,236	1	1,236	14,613	0,003
<i>PRA</i>	0,243	1	0,243	2,870	0,121
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,206	1	0,206	2,441	0,149
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,272	1	0,272	3,211	0,103
Erro	0,846	10	0,085		
Total	120,880	15			
Total Corrigido	27,629	14			

a. R-Quadrado = 0,969 (R-Quadrado Ajustado = 0,957)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	26,577 <sup>a</sup>	3	8,859	92,590	0,000
Intercepto	0,887	1	0,887	9,274	0,011
<i>DAC</i>	3,178	1	3,178	33,213	0,000
<i>PRA</i>	0,084	1	0,084	0,880	0,368
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,142	1	0,142	1,483	0,249
Erro	1,052	11	0,096		
Total	120,880	15			
Total Corrigido	27,629	14			

a. R-Quadrado = 0,962 (R-Quadrado Ajustado = 0,952)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	26,493 <sup>a</sup>	2	13,246	139,842	0,000
Intercepto	1,434	1	1,434	15,134	0,002
<i>DAC</i>	4,979	1	4,979	52,559	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,380	1	0,380	4,017	0,068
Erro	1,137	12	0,095		
Total	120,880	15			
Total Corrigido	27,629	14			

a. R-Quadrado = 0,959 (R-Quadrado Ajustado = 0,952)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	26,112 <sup>a</sup>	1	26,112	223,748	0,000
Intercepto	1,054	1,000	1,054	9,033	0,010
<i>DAC</i>	26,112	1,000	26,112	223,748	0,000
Erro	1,517	13,000	0,117		
Total	120,880	15			
Total Corrigido	27,629	14			

a. R-Quadrado = 0,945 (R-Quadrado Ajustado = 0,941)

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,483	0,161	3,006	0,010	0,136	0,830
<i>DAC</i>	0,012	0,001	14,958	0,000	0,010	0,014

**TR113-14**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	262,654 <sup>a</sup>	5	52,531	156,429	0,000
Intercepto	0,098	1	0,098	0,292	0,594
<i>DAC</i>	0,624	1	0,624	1,858	0,185
<i>PRA</i>	2,049	1	2,049	6,103	0,020
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,092	1	0,092	0,273	0,605
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,069	1	0,069	0,207	0,653
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,084	1	0,084	0,249	0,622
Erro	8,731	26	0,336		
Total	1030,910	32			
Total Corrigido	271,385	31			

a. R-Quadrado = 0,968 (R-Quadrado Ajustado = 0,962)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	262,584 <sup>a</sup>	4	65,646	201,402	0,000
Intercepto	0,321	1	0,321	0,985	0,330
<i>DAC</i>	4,298	1	4,298	13,185	0,001
<i>PRA</i>	1,999	1	1,999	6,132	0,020
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,043	1	0,043	0,130	0,721
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,045	1	0,045	0,139	0,712
Erro	8,801	27	0,326		
Total	1030,910	32			
Total Corrigido	271,385	31			

a. R-Quadrado = 0,968 (R-Quadrado Ajustado = 0,963)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	262,542 <sup>a</sup>	3	87,514	277,098	0,000
Intercepto	0,344	1	0,344	1,088	0,306
<i>DAC</i>	11,304	1	11,304	35,793	0,000
<i>PRA</i>	16,898	1	16,898	53,505	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	6,895	1	6,895	21,833	0,000
Erro	8,843	28	0,316		
Total	1030,910	32			
Total Corrigido	271,385	31			

a. R-Quadrado = 0,967 (R-Quadrado Ajustado = 0,964)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,260	0,249	-1,043	0,306	-0,771	0,251
<i>DAC</i>	0,006	0,001	5,983	0,000	0,004	0,008
<i>PRA</i>	2,067E-07	2,826E-08	7,315	0,000	1,488E-07	2,646E-07
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	-2,349E-18	5,027E-19	-4,673	0,000	-3,378E-18	-1,319E-18

**TR113-15**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	272,482 <sup>a</sup>	5	54,496	280,034	0,000
Intercepto	0,255	1	0,255	1,310	0,264
<i>DAC</i>	1,438	1	1,438	7,388	0,012
<i>PRA</i>	0,077	1	0,077	0,397	0,535
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,901	1	0,901	4,632	0,042
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,709	1	0,709	3,643	0,069
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,008	1	0,008	0,041	0,841
Erro	4,476	23	0,195		
Total	910,070	29			
Total Corrigido	276,958	28			

a. R-Quadrado = 0,984 (R-Quadrado Ajustado = 0,980)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	272,474 <sup>a</sup>	4	68,119	364,603	0,000
Intercepto	0,363	1	0,363	1,945	0,176
<i>DAC</i>	1,478	1	1,478	7,910	0,010
<i>PRA</i>	0,211	1	0,211	1,128	0,299
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,937	1	0,937	5,016	0,035
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,902	1	0,902	4,829	0,038
Erro	4,484	24	0,187		
Total	910,070	29			
Total Corrigido	276,958	28			

a. R-Quadrado = 0,984 (R-Quadrado Ajustado = 0,981)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	272,263 <sup>a</sup>	3	90,754	483,290	0,000
Intercepto	0,270	1	0,270	1,439	0,242
<i>DAC</i>	14,009	1	14,009	74,603	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	5,802	1	5,802	30,896	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	4,276	1	4,276	22,772	0,000
Erro	4,695	25	0,188		
Total	910,070	29			
Total Corrigido	276,958	28			

a. R-Quadrado = 0,983 (R-Quadrado Ajustado = 0,981)

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,308	0,257	1,199	0,242	-0,221	0,836
<i>DAC</i>	0,013	0,002	8,637	0,000	0,010	0,017
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,397E-14	2,514E-15	5,558	0,000	8,797E-15	1,915E-14
<i>DAC</i> * <i>PRA</i>	-7,700E-10	1,614E-10	-4,772	0,000	-1,102E-09	-4,377E-10

**TR117-01**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	46,933 <sup>a</sup>	5	9,387	22,882	0,000
Intercepto	0,003	1	0,003	0,006	0,937
<i>DAC</i>	9,902	1	9,902	24,138	0,000
<i>PRA</i>	3,848	1	3,848	9,381	0,009
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,233	1	4,233	10,318	0,007
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	7,015	1	7,015	17,101	0,001
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,743	1	4,743	11,562	0,005
Erro	5,333	13	0,410		
Total	205,740	19			
Total Corrigido	52,266	18			

a. R-Quadrado = 0,898 (R-Quadrado Ajustado = 0,859)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,038	0,474	-0,080	0,937	-1,062	0,986
<i>DAC</i>	0,133	0,027	4,913	0,000	0,075	0,192
<i>PRA</i>	-1,164E-06	3,801E-07	-3,063	,009	-1,985E-06	-3,430E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	9,837E-14	3,062E-14	3,212	,007	3,221E-14	1,645E-13
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	-1,131E-08	2,734E-09	-4,135	,001	-1,721E-08	-5,400E-09
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,078E-16	3,169E-17	3,400	,005	3,930E-17	1,762E-16

**TR117-03**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	68,299 <sup>a</sup>	5	13,660	42,089	0,000
Intercepto	0,723	1	0,723	2,228	0,159
<i>DAC</i>	0,581	1	0,581	1,790	0,204
<i>PRA</i>	1,039	1	1,039	3,203	0,097
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,132	1	1,132	3,489	0,084
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,063	1	1,063	3,277	0,093
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,760	1	0,760	2,342	0,150
Erro	4,219	13	0,325		
Total	494,110	19			
Total Corrigido	72,518	18			

a. R-Quadrado = 0,942 (R-Quadrado Ajustado = 0,919)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	67,718 <sup>a</sup>	4	16,929	49,377	0,000
Intercepto	0,381	1	0,381	1,112	0,309
<i>PRA</i>	1,706	1	1,706	4,975	0,043
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,562	1	0,562	1,639	0,221
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,491	1	0,491	1,431	0,251
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,179	1	0,179	0,522	0,482
Erro	4,800	14	0,343		
Total	494,110	19			
Total Corrigido	72,518	18			

a. R-Quadrado = 0,934 (R-Quadrado Ajustado = 0,915)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	67,539 <sup>a</sup>	3	22,513	67,822	0,000
Intercepto	0,517	1	0,517	1,556	0,231
<i>PRA</i>	1,527	1	1,527	4,600	0,049
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,437	1	0,437	1,316	0,269
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,425	1	0,425	1,279	0,276
Erro	4,979	15	0,332		
Total	494,110	19			
Total Corrigido	72,518	18			

a. R-Quadrado = 0,931 (R-Quadrado Ajustado = 0,918)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	67,114 <sup>a</sup>	2	33,557	99,359	0,000
Intercepto	4,608	1	4,608	13,645	0,002
<i>PRA</i>	4,902	1	4,902	14,513	0,002
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,051	1	0,051	0,150	0,703
Erro	5,404	16	0,338		
Total	494,110	19			
Total Corrigido	72,518	18			

a. R-Quadrado = 0,925 (R-Quadrado Ajustado = 0,916)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	67,063 <sup>a</sup>	1	67,063	209,012	0,000
Intercepto	12,414	1	12,414	38,691	0,000
<i>PRA</i>	67,063	1	67,063	209,012	0,000
Erro	5,455	17	0,321		
Total	494,110	19			
Total Corrigido	72,518	18			

a. R-Quadrado = 0,925 (R-Quadrado Ajustado = 0,920)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	1,573	0,253	6,220	0,000	1,040	2,107
PRA	1,201E-07	8,305E-09	14,457	,000	1,025E-07	1,376E-07

**TR117-04**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	101,790 <sup>a</sup>	5	20,358	145,588	0,000
Intercepto	8,476	1	8,476	60,614	0,000
<i>DAC</i>	3,078	1	3,078	22,013	0,000
<i>PRA</i>	1,414	1	1,414	10,109	0,004
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,493	1	0,493	3,526	0,071
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,715	1	0,715	5,110	0,032
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,447	1	0,447	3,195	0,085
Erro	3,775	27	0,140		
Total	1007,270	33			
Total Corrigido	105,565	32			

a. R-Quadrado = 0,964 (R-Quadrado Ajustado = 0,958)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	101,343 <sup>a</sup>	4	25,336	168,015	0,000
Intercepto	16,273	1	16,273	107,917	0,000
<i>DAC</i>	3,393	1	3,393	22,500	0,000
<i>PRA</i>	2,322	1	2,322	15,398	0,001
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,726	1	0,726	4,817	0,037
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,711	1	0,711	4,715	0,039
Erro	4,222	28	0,151		
Total	1007,270	33			
Total Corrigido	105,565	32			

a. R-Quadrado = 0,960 (R-Quadrado Ajustado = 0,954)

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	2,155	0,207	10,388	0,000	1,730	2,580
<i>DAC</i>	0,031	0,006	4,743	0,000	0,017	0,044
<i>PRA</i>	-3,150E-07	8,027E-08	-3,924	0,001	-4,794E-07	-1,506E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	6,234E-15	2,840E-15	2,195	0,037	4,155E-16	1,205E-14
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	-5,028E-10	2,315E-10	-2,171	0,039	-9,771E-10	-2,847E-11

**TR117-05**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	155,586 <sup>a</sup>	5	31,117	215,481	0,000
Intercepto	0,179	1	0,179	1,238	0,275
<i>DAC</i>	0,100	1	0,100	0,691	0,413
<i>PRA</i>	0,540	1	0,540	3,737	0,063
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,174	1	0,174	1,204	0,282
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,017	1	0,017	0,118	0,734
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,227	1	2,227	15,423	0,001
Erro	4,043	28	0,144		
Total	1181,540	34			
Total Corrigido	159,629	33			

a. R-Quadrado = 0,975 (R-Quadrado Ajustado = 0,970)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	155,569 <sup>a</sup>	4	38,892	277,773	0,000
Intercepto	0,173	1	0,173	1,235	0,276
<i>DAC</i>	0,457	1	0,457	3,265	0,081
<i>PRA</i>	4,135	1	4,135	29,534	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,415	1	3,415	24,392	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,455	1	2,455	17,533	0,000
Erro	4,060	29	0,140		
Total	1181,540	34			
Total Corrigido	159,629	33			

a. R-Quadrado = 0,975 (R-Quadrado Ajustado = 0,971)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	155,112 <sup>a</sup>	3	51,704	343,352	0,000
Intercepto	0,147	1	0,147	0,978	0,331
<i>PRA</i>	11,292	1	11,292	74,985	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,040	1	4,040	26,829	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,031	1	3,031	20,126	0,000
Erro	4,518	30	0,151		
Total	1181,540	34			
Total Corrigido	159,629	33			

a. R-Quadrado = 0,972 (R-Quadrado Ajustado = 0,969)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,336	0,340	-0,989	0,331	-1,031	0,358
<i>PRA</i>	3,057E-07	3,530E-08	8,659	0,000	2,336E-07	3,778E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-5,251E-15	1,014E-15	-5,180	0,000	-7,321E-15	-3,181E-15
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,233E-18	7,206E-19	4,486	0,000	1,761E-18	4,705E-18

**TR117-06**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	156,673 <sup>a</sup>	5	31,335	603,002	0,000
Intercepto	0,357	1	0,357	6,873	0,018
<i>DAC</i>	0,538	1	0,538	10,353	0,005
<i>PRA</i>	0,628	1	0,628	12,086	0,003
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,966	1	0,966	18,592	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,013	1	1,013	19,498	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,103	1	0,103	1,979	0,178
Erro	0,883	17	0,052		
Total	533,600	23			
Total Corrigido	157,557	22			

a. R-Quadrado = 0,994 (R-Quadrado Ajustado = 0,993)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	156,570 <sup>a</sup>	4	39,143	714,403	0,000
Intercepto	0,261	1	0,261	4,759	0,043
<i>DAC</i>	0,739	1	0,739	13,485	0,002
<i>PRA</i>	0,964	1	0,964	17,602	0,001
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,935	1	0,935	17,066	0,001
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,913	1	0,913	16,672	0,001
Erro	0,986	18	0,055		
Total	533,600	23			
Total Corrigido	157,557	22			

a. R-Quadrado = 0,994 (R-Quadrado Ajustado = 0,992)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,434	0,199	2,182	0,043	0,016	0,852
<i>DAC</i>	-0,077	0,021	-3,672	0,002	-0,120	-0,033
<i>PRA</i>	9,786E-07	2,332E-07	4,195	0,001	4,885E-07	1,469E-06
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-1,590E-14	3,850E-15	-4,131	0,001	-2,399E-14	-7,816E-15
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,383E-09	3,386E-10	4,083	0,001	6,712E-10	2,094E-09

### TR117-07

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	112,023 <sup>a</sup>	5	22,405	53,128	0,000
Intercepto	0,017	1	0,017	0,041	0,841
<i>DAC</i>	0,180	1	0,180	0,428	0,519
<i>PRA</i>	0,053	1	0,053	0,125	0,727
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,003	1	0,003	0,007	0,933
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	8,273E-05	1	8,273E-05	0,000	0,989
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,044	1	0,044	0,104	0,750
Erro	11,386	27	0,422		
Total	604,500	33			
Total Corrigido	123,409	32			

a. R-Quadrado = 0,908 (R-Quadrado Ajustado = 0,891)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	112,023 <sup>a</sup>	4	28,006	68,869	0,000
Intercepto	0,019	1	0,019	0,046	0,832
<i>DAC</i>	2,380	1	2,380	5,852	0,022
<i>PRA</i>	0,516	1	0,516	1,269	0,269
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,059	1	0,059	0,145	0,706
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,044	1	0,044	0,109	0,744
Erro	11,386	28	0,407		
Total	604,500	33			
Total Corrigido	123,409	32			

a. R-Quadrado = 0,908 (R-Quadrado Ajustado = 0,895)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	111,979 <sup>a</sup>	3	37,326	94,699	0,000
Intercepto	0,205	1	0,205	0,521	0,476
<i>DAC</i>	2,392	1	2,392	6,068	0,020
<i>PRA</i>	0,815	1	0,815	2,067	0,161
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,059	1	0,059	0,150	0,702
Erro	11,431	29	0,394		
Total	604,500	33			
Total Corrigido	123,409	32			

a. R-Quadrado = 0,907 (R-Quadrado Ajustado = 0,898)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	111,920 <sup>a</sup>	2	55,960	146,115	0,000
Intercepto	1,256	1	1,256	3,280	0,080
<i>DAC</i>	3,358	1	3,358	8,768	0,006
<i>PRA</i>	1,592	1	1,592	4,156	0,050
Erro	11,490	30	0,383		
Total	604,500	33			
Total Corrigido	123,409	32			

a. R-Quadrado = 0,907 (R-Quadrado Ajustado = 0,901)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,413	0,228	1,811	0,080	-0,053	0,879
<i>DAC</i>	0,038	0,013	2,961	0,006	0,012	0,065
<i>PRA</i>	-2,980E-07	1,462E-07	-2,039	0,050	-5,965E-07	5,270E-10

**TR117-08**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	88,829 <sup>a</sup>	5	17,766	69,076	0,000
Intercepto	1,027	1	1,027	3,995	0,061
<i>DAC</i>	25,659	1	25,659	99,766	0,000
<i>PRA</i>	17,656	1	17,656	68,648	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,381	1	2,381	9,259	0,007
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	4,400	1	4,400	17,107	0,001
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	6,600	1	6,600	25,661	0,000
Erro	4,629	18	0,257		
Total	656,060	24			
Total Corrigido	93,458	23			

a. R-Quadrado = 0,950 (R-Quadrado Ajustado = 0,937)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,703	0,352	1,999	0,061	-0,036	1,442
<i>DAC</i>	0,115	0,012	9,988	0,000	0,091	0,139
<i>PRA</i>	-1,039E-06	1,254E-07	-8,285	0,000	-1,302E-06	-7,755E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,342E-14	4,411E-15	3,043	0,007	4,155E-15	2,269E-14
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	-1,559E-09	3,769E-10	-4,136	0,001	-2,351E-09	-7,670E-10
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,949E-18	3,848E-19	5,066	0,000	1,141E-18	2,758E-18

### TR121-04

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	87,306 <sup>a</sup>	6	14,551	15,012	0,000
Intercepto	0,231	1	0,231	0,238	0,631
<i>PRA</i>	1,326	1	1,326	1,368	0,257
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,710	1	0,710	0,732	0,403
<i>DAC</i>	0,319	1	0,319	0,329	0,573
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,484	1	0,484	0,499	0,488
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,433	1	0,433	0,447	0,512
<i>PRA</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,497	1	0,497	0,513	0,483
Erro	18,416	19	0,969		
Total	556,000	26			
Total Corrigido	105,722	25			

a. R-Quadrado = 0,826 (R-Quadrado Ajustado = 0,771)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	86,987 <sup>a</sup>	5	17,397	18,572	0,000
Intercepto	0,171	1	0,171	0,182	0,674
<i>PRA</i>	3,755	1	3,755	4,009	0,059
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,669	1	0,669	0,714	0,408
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,295	1	0,295	0,315	0,581
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,116	1	0,116	0,124	0,728
<i>PRA</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,180	1	0,180	0,192	0,666
Erro	18,735	20	0,937		
Total	556,000	26			
Total Corrigido	105,722	25			

a. R-Quadrado = 0,823 (R-Quadrado Ajustado = 0,778)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	86,870 <sup>a</sup>	4	21,718	24,193	0,000
Intercepto	0,080	1	0,080	0,089	0,768
<i>PRA</i>	4,783	1	4,783	5,328	0,031
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,595	1	1,595	1,777	0,197
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,239	1	0,239	0,266	0,611
<i>PRA</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,314	1	0,314	0,350	0,560
Erro	18,851	21	0,898		
Total	556,000	26			
Total Corrigido	105,722	25			

a. R-Quadrado = 0,822 (R-Quadrado Ajustado = 0,788)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	86,631 <sup>a</sup>	3	28,877	33,278	0,000
Intercepto	0,112	1	0,112	0,130	0,722
<i>PRA</i>	5,454	1	5,454	6,286	0,020
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,408	1	1,408	1,622	0,216
<i>PRA</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,809	1	0,809	0,932	0,345
Erro	19,090	22	0,868		
Total	556,000	26			
Total Corrigido	105,722	25			

a. R-Quadrado = 0,819 (R-Quadrado Ajustado = 0,795)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	85,822 <sup>a</sup>	2	42,911	49,598	0,000
Intercepto	0,361	1	0,361	0,418	0,524
<i>PRA</i>	17,345	1	17,345	20,048	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,067	1	4,067	4,701	0,041
Erro	19,899	23	0,865		
Total	556,000	26			
Total Corrigido	105,722	25			

a. R-Quadrado = 0,812 (R-Quadrado Ajustado = 0,795)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,384	0,594	0,646	0,524	-0,846	1,614
<i>PRA</i>	2,220E-07	4,958E-08	4,478	0,000	1,194E-07	3,245E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-1,760E-15	8,117E-16	-2,168	0,041	-3,439E-15	-8,078E-17

**TR121-07**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	109,026 <sup>a</sup>	5	21,805	35,583	0,000
Intercepto	0,128	1	0,128	0,208	0,658
<i>DAC</i>	0,195	1	0,195	0,318	0,585
<i>PRA</i>	0,022	1	0,022	0,037	0,852
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,009	1	0,009	0,015	0,903
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,020	1	0,020	0,032	0,861
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,133	1	0,133	0,218	0,651
Erro	6,128	10	0,613		
Total	429,330	16			
Total Corrigido	115,154	15			

a. R-Quadrado = 0,947 (R-Quadrado Ajustado = 0,920)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	109,017 <sup>a</sup>	4	27,254	48,847	0,000
Intercepto	0,121	1	0,121	0,216	0,651
<i>DAC</i>	0,742	1	0,742	1,330	0,273
<i>PRA</i>	0,062	1	0,062	0,111	0,745
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,046	1	0,046	0,083	0,779
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,160	1	0,160	0,286	0,603
Erro	6,137	11	0,558		
Total	429,330	16			
Total Corrigido	115,154	15			

a. R-Quadrado = 0,947 (R-Quadrado Ajustado = 0,927)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	108,971 <sup>a</sup>	3	36,324	70,489	0,000
Intercepto	0,118	1	0,118	0,229	0,641
<i>DAC</i>	3,507	1	3,507	6,806	0,023
<i>PRA</i>	0,024	1	0,024	0,046	0,833
<i>DAC × PRA</i> <sup>2</sup>	1,229	1	1,229	2,385	0,148
Erro	6,184	12	0,515		
Total	429,330	16			
Total Corrigido	115,154	15			

a. R-Quadrado = 0,946 (R-Quadrado Ajustado = 0,933)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	108,947 <sup>a</sup>	2	54,473	114,079	0,000
Intercepto	0,095	1	0,095	0,199	0,663
<i>DAC</i>	10,422	1	10,422	21,827	0,000
<i>DAC × PRA</i> <sup>2</sup>	1,967	1	1,967	4,119	0,063
Erro	6,208	13	0,478		
Total	429,330	16			
Total Corrigido	115,154	15			

a. R-Quadrado = 0,946 (R-Quadrado Ajustado = 0,938)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	106,980 <sup>a</sup>	1	106,980	183,218	0,000
Intercepto	2,903	1	2,903	4,971	0,043
<i>DAC</i>	106,980	1	106,980	183,218	0,000
Erro	8,175	14	0,584		
Total	429,330	16			
Total Corrigido	115,154	15			

a. R-Quadrado = 0,929 (R-Quadrado Ajustado = 0,924)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,989	0,444	-2,230	0,043	-1,941	-0,038
<i>DAC</i>	0,042	0,003	13,536	0,000	0,036	0,049

### TR121-08

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	116,295 <sup>a</sup>	5	23,259	18,056	0,000
Intercepto	1,073	1	1,073	0,833	0,377
<i>DAC</i>	1,107	1	1,107	0,860	0,370
<i>PRA</i>	0,156	1	0,156	0,121	0,733
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,366	1	0,366	0,284	0,602
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,524	1	0,524	0,406	0,534
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,259	1	0,259	0,201	0,661
Erro	18,035	14	1,288		
Total	749,270	20			
Total Corrigido	134,330	19			

a. R-Quadrado = 0,866 (R-Quadrado Ajustado = 0,818)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	116,139 <sup>a</sup>	4	29,035	23,943	0,000
Intercepto	0,995	1	0,995	0,821	0,379
<i>DAC</i>	2,327	1	2,327	1,919	0,186
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,523	1	0,523	0,432	0,521
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,440	1	0,440	0,363	0,556
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,315	1	0,315	0,260	0,618
Erro	18,190	15	1,213		
Total	749,270	20			
Total Corrigido	134,330	19			

a. R-Quadrado = 0,865 (R-Quadrado Ajustado = 0,828)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	115,824 <sup>a</sup>	3	38,608	33,381	0,000
Intercepto	4,196	1	4,196	3,628	0,075
<i>DAC</i>	7,477	1	7,477	6,465	0,022
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,249	1	0,249	0,216	0,649
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,132	1	0,132	0,114	0,740
Erro	18,506	16	1,157		
Total	749,270	20			
Total Corrigido	134,330	19			

a. R-Quadrado = 0,862 (R-Quadrado Ajustado = 0,836)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	115,692 <sup>a</sup>	2	57,846	52,762	0,000
Intercepto	6,104	1	6,104	5,568	0,031
<i>DAC</i>	9,204	1	9,204	8,395	0,010
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,404	1	0,404	0,369	0,552
Erro	18,638	17	1,096		
Total	749,270	20			
Total Corrigido	134,330	19			

a. R-Quadrado = 0,861 (R-Quadrado Ajustado = 0,845)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	115,288 <sup>a</sup>	1	115,288	108,979	0,000
Intercepto	7,764	1	7,764	7,339	0,014
<i>DAC</i>	115,288	1	115,288	108,979	0,000
Erro	19,042	18	1,058		
Total	749,270	20			
Total Corrigido	134,330	19			

a. R-Quadrado = 0,858 (R-Quadrado Ajustado = 0,850)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	1,272	0,470	2,709	0,014	0,286	2,258
DAC	0,043	0,004	10,439	0,000	0,034	0,052

### TR122-01

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	59,286 <sup>a</sup>	5	11,857	17,196	0,000
Intercepto	0,023	1	0,023	0,034	0,857
DAC	0,988	1	0,988	1,432	0,249
PRA	0,104	1	0,104	0,151	0,703
PRA <sup>2</sup>	0,086	1	0,086	0,125	0,728
DAC × PRA	0,159	1	0,159	0,231	0,637
DAC × PRA <sup>2</sup>	0,002	1	0,002	0,003	0,955
Erro	11,032	16	0,690		
Total	436,050	22			
Total Corrigido	70,319	21			

a. R-Quadrado = 0,843 (R-Quadrado Ajustado = 0,794)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	59,284 <sup>a</sup>	4	14,821	22,833	0,000
Intercepto	0,056	1	0,056	0,087	0,772
DAC	1,035	1	1,035	1,595	0,224
PRA	0,254	1	0,254	0,391	0,540
PRA <sup>2</sup>	0,185	1	0,185	0,286	0,600
DAC × PRA	0,180	1	0,180	0,277	0,606
Erro	11,035	17	0,649		
Total	436,050	22			
Total Corrigido	70,319	21			

a. R-Quadrado = 0,843 (R-Quadrado Ajustado = 0,806)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	59,104 <sup>a</sup>	3	19,701	31,623	0,000
Intercepto	0,247	1	0,247	0,396	0,537
<i>DAC</i>	3,182	1	3,182	5,107	0,036
<i>PRA</i>	0,074	1	0,074	0,119	0,734
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,006	1	0,006	0,010	0,923
Erro	11,214	18	0,623		
Total	436,050	22			
Total Corrigido	70,319	21			

a. R-Quadrado = 0,841 (R-Quadrado Ajustado = 0,814)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	59,098 <sup>a</sup>	2	29,549	50,038	0,000
Intercepto	0,580	1	0,580	0,982	0,334
<i>DAC</i>	3,641	1	3,641	6,165	0,023
<i>PRA</i>	0,118	1	0,118	0,200	0,660
Erro	11,220	19	0,591		
Total	436,050	22			
Total Corrigido	70,319	21			

a. R-Quadrado = 0,840 (R-Quadrado Ajustado = 0,824)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	58,980 <sup>a</sup>	1	58,980	104,036	0,000
Intercepto	0,700	1	0,700	1,234	0,280
<i>DAC</i>	58,980	1	58,980	104,036	0,000
Erro	11,338	20	0,567		
Total	436,050	22			
Total Corrigido	70,319	21			

a. R-Quadrado = 0,839 (R-Quadrado Ajustado = 0,831)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,435	0,392	1,111	0,280	-0,382	1,252
<i>DAC</i>	0,051	0,005	10,200	0,000	0,041	0,062

**TR122-07**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	119,950 <sup>a</sup>	5	23,990	45,559	0,000
Intercepto	0,218	1	0,218	0,414	0,530
<i>DAC</i>	0,023	1	0,023	0,044	0,836
<i>PRA</i>	0,005	1	0,005	0,010	0,921
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,001	1	0,001	0,002	0,967
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,122	1	0,122	0,231	0,638
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,136	1	0,136	0,258	0,619
Erro	7,372	14	0,527		
Total	593,900	20			
Total Corrigido	127,322	19			

a. R-Quadrado = 0,942 (R-Quadrado Ajustado = 0,921)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	119,949 <sup>a</sup>	4	29,987	61,008	0,000
Intercepto	0,295	1	0,295	0,600	0,451
<i>DAC</i>	0,096	1	0,096	0,196	0,664
<i>PRA</i>	0,037	1	0,037	0,075	0,789
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,153	1	0,153	0,312	0,585
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,220	1	0,220	0,448	0,513
Erro	7,373	15	0,492		
Total	593,900	20			
Total Corrigido	127,322	19			

a. R-Quadrado = 0,942 (R-Quadrado Ajustado = 0,927)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	119,912 <sup>a</sup>	3	39,971	86,312	0,000
Intercepto	0,294	1	0,294	0,635	0,437
<i>DAC</i>	0,241	1	0,241	0,519	0,482
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,131	1	0,131	0,284	0,602
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,189	1	0,189	0,409	0,532
Erro	7,410	16	0,463		
Total	593,900	20			
Total Corrigido	127,322	19			

a. R-Quadrado = 0,942 (R-Quadrado Ajustado = 0,931)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	119,781 <sup>a</sup>	2	59,891	135,016	0,000
Intercepto	0,247	1	0,247	0,557	0,466
<i>DAC</i>	22,096	1	22,096	49,813	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,332	1	0,332	0,749	0,399
Erro	7,541	17	0,444		
Total	593,900	20			
Total Corrigido	127,322	19			

a. R-Quadrado = 0,942 (R-Quadrado Ajustado = 0,934)

5ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	119,449 <sup>a</sup>	1	119,449	273,085	0,000
Intercepto	1,640	1	1,640	3,750	0,069
<i>DAC</i>	119,449	1	119,449	273,085	0,000
Erro	7,873	18	0,437		
Total	593,900	20			
Total Corrigido	127,322	19			

a. R-Quadrado = 0,938 (R-Quadrado Ajustado = 0,935)

### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,575	0,297	1,936	0,069	-0,049	1,199
<i>DAC</i>	0,038	0,002	16,525	0,000	0,033	0,043

**TR122-08**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	195,469 <sup>a</sup>	5	39,094	170,870	0,000
Intercepto	0,284	1	0,284	1,243	0,278
<i>DAC</i>	2,262	1	2,262	9,886	0,005
<i>PRA</i>	3,445	1	3,445	15,058	0,001
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,074	1	2,074	9,067	0,007
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,277	1	1,277	5,584	0,028
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,015	1	1,015	4,438	0,048
Erro	4,576	20	0,229		
Total	762,230	26			
Total Corrigido	200,045	25			

a. R-Quadrado = 0,977 (R-Quadrado Ajustado = 0,971)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,455	0,408	-1,115	0,278	-1,305	0,396
<i>DAC</i>	-0,075	0,024	-3,144	0,005	-0,125	-0,025
<i>PRA</i>	1,735E-06	4,472E-07	3,880	0,001	8,024E-07	2,668E-06
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-5,191E-14	1,724E-14	-3,011	0,007	-8,787E-14	-1,595E-14
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	2,237E-09	9,467E-10	2,363	0,028	2,622E-10	4,212E-09
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,541E-17	7,316E-18	2,107	0,048	1,513E-19	3,067E-17

**TR131-10**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	168,960 <sup>a</sup>	5	33,792	91,052	0,000
Intercepto	6,232	1	6,232	16,791	0,000
<i>DAC</i>	0,174	1	0,174	0,469	0,498
<i>PRA</i>	0,025	1	0,025	0,066	0,798
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,301	1	0,301	0,811	0,374
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,552	1	0,552	1,487	0,230
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,519	1	0,519	1,397	0,245
Erro	13,732	37	0,371		
Total	1384,210	43			
Total Corrigido	182,692	42			

a. R-Quadrado = 0,925 (R-Quadrado Ajustado = 0,915)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	168,935 <sup>a</sup>	4	42,234	116,664	0,000
Intercepto	9,973	1	9,973	27,548	0,000
<i>PRA</i>	0,682	1	0,682	1,885	0,178
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,633	1	0,633	1,748	0,194
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	2,190	1	2,190	6,048	0,019
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,494	1	0,494	1,365	0,250
Erro	13,756	38	0,362		
Total	1384,210	43			
Total Corrigido	182,692	42			

a. R-Quadrado = 0,925 (R-Quadrado Ajustado = 0,917)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	168,441 <sup>a</sup>	3	56,147	153,660	0,000
Intercepto	14,827	1	14,827	40,578	0,000
<i>PRA</i>	15,508	1	15,508	42,442	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,931	1	1,931	5,283	0,027
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,923	1	1,923	5,262	0,027
Erro	14,251	39	0,365		
Total	1384,210	43			
Total Corrigido	182,692	42			

a. R-Quadrado = 0,922 (R-Quadrado Ajustado = 0,916)

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	1,764	0,277	6,370	0,000	1,204	2,324
<i>PRA</i>	9,372E-08	1,439E-08	6,515	0,000	6,462E-08	1,228E-07
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-2,759E-15	1,200E-15	-2,299	0,027	-5,188E-15	-3,312E-16
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,832E-10	1,670E-10	2,294	0,027	4,529E-11	7,211E-10

**TR131-11A**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	65,691 <sup>a</sup>	5	13,138	19,675	0,000
Intercepto	0,103	1	0,103	0,155	0,698
<i>DAC</i>	0,005	1	0,005	0,007	0,933
<i>PRA</i>	2,274	1	2,274	3,405	0,079
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,821	1	3,821	5,722	0,026
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,063	1	0,063	0,095	0,761
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,743	1	0,743	1,113	0,303
Erro	14,023	21	0,668		
Total	552,640	27			
Total Corrigido	79,714	26			

a. R-Quadrado = 0,824 (R-Quadrado Ajustado = 0,782)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	65,686 <sup>a</sup>	4	16,422	25,754	0,000
Intercepto	0,229	1	0,229	0,360	0,555
<i>PRA</i>	2,313	1	2,313	3,627	0,070
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	4,291	1	4,291	6,729	0,017
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,127	1	0,127	0,198	0,660
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,018	1	1,018	1,596	0,220
Erro	14,028	22	0,638		
Total	552,640	27			
Total Corrigido	79,714	26			

a. R-Quadrado = 0,824 (R-Quadrado Ajustado = 0,792)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	65,560 <sup>a</sup>	3	21,853	35,510	0,000
Intercepto	1,416	1	1,416	2,300	0,143
<i>PRA</i>	19,567	1	19,567	31,795	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	13,514	1	13,514	21,960	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	13,428	1	13,428	21,820	0,000
Erro	14,154	23	0,615		
Total	552,640	27			
Total Corrigido	79,714	26			

a. R-Quadrado = 0,822 (R-Quadrado Ajustado = 0,799)

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-1,247	0,822	-1,517	0,143	-2,947	0,454
<i>PRA</i>	2,076E-06	3,681E-07	5,639	,000	1,314E-06	2,837E-06
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-2,840E-13	6,060E-14	-4,686	,000	-4,093E-13	-1,586E-13
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,470E-15	5,288E-16	4,671	,000	1,376E-15	3,564E-15

**TR133-09**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	144,218 <sup>a</sup>	5	28,844	19,982	0,000
Intercepto	2,896	1	2,896	2,006	0,168
<i>DAC</i>	0,681	1	0,681	0,472	0,498
<i>PRA</i>	0,608	1	0,608	0,421	0,522
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	8,536	1	8,536	5,914	0,022
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	5,783	1	5,783	4,006	0,055
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,182	1	1,182	0,819	0,373
Erro	40,416	28	1,443		
Total	667,270	34			
Total Corrigido	184,634	33			

a. R-Quadrado = 0,781 (R-Quadrado Ajustado = 0,742)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	143,610 <sup>a</sup>	4	35,903	25,380	0,000
Intercepto	2,908	1	2,908	2,056	0,162
<i>DAC</i>	0,084	1	0,084	0,060	0,809
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	34,574	1	34,574	24,441	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	12,796	1	12,796	9,046	0,005
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,528	1	1,528	1,080	0,307
Erro	41,024	29	1,415		
Total	667,270	34			
Total Corrigido	184,634	33			

a. R-Quadrado = 0,778 (R-Quadrado Ajustado = 0,744)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	143,526 <sup>a</sup>	3	47,842	34,914	0,000
Intercepto	24,226	1	24,226	17,680	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	35,950	1	35,950	26,236	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	22,914	1	22,914	16,722	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	17,565	1	17,565	12,819	0,001
Erro	41,109	30	1,370		
Total	667,270	34			
Total Corrigido	184,634	33			

a. R-Quadrado = 0,777 (R-Quadrado Ajustado = 0,755)

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	1,453	0,346	4,205	0,000	0,747	2,159
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	1,577E-14	3,078E-15	5,122	,000	9,480E-15	2,205E-14
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	-1,941E-09	4,745E-10	-4,089	,000	-2,910E-09	-9,714E-10
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	-3,635E-18	1,015E-18	-3,580	,001	-5,708E-18	-1,561E-18

**TR133-15**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	172,530 <sup>a</sup>	5	34,506	264,315	0,000
Intercepto	0,059	1	0,059	0,454	0,507
<i>DAC</i>	1,386	1	1,386	10,619	0,003
<i>PRA</i>	0,245	1	0,245	1,874	0,184
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,107	1	0,107	0,820	0,375
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,787	1	0,787	6,028	0,022
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	2,958	1	2,958	22,658	0,000
Erro	3,003	23	0,131		
Total	582,970	29			
Total Corrigido	175,532	28			

a. R-Quadrado = 0,983 (R-Quadrado Ajustado = 0,979)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	172,423 <sup>a</sup>	4	43,106	332,689	0,000
Intercepto	0,008	1	0,008	0,065	0,800
<i>DAC</i>	6,398	1	6,398	49,379	0,000
<i>PRA</i>	0,484	1	0,484	3,738	0,065
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	1,999	1	1,999	15,426	0,001
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,016	1	3,016	23,281	0,000
Erro	3,110	24	0,130		
Total	582,970	29			
Total Corrigido	175,532	28			

a. R-Quadrado = 0,982 (R-Quadrado Ajustado = 0,979)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	171,938 <sup>a</sup>	3	57,313	398,669	0,000
Intercepto	0,046	1	0,046	0,322	0,576
<i>DAC</i>	6,245	1	6,245	43,441	0,000
<i>DAC × PRA</i>	3,036	1	3,036	21,120	0,000
<i>DAC × PRA<sup>2</sup></i>	4,363	1	4,363	30,347	0,000
Erro	3,594	25	0,144		
Total	582,970	29			
Total Corrigido	175,532	28			

a. R-Quadrado = 0,980 (R-Quadrado Ajustado = 0,977)

#### Parâmetros Estimados

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	-0,147	0,259	-0,567	0,576	-0,681	0,387
<i>DAC</i>	0,023	0,003	6,591	0,000	0,016	0,030
<i>DAC × PRA</i>	-5,805E-10	1,263E-10	-4,596	,000	-8,407E-10	-3,204E-10
<i>DAC × PRA<sup>2</sup></i>	7,066E-18	1,283E-18	5,509	,000	4,424E-18	9,707E-18

**TR134-04**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	103,361 <sup>a</sup>	5	20,672	23,218	0,000
Intercepto	1,097	1	1,097	1,232	0,279
<i>DAC</i>	0,079	1	0,079	0,089	0,769
<i>PRA</i>	0,338	1	0,338	0,379	0,544
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,222	1	0,222	0,250	0,622
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,226	1	0,226	0,253	0,620
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,120	1	0,120	0,134	0,717
Erro	19,588	22	0,890		
Total	811,000	28			
Total Corrigido	122,949	27			

a. R-Quadrado = 0,841 (R-Quadrado Ajustado = 0,804)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	103,282 <sup>a</sup>	4	25,821	30,197	0,000
Intercepto	1,079	1	1,079	1,262	0,273
<i>PRA</i>	2,626	1	2,626	3,071	0,093
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,888	1	3,888	4,547	0,044
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,634	1	3,634	4,250	0,051
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,518	1	0,518	0,606	0,444
Erro	19,667	23	0,855		
Total	811,000	28			
Total Corrigido	122,949	27			

a. R-Quadrado = 0,840 (R-Quadrado Ajustado = 0,812)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	102,764 <sup>a</sup>	3	34,255	40,729	0,000
Intercepto	3,980	1	3,980	4,732	0,040
<i>PRA</i>	4,181	1	4,181	4,972	0,035
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	3,371	1	3,371	4,009	0,057
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	4,104	1	4,104	4,880	0,037
Erro	20,185	24	0,841		
Total	811,000	28			
Total Corrigido	122,949	27			

a. R-Quadrado = 0,836 (R-Quadrado Ajustado = 0,815)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	99,392 <sup>a</sup>	2	49,696	52,742	0,000
Intercepto	1,599	1	1,599	1,697	0,205
<i>PRA</i>	20,443	1	20,443	21,695	0,000
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	4,356	1	4,356	4,623	0,041
Erro	23,556	25	0,942		
Total	811,000	28			
Total Corrigido	122,949	27			

a. R-Quadrado = 0,808 (R-Quadrado Ajustado = 0,793)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	0,756	0,580	1,303	0,205	-0,439	1,951
<i>PRA</i>	2,058E-07	4,418E-08	4,658	,000	1,148E-07	2,968E-07
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	-2,394E-10	1,114E-10	-2,150	,041	-4,687E-10	-1,008E-11

**TR151-05**

1ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	13,230 <sup>a</sup>	5	2,646	176,273	0,006
Intercepto	0,172	1	0,172	11,452	0,077
<i>DAC</i>	0,003	1	0,003	0,212	0,690
<i>PRA</i>	0,001	1	0,001	0,079	0,805
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,025	1	0,025	1,655	0,327
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,038	1	0,038	2,542	0,252
<i>DAC</i> × <i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,000	1	0,000	0,016	0,911
Erro	0,030	2	0,015		
Total	237,980	8			
Total Corrigido	13,260	7			

a. R-Quadrado = 0,998 (R-Quadrado Ajustado = 0,992)

2ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	13,230 <sup>a</sup>	4	3,307	327,868	0,000
Intercepto	0,407	1	0,407	40,374	0,008
<i>DAC</i>	0,011	1	0,011	1,110	0,369
<i>PRA</i>	0,010	1	0,010	0,979	0,395
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,044	1	0,044	4,376	0,128
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,047	1	0,047	4,680	0,119
Erro	0,030	3	0,010		
Total	237,980	8			
Total Corrigido	13,260	7			

a. R-Quadrado = 0,998 (R-Quadrado Ajustado = 0,995)

3ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	13,220 <sup>a</sup>	3	4,407	439,084	0,000
Intercepto	1,646	1	1,646	164,030	0,000
<i>DAC</i>	0,007	1	0,007	0,725	0,443
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,123	1	0,123	12,216	0,025
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,129	1	0,129	12,898	0,023
Erro	0,040	4	0,010		
Total	237,980	8			
Total Corrigido	13,260	7			

a. R-Quadrado = 0,997 (R-Quadrado Ajustado = 0,995)

4ª Rodada:

Variável Dependente: DMA

Fonte	Soma dos Quadrados Tipo III	gdl	Média dos Quadrados	F	Sig.
Modelo Corrigido	13,213 <sup>a</sup>	2	6,606	696,617	0,000
Intercepto	8,682	1	8,682	915,456	0,000
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	0,319	1	0,319	33,605	0,002
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	0,385	1	0,385	40,576	0,001
Erro	0,047	5	0,009		
Total	237,980	8			
Total Corrigido	13,260	7			

a. R-Quadrado = 0,996 (R-Quadrado Ajustado = 0,995)

**Parâmetros Estimados**

Variável Dependente: DMA

Parâmetro	B	Erro Padrão	t	Sig.	95% Intervalo de Confiança	
					Limite Inferior	Limite Superior
Intercepto	3,129	0,103	30,257	0,000	2,863	3,395
<i>PRA</i> <sup>2</sup>	-2,134E-14	3,681E-15	-5,797	,002	-3,080E-14	-1,188E-14
<i>DAC</i> × <i>PRA</i>	3,631E-09	5,700E-10	6,370	,001	2,166E-09	5,096E-09