

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Rafael Rodrigues Fortes

**ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA PREDIÇÃO DO
DESGASTE DE BUCHAS POLIMÉRICAS EM
TRABALHOS ROTATIVOS COM EIXOS METÁLICOS**

Taubaté – SP

2018

Rafael Rodrigues Fortes

**ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA PREDIÇÃO DO
DESGASTE DE BUCHAS POLIMÉRICAS EM
TRABALHOS ROTATIVOS COM EIXOS METÁLICOS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo
Curso Mestrado Profissional em Engenharia
Mecânica do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Materiais
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Taubaté – SP

2018

Ficha catalográfica elaborada por
Liliane Castro – Bibliotecária CRB-8/6748

S729r Fortes, Rafael Rodrigues

Estudo tribológico para predição do desgaste de buchas poliméricas em trabalhos rotativos com eixos metálicos / Rafael Rodrigues Fortes. - 2018.
169f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.

Orientação: Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Polímeros. 2. Desgaste. 3. Planejamento de Experimento Fatorial.
4. Buchas Poliméricas. 5. Tribologia. I. Título.

RAFAEL RODRIGUES FORTES

**ESTUDO TRIBOLÓGICO PARA PREDIÇÃO DO DESGASTE DE BUCHAS
POLIMÉRICAS EM TRABALHOS ROTATIVOS COM EIXOS METÁLICOS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo
Curso Mestrado Profissional em Engenharia
Mecânica do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Energia e Materiais
Orientador: Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Rubens de Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dra. Ana Beatriz Ramos Moreira Abrahão

Faculdade de Tecnologia de
Pindamonhangaba

Assinatura _____

Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Dedico este trabalho a minha namorada Ariane Rodrigues da Cunha pela paciência e ajuda durante todo esse período. Ao meu pai pelas longas conversas e por ter me concedido a oportunidade de receber uma boa educação onde nunca me desmotivou em nenhuma circunstância. Ao meu pai Carlos Fortes e Nelson Machado pelos incentivo e longas discussões técnicas. Agradeço a minha mãe, minha madrasta e minha avó pela paciência e por me ajudar no processo evolutivo da minha vida. Aos meus companheiros de trabalho Alex Costa, Fabio Santos, Luciano Barbosa, Marcelo Toledo, Anil Bhala, Michel Ozorak, Rashi Shrivastava e aos meus chefes Antonio Santos e David Rieland por ter concedido essa grande oportunidade em minha carreira. Aos meus amigos William Ribeiro e Leonardo Porto pelas longas conversas durante todo esse processo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. José Rubens de Camargo por ter me orientado com grande sabedoria e pela grande sabedoria e experiência.

Ao Vice-Presidente de Operações da Gates South America, Richard Hoffner, por todo o apoio e momentos de motivação para a realização deste projeto.

Ao Diretor de Engenharia Gates Américas, David Patrick Rieland e ao Gerente de Engenharia América do Sul Antonio Carlos Esteves de Paula Santos de conceder essa oportunidade de estudo e ao grande suporte nas horas difíceis.

Aos Gerentes de Processos e Melhoria Contínua da Gates South América, Ayrton Salvo Junior e Marcelo de Toledo, pelo suporte e ajuda no planejamento do estudo e o incentivo e ajuda no uso das ferramentas estatísticas.

Ao profissionalismo e dedicação da Rashi Shrivastava, Michel Ozorak, Brandon Mark Hooper sem esses profissionais seria impossível concluir esse estudo.

“A Matemática é a única linguagem que temos em comum com a natureza.”

Stephen Hawking

“E se o mundo não corresponde em todos os aspectos a nossos desejos, é culpa da ciência ou dos que querem impor seus desejos ao mundo?”

Carl Sagan

RESUMO

A exigência cada vez maior por sistemas com maior confiabilidade, e demandas por meios de predição para a antecipação da falha devido ao desgaste de sistemas bucha-eixo metálico, faz com que cada vez mais se procurem meios para resolver esse problema. Neste sentido essa dissertação tem como principal objetivo mostrar quais fatores dentre eles amplitude, frequência e altura da mola influência no desgaste de bucha polimérica PA 66, e através disso foi proposto um modelo matemático para predição do desgaste com as seguintes variáveis de saída y 's como % de desgaste da bucha em relação a massa, % de desgaste em relação a espessura do flange da bucha e % de desgaste em relação a espessura do corpo da bucha. Definiu-se um planejamento de experimento fatorial de 2^3 (2 níveis e 3 fatores) com adição de três pontos centrais totalizando 11 corridas de 144 horas cada, e cada corrida com duas amostras. Analisou-se os resultados através do *software* Minitab® onde verificou-se que na variável % de desgaste por massa que os fatores amplitude e frequência foram significantes para o modelo, no modelo de % de desgaste da espessura do flange os fatores significantes foram amplitude e altura da mola, e para o modelo de % de desgaste do corpo da bucha os fatores significantes voltaram a ser amplitude e frequência. Percebeu-se que nos três y 's propostos o fator amplitude foi significativo para todas as variáveis de saída. Dessas três análises foi proposto e validado um modelo de regressão linear para predição do desgaste de cada variável de saída, além disso, através das imagens fotográficas foi possível verificar o filme polimérico transferido, constatando-se desgaste interfacial e ou adesivo. Esse método de análise permitiu para os próximos projetos propostos dar ênfase nesses fatores durante a validação do sistema no motor, e se possível até mesmo antes da validação do produto propor ações para atenuar o desgaste através do controle desses fatores estudados na análise fatorial, sem afetar as características finais do esticador.

Palavras Chaves: Polímeros. Desgaste. Planejamento de Experimento Fatorial. Buchas Poliméricas. Tribologia.

ABSTRACT

The increasing demand for greater reliability and demands for prediction ways to anticipate the failure due to wear on bushing-shaft systems, results in progressively more to find ways to solve this issue. In this sense the dissertation has as main aim show which factors among them amplitude, frequency and spring height influences on the wearing of the PA 66 polymeric bushing, and through this was proposed a mathematic model for wearing prediction with the following variables y's as % of bushing wearing by mass, % of bushing wearing by flange thickness, % of bushing wearing by tube thickness. It was defined a factorial design of experiment of 2^3 (2 levels and 3 factors) with addition of the three center points totalizing 11 runs of each run 144 hours, and each run with two samples. The results were analyzed through the Minitab® where was checked on the variable % of bushing wearing by weight that the factors amplitude and frequency were significant for the model, on the model of the % of bushing wearing by flange thickness the significant factors were amplitude and spring height and for the model of the % of bushing wearing by tube thickness the significant factors came back to be amplitude and frequency. It was recognized on this three proposed y's the amplitude factor was significant for every output variable, further that through the photographic images was possible to check the polymeric film transferred, testifying interfacial wear and or adhesive. This analysis method allowed for the next proposed projects give emphasis on these factors during the system validation on the engine, and if possible even until before the product validation propose actions to attenuate the wearing on the bushing through the studied factors on the factorial analysis, without affecting tensioner finals characteristics.

Key-words: Polymers. Wear. Factorial Design of Experiment. Polymeric Bushing. Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de tensionamento. Nos momentos em que a correia está tracionada, o esticador resiste ao movimento. Quando a correia afrouxa, o esticador restitui o movimento, esticando-a.....	24
Figura 2 - Exemplo de um sistema de transmissão por correia de acessórios assistido por um esticador.....	25
Figura 3 - Exemplo de um esticador para a correia de acessórios e o sistema de pivotamento pelo eixo central em interface com a bucha.....	26
Figura 4 - Exemplo típico de bucha polimérica flangeada.....	26
Figura 5 - Representação esquemática de alguns dos parâmetros relevantes que condicionam o comportamento ao desgaste e ao atrito de um material	32
Figura 6 - Formação do Polímero Poliestireno	34
Figura 7 - Monômero Etileno.....	34
Figura 8 - Polímero Polietileno originário do Monômero Etileno.....	34
Figura 9 - Tipos de configuração molecular: linear, ramificada e reticulada.....	36
Figura 10 - Classificação dos Polímeros quanto ao nível de consumo	40
Figura 11 - Exemplos de aplicações de algumas poliamidas	42
Figura 12 - Esquema do eixo de rotação suportado por um rolamento e um mancal.	43
Figura 13 - Esquemas de (a) um rolamento de esfera radial, (b) rolamento de esferas com contato angular, (c) rolamento de rolo cilíndrico, e (d) rolamento de rolo cônico.	44
Figura 14 - Esquemas do (a) selo de labirinto, (b) selo ferrofluidico, (c) uma face de selo mecânica com pressurização externa, anel primário de rotação e anel de acoplamento fixo e (d) um selo de lábio em superfície cilíndrica.	45
Figura 15 - Tipos de Engrenagens	46
Figura 16 - Esquema de um came plano e um came com rolo seguidor	47
Figura 17 - Esquema de (a) pistão lubrificado e (b) não lubrificado	47
Figura 18 - Conjunto de anéis montados sobre o pistão	48
Figura 19 - Esquema de escova elétrica com anel de deslizamento.....	49
Figura 20 - Características dimensionais de MEMS, NEMS e BioNEMS em perspectiva	50
Figura 21 - Abordagem simplificada para a classificação de desgaste de polímeros.	51

Figura 22 – Modelo de processo de desgaste de dois termos. A distinção entre o processo de desgaste interfacial e coesivo surge da extensão do material mais mole (usualmente polímero) por uma rígida, por uma aspereza não dissipada da contraface. Para o desgaste interfacial a energia de fricção é dissipada principalmente pela interação adesiva, enquanto o desgaste coesivo é dissipado pelas interações adesiva e abrasiva (subsuperfície)	52
Figura 23 - Esquema do desgaste abrasivo entre um corpo rígido, um corpo macio e uma partícula rígida.....	54
Figura 24 - Principais mecanismos de desgaste por abrasão: a) formação de proa, b) sulcamento, c) fratura, d) desprendimento do grão.....	55
Figura 25 - Desgaste de dois e três corpos.....	55
Figura 26 - Esquema de Desgaste Adesivo	56
Figura 27 - Mecanismo de transferência normal, apresentado pela maior parte dos polímeros.....	57
Figura 28 - a) Desgaste corrosivo - início da reação química entre as superfícies; b) Desgaste das superfícies pelo mecanismo de corrosão	58
Figura 29 - Mecanismos de propagação de trinca durante o processo de fadiga	59
Figura 30 - Danificação por atrito " <i>fretting damage</i> " ocorrido no anel do rolamento por causa de pressão de contato insuficiente entre o anel e a caixa do rolamento.....	60
Figura 31 - Possíveis mecanismos de desgaste erosivo: a) abrasão a baixo ângulo de impacto; b) fadiga da superfície a velocidade baixa e alto ângulo de impacto; c) fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo; d) fusão da superfície causada por altas velocidades de impacto; e) erosão macroscópica com efeitos secundários; f) degradação da rede cristalina por impacto de átomos.....	61
Figura 32 - Representação esquemática de vários estágios envolvidos na formação das folhas de desgastes por delaminação	63
Figura 33 - Valores do coeficiente de desgaste (k) para sistemas tribológicos sem lubrificação.	64
Figura 34 - Taxas de desgaste de discos de polímero por deslizamento a seco e condições de parafina lubrificada (carga aplicada: 2.0N, velocidade de deslizamento: 0.2m/s)	65
Figura 35 - Microscópio MEV de superfícies desgastadas sobre deslizamento a seco e condição de lubrificação por parafina líquida (carga aplicada: 2.0N, velocidade de deslizamento: 0.2m/s)	67
Figura 36 - Representação esquemática dos parâmetros que influenciam o comportamento das poliamidas e os parâmetros que podem resultar do respectivo sistema tribológico.....	68

Figura 37 - Taxa de desgaste específica em função da rugosidade R_p aplicado em superfícies de pressão de 0.7 e 1.3 MPa, para (a) superfícies retificadas perpendicularmente ao deslizamento; (b) superfícies retificadas paralelamente ao deslizamento	69
Figura 38 – A taxa de desgaste normalizada, K_a , comparado contra Dureza, expressado em MPa ao invés de Vickers (H in MPa = 10 H_v). O gráfico mostra uma visão do caminho de quais materiais comuns de engenharia se comportam.	70
Figura 39 - Mapeamento qualitativo de desgaste em função da pressão de contato para diversos materiais	71
Figura 40 - Curvas de temperatura no contato em função do tempo para várias condições PV	75
Figura 41 - Condição PV limite para a poliamida em função do carregamento normal e da velocidade de deslizamento para contato do tipo poliamida-poliamida e aço poliamida.....	75
Figura 42 - Distribuição da pressão em uma bucha de contato lubrificada	77
Figura 43 - Relação entre área real de contato, tensão de cisalhamento e temperatura	80
Figura 44 - Relação entre coeficiente de atrito e temperatura para vários polímeros, em ensaios de deslizamento contra esferas de aço a baixas velocidades.	80
Figura 45 - Força de atrito F necessária para promover movimento por (a) rolagem e (b) deslizamento.....	82
Figura 46 - (A) Representação da área real de contato; (B) Representação da área real de contato com o aumento da força normal	83
Figura 47 - Componentes do coeficiente de atrito conforme modelo de Bowden e Tabor: (a) adesão e (b) deformação.....	84
Figura 48 - Modelo esquemático para o PE, material polimérico que possui estrutura com cadeias lineares, deslizando sobre uma superfície de aço.....	85
Figura 49 - Comportamento da superfície polimérica devido à passagem de uma esfera rígida rolante	86
Figura 50 - Variação dos coeficientes de atrito com o número de ciclos.....	87
Figura 51 - Comportamento inicial do coeficiente de atrito de polímeros em deslizamento sobre metal afetado pela diferença de rugosidade.....	88
Figura 52 - Exemplo de curva de coeficiente de atrito cinético em função do tempo com a identificação de regiões de amaciamento, transição e estabilização com lubrificação	88
Figura 53 - Gráfico coeficiente de atrito pelo tempo.....	89
Figura 54 - Planejamento de experimento 2 ²	91

Figura 55 - Matriz de Planejamento para um experimento 2^3	93
Figura 56 - Representação geométrica do experimento fatorial 2^3	94
Figura 57 - Planejamento 2^2 com pontos centrais.....	96
Figura 58 - Uma superfície tridimensional de resposta, mostrando o rendimento esperado, como uma função da temperatura e da concentração de alimentação	97
Figura 59 - Curvas de nível da superfície de resposta.....	97
Figura 60 – Esquema do equipamento para simulação de teste para esticadores de correia	100
Figura 61 – Balança (Marca AND / Modelo HR-200)	101
Figura 62 - Máquina Tridimensional (Marca Mitutoyo / Modelo Beyond 710)	102
Figura 63 – Equipamento de medição por imagem e análise fotográficas (Marca MicroVu / Modelo Vertex 251UC).....	103
Figura 64 - Gráfico de Normalidade para os Efeitos dos Fatores.....	108
Figura 65 - Gráfico dos Efeitos Principais	109
Figura 66 - Gráfico de interação entre os fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola.	110
Figura 67 - Gráfico de Normalidade para o Desvio Padrão dos Efeitos	112
Figura 68 - Gráfico do Desvio Padrão dos Efeitos Principais.....	113
Figura 69 - Gráfico de Interação para os desvios padrão dos fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola	114
Figura 70 – Representação Gráfica dos Efeitos Fatoriais e Ponto Central com seus respectivos resultados.....	115
Figura 71 - Gráfico de Curvas de Nível para % de Desgaste da Massa em relação aos Fatores Frequência e Amplitude.	116
Figura 72 - Gráfico de Curvas de Nível para % de Desgaste da Massa em relação aos Fatores Altura da Mola e Amplitude	116
Figura 73 - Gráfico de Curvas de Nível para % de Desgaste da Massa em relação aos Fatores Altura da Mola e Frequência.	117
Figura 74 - Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos	120
Figura 75 - Gráfico dos resíduos padronizados versus amplitude e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator amplitude	120
Figura 76 - Gráfico dos resíduos padronizados versus frequência e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator frequência.....	121

Figura 77 - Gráfico dos resíduos padronizados versus altura da mola e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator altura da mola.	122
Figura 78 – Gráfico de superfície da otimização da resposta	124
Figura 79 - Gráfico de Normalidade para os Efeitos.	126
Figura 80 - Gráfico dos Efeitos Principais	127
Figura 81 - Gráfico de interação entre os fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola	128
Figura 82 - Gráfico de Normalidade parao Desvio Padrão dos Efeitos.	130
Figura 83 - Gráfico do Desvio Padrão dos Efeitos Principais.....	131
Figura 84 - Gráfico de Interação entre os desvios padrão do efeito dos fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola.	132
Figura 85 - Representação Gráfica dos Efeitos Fatoriais e Ponto Central com seus respectivos resultados.....	133
Figura 86 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste da espessura do flange em relação aos Fatores Frequência e Amplitude.....	134
Figura 87 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste da espessura do flange em relação aos Fatores Altura da Mola e Amplitude.....	134
Figura 88 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste da espessura do flange em relação aos Fatores Altura da Mola e Frequência.....	135
Figura 89 - Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos	138
Figura 90 - Gráfico dos resíduos padronizados versus amplitude e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator amplitude.	138
Figura 91 - Gráfico dos resíduos padronizados versus frequência e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator frequência.....	139
Figura 92 - Gráfico dos resíduos padronizados versus altura da mola e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator altura da mola.	140
Figura 93 – Gráfico de superfície da otimização da resposta	141
Figura 94 - Gráfico de Normalidade para os efeitos.....	143
Figura 95 - Gráfico dos Efeitos Principais	144
Figura 96 - Gráfico de Interação entre os fatores Amplitude, Frequência e Altura da Mola	145
Figura 97 - Gráfico de Normalidade para os Desvios Padrão dos efeitos.....	146
Figura 98 - Gráfico do Desvio Padrão dos Efeitos Principais.....	147

Figura 99 - Gráfico de Interação do efeito dos desvios padrão para os fatores Amplitude, Frequência e Altura da Mola	148
Figura 100 - Representação gráfica dos efeitos fatoriais e ponto central com seus respectivos resultados.....	149
Figura 101 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste espessura do corpo da bucha em relação aos fatores Frequência e Amplitude	150
Figura 102 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste espessura do corpo da bucha em relação aos fatores Altura da Mola e Amplitude	150
Figura 103 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste espessura do corpo da bucha em relação aos fatores Altura da Mola e Frequência	151
Figura 104 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	154
Figura 105 - Gráfico dos resíduos padronizados versus amplitude e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator amplitude	155
Figura 106 - Gráfico dos resíduos padronizados versus frequência e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator frequência...	156
Figura 107 - Gráfico dos resíduos padronizados versus altura da mola e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator altura da mola	157
Figura 108 – Gráfico de superfície da otimização da resposta	158
Figura 109 – Imagem fotográfica do eixo que trabalho em conjunto com a bucha. a) amostra 5 b) amostra 16	159
Figura 110 – Fotomicrografia. Aumento 15X. Observa-se a aderência do filme polimérico das amostras. a) amostra 5 b) amostra 16	159
Figura 111 – Fotomicrografia. Aumento 29X. Observa-se a zona de aderência do filme polimérico das amostras. a) amostra 5 b) amostra 16.....	160
Figura 112 – Imagem fotográfica das buchas. a) amostra 5 b) amostra 16	160
Figura 113 – Fotomicrografia. Aumento 20X. Observa-se a região de contato da bucha com o eixo. a) amostra 5 b) amostra 16	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites PV, coeficientes de desgaste e coeficientes de atrito de vários plásticos virgens ou preenchidos com material adicional deslizando no metal, sobre condições seca. (Valores aproximados retirado de várias publicações)	73
Tabela 2 - Planejamento de experimentos 2^3 x 2 repetições e 3 pontos centrais ...	104
Tabela 3 - Níveis dos parâmetros do experimento 2^3 x 2 repetições e 3 pontos centrais	104
Tabela 4 - Corridas experimentais	105
Tabela 5 - Percentual de taxa de desgaste da bucha em relação a massa	107
Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento do % de desgaste da bucha por massa	107
Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) do desvio padrão o planejamento de experimento do % de desgaste da bucha por massa.....	111
Tabela 8 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão para o % de desgaste por perda de massa.....	117
Tabela 9 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão simplificado para o % de desgaste por perda de massa.	118
Tabela 10 - Estatística da Regressão	119
Tabela 11 - Resíduos do Modelo de % de Desgaste da Bucha para a massa	119
Tabela 12 - P-valor do teste de hipótese-F	121
Tabela 13 - P-valor do teste de hipótese-T	122
Tabela 14 - P-valor do teste de hipótese-T	123
Tabela 15 - Níveis do fator para otimização da resposta com relação a minimização do desgaste.....	123
Tabela 16 - Percentual de taxa de desgaste do flange da bucha.....	124
Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento do % de desgaste da flange da bucha	125
Tabela 18 - Análise de variância (ANOVA) do desvio padrão do planejamento de experimento do % de desgaste do flange	129
Tabela 19 - Análise de variância (ANOVA) do desvio padrão do planejamento de experimento do % de desgaste do flange após simplificação do modelo	129
Tabela 20 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão para o % de desgaste da espessura do flange da bucha.....	135

Tabela 21 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão simplificado para o % de desgaste da espessura do flange.....	136
Tabela 22 - Estatística da Regressão	137
Tabela 23 - Resíduos do Modelo do % de Desgaste da Espessura do Flange.....	137
Tabela 24 - P-valor do teste de hipótese - T	139
Tabela 25 - P-valor do teste de hipótese – T.....	140
Tabela 26 - P-valor do teste de hipótese – T.....	140
Tabela 27 - Níveis do fator para otimização da resposta com relação à minimização do desgaste da bucha pela espessura do flange	141
Tabela 28 - Percentual da taxa desgaste da bucha em relação à espessura do corpo da bucha	142
Tabela 29 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento do % de desgaste do corpo da bucha	143
Tabela 30 - Análise de variância (ANOVA) para o desvio padrão do planejamento de experimento do % de desgaste do corpo da bucha	145
Tabela 31 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão para o % de desgaste da espessura do corpo da bucha.....	151
Tabela 32 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento sem ponto central do % de desgaste da espessura do corpo da bucha	152
Tabela 33 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão simplificado para % de desgaste da espessura do corpo da bucha.....	153
Tabela 34 - Estatística da regressão	153
Tabela 35 - Resíduos do modelo do % de desgaste da espessura do corpo da bucha	154
Tabela 36 - P-valor do teste estatístico-T	155
Tabela 37 - P-valor do teste estatístico-T.....	156
Tabela 38 - P-valor do teste estatístico-T.....	157
Tabela 39 - Níveis do fator para otimização da resposta com relação a minimização do desgaste da bucha pela espessura do corpo da bucha	158

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Elementos necessários para descrever o sistema tribológicos	30
Quadro 2 - Características tribológicas de polímeros típicos.	33
Quadro 3 - Principais polímeros e símbolos de abreviações comuns subdividido em três tipos.....	35
Quadro 4 - Homopolímeros e Copolímeros.....	38
Quadro 5 - Exemplos de Polímeros de Cadeia Carbônica e Polímeros de Cadeia Heterogênea.....	39
Quadro 6 - Exemplos de polímeros em aplicações tribológicas.....	40

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Fator f_1 relacionado ao movimento	167
Anexo B - Fator f_2 em relação ao ambiente.....	167
Anexo C - Fator de Desgaste K	168
Anexo D – Cálculo de Carga Axial para Molas Helicoidais	169

LISTA DE SIGLAS

AC	Acetato de Celulose
APQP	Advanced Product Quality Planning and Control Plan
ASM	American Society for Metals
DLN	Diamond-Like Nanocomposite
DMDs	Dispositivos de Micro espelhos digitais
MENS	<i>Micro eletromechanical systems</i> (Sistema Micro Eletromecânico)
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MSR	Metodologia da Superfície de Resposta
NC	Nitrato de Celulose
NENS	<i>Nano eletromechanical systems</i> (Sistema Nano Eletromecânico)
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PC	Poliestireno Cristal
PDL	Processamento de Luz Digital
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEEK	Poliéster éter cetona
PET	Poliéster
PEUAPM	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
PEUAPM	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
PHA	Polihidroxialcanoato
PHB	Polihidroxibutirato
PLA	Poliácido Lático
PLV	Polihidroxivalerato
PMMA	Polimetil metacrilato ou Acrílico
PP	Polipropileno
PP	Polipropileno
PPM	Pés por minuto

PS	Poliestireno
PTFE	Polietrafluoretileno
PV	Produto da pressão e velocidade
PVC	Policloreto de Vinila
RA	Rugosidade Aritmética Principal
TE	Termoplásticos de Engenharia
V	Velocidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	27
1.1.1	Objetivo Geral.....	27
1.1.2	Objetivos Específicos	27
1.2	Justificativa.....	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	Definição da Tribologia.....	29
2.1.1	Tribologia dos Polímeros.....	31
2.2	Polímeros	33
2.2.1	Definição dos Polímeros.....	33
2.2.2	Classificação dos Polímeros	35
2.2.2.1.	Classificação quanto à origem.....	36
2.2.2.2.	Classificação quanto à estrutura molecular.....	36
2.2.2.3.	Classificação com relação à característica tecnológica.....	37
2.2.2.4.	Classificação quanto ao comportamento mecânico	38
2.2.2.5.	Classificação quanto à composição molecular.....	38
2.2.2.6.	Classificação quanto à estrutura química.....	39
2.2.2.7.	Classificação quanto ao nível de consumo	39
2.2.3	Aplicação dos Polímeros	40
2.2.3.1.	Exemplos de Aplicação Tribológicas em Polímeros.....	43
2.2.3.1.1.	Contato de Buchas Deslizantes Rotativas.....	43
2.2.3.1.2.	Contatos de Rolamentos Rolantes	43
2.2.3.1.3.	Selos	44
2.2.3.1.4.	Engrenagens.....	45
2.2.3.1.5.	Sistemas Seguidores de Cames	46
2.2.3.1.6.	Anéis de Pistão.....	47
2.2.3.1.7.	Escovas Elétricas	48

2.2.3.1.8. Sistemas Micro Eletromecânicos (MEMS) / Sistemas Nano Eletromecânicos (NEMS)	49
2.2.4 Desgaste em Polímeros	50
2.2.4.1. Abordagem de escala genérica	52
2.2.4.1.1. Desgaste Coesivo	53
2.2.4.1.2. Desgaste Interfacial.....	53
2.2.4.2. Abordagem de escala fenomenológica	54
2.2.4.2.1. Desgaste Abrasivo	54
2.2.4.2.2. Desgaste Adesivo e por transferência de material.....	56
2.2.4.2.3. Desgaste triboquímico.....	57
2.2.4.2.4. Desgaste por Fadiga	58
2.2.4.2.5. Desgaste por atrito " <i>Fretting wear</i> "	59
2.2.4.2.6. Desgaste por erosão	60
2.2.4.2.7. Desgaste por delaminação.....	62
2.2.4.3. Coeficiente de Desgaste	63
2.2.5 Parâmetros tribológicos influentes no sistema bucha-metal.....	67
2.2.5.1. Rugosidade e Dureza.....	68
2.2.5.2. Velocidade de deslizamento.....	70
2.2.5.3. Carga.....	71
2.2.5.4. Relação PV para buchas.....	72
2.2.5.5. Temperatura.....	78
2.2.5.6. Lubrificação	81
2.2.6 Atrito em Polímeros	82
2.2.6.1. Atrito por Adesão.....	85
2.2.6.2. Atrito por Deformação	86
2.2.6.3. Coeficiente de Atrito	87
2.3 Planejamento de Experimentos com Vários Fatores.....	89
2.3.1 Planejamento Fatorial.....	91

2.3.2	Adição de Pontos Centrais a um Planejamento Fatorial	95
2.3.3	Planejamento de superfície de resposta	96
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	99
3.1	Montagem do Sistema de Testes	99
3.2	Equipamentos utilizados para analisar o desgaste da bucha.....	100
3.2.1	Medição do desgaste pela perda de massa	100
3.2.2	Medição do desgaste pela espessura da parede	101
3.2.3	Análise de Imagens	102
3.3	Planejamento Fatoriais de Experimentos	103
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	106
4.1	Percentual de Desgaste da Bucha em Relação a Massa.....	106
4.1.1	Análise dos efeitos dos fatores.....	106
4.1.2	Modelo de regressão para % de desgaste da massa da bucha.....	117
4.1.3	Análise Residual do Modelo	119
4.1.4	Otimização da resposta.....	123
4.2	Percentual de Desgaste da Bucha em relação à Espessura da Flange.....	124
4.2.1	Modelo de Regressão para % de Desgaste do Flange da Bucha	135
4.2.2	Análise residual do modelo	137
4.2.3	Otimização da Resposta	141
4.3	Percentual de Desgaste da Bucha em Relação ao Corpo	142
4.3.1	Análise dos efeitos dos fatores.....	142
4.3.2	Modelo de Regressão para % de desgaste do corpo da bucha	151
4.3.3	Análise residual do modelo	153
4.3.4	Otimização da resposta.....	157
4.4	Análise fotográfica das amostras.....	158
5	CONCLUSÕES	162
	REFERÊNCIAS	163
	ANEXOS	167

1 INTRODUÇÃO

O grande desafio da aplicação tribológica para polímeros no ramo automotivo está basicamente relacionado à durabilidade da peça no veículo, pois algumas montadoras já trabalham com uma garantia de três a cinco anos, e dependendo da aplicação faz-se a exigência de atender a garantia por esse tempo definido por meio de uma quilometragem especificada pela montadora. Baseado nesse contexto existe uma demanda para a busca de modelos matemáticos para predição de falhas e ou entendimento de que fatores podem influenciar na durabilidade dos produtos, para que durante o desenvolvimento do projeto seja discutido esse tipo de falha, permitindo a antecipação de um problema antes do acontecimento.

Segundo Meeker e Ramada (1995 apud Dillenburg, 2005), a previsão da confiabilidade na fase inicial do projeto a partir de modelos de falha padronizados e a realização de testes acelerados de vida nos protótipos são algumas das ferramentas disponíveis para uma estimativa inicial da confiabilidade e correção precoce de falhas que só seriam detectados no uso real do produto, após seu lançamento. Os pequenos fabricantes de alta tecnologia, pressionados pela necessidade de desenvolvimento acelerado de seus produtos e limitados recursos financeiros e humanos, geralmente desconhecem ou não aplicam estas ferramentas nos estágios iniciais do desenvolvimento, e muitas vezes o resultado é o lançamento de produtos com problemas crônicos de confiabilidade.

Scarpin (2013) afirma que com base no manual APQP (*Advanced Product Quality Planning and Control Plan*), desenvolvido em conjunto pelas empresas Chrysler, Ford e General Motors, temos outra definição para confiabilidade, qual seja, a "probabilidade de que um item continuará a funcionar de acordo com os níveis de expectativa do usuário a um ponto mensurável, sob um ambiente específico e nas condições cíclicas determinadas".

Além do aspecto relacionado à confiabilidade, faz-se necessário no ramo automotivo atentar-se a outros dois aspectos relevantes e muito requeridos, que são a qualidade e o custo do produto. Relacionado à qualidade tem uma série de requisitos desde teste em laboratório para comprovação da composição química dos componentes do produto, dimensional dos componentes e produto final, definição do tipo de processo usado para injeção do polímero. Para o aspecto custo, algumas montadoras na solicitação da cotação para o fornecedor solicitam o *break-down* do

custo do produto ofertado, e em caso do ganho de projeto, durante a vida útil do mesmo a montadora solicita um percentual de redução de custo a cada ano de vida do projeto.

Observando esse cenário desafiador, onde a cobrança por confiabilidade, qualidade e custo é requerida por todo o mercado automotivo, cada vez mais se busca materiais poliméricos que podem ser usados principalmente em aplicações estruturais substituindo produtos injetados de alumínio e ou Zamak e também em aplicações tribológicas onde ocorre o contato por deslizamento do material bronze para polimérico. A procura por materiais poliméricos permite a redução de massa, redução de custo do ferramental, pois na injeção de peças plásticas o ferramental dura um milhão de ciclos comparando ao de alumínio e Zamak que é cento e vinte mil ciclos em média. Polímeros possuem propriedades mecânicas similares e em alguns casos na tribologia melhora o rendimento dos eixos rotativos que trabalham nessas buchas diminuindo o coeficiente de atrito. Tudo isso contribui para obter o mesmo rendimento de uma bucha convencional de bronze e é possível ofertar possíveis reduções de custo, pois dentro do mercado automotivo essa discussão é mais que usual, e já está intrínseco no processo do qual durante a vida útil do produto é mandatório a redução de custo.

Algumas das aplicações onde cada vez mais adota-se o uso de buchas poliméricas são em esticadores automotivos. Especificamente um esticador atua da seguinte maneira no motor, quando o motor desacelera ocorre um alongamento na correia, com isso o esticador compensa esse alongamento aplicando uma tensão na correia, causando o carregamento da correia e evitando o escorregamento da mesma na pista da polia. Inversamente proporcional, quando o motor é acelerado a correia tende a encurtar, e o esticador por sua vez alivia a correia, de uma maneira da qual não ocorra o deslizamento novamente na pista da polia, conforme Figura 1 e Figura 2.



Figura 1 - Mecanismo de tensionamento. Nos momentos em que a correia está tracionada, o esticador resiste ao movimento. Quando a correia afrouxa, o esticador restitui o movimento, esticando-a

Fonte: Grego (2015)

Tudo isso consequentemente afeta diretamente na eficiência do motor. Em motores que não se usam sistemas de tensionamento com esticadores de correia, o sistema perde em eficiência, pois a tensão adequada não é aplicada na correia, ocorrendo o deslizamento e perda de torque no motor.



Figura 2 - Exemplo de um sistema de transmissão por correia de acessórios assistido por um esticador
Fonte: Pro Performance (2018)

O esticador de correia por sua vez se trata de um mecanismo composto por fundido de alumínio, sistema de montagem bucha eixo e um mecanismo de mola com amortecimento. O esticador absorve energia do sistema aplicando um torque por intermédio da mola instalada, na aceleração e desaceleração o torque do motor impõe ao esticador uma certa amplitude ocorrendo absorção de energia. Um dos componentes que faz absorção dessa energia é a bucha polimérica, que trabalha em interface com o eixo central que faz o pivotamento do esticador na correia e essa amplitude reflete no eixo central que trabalha em interface com a bucha, conforme Figura 3.

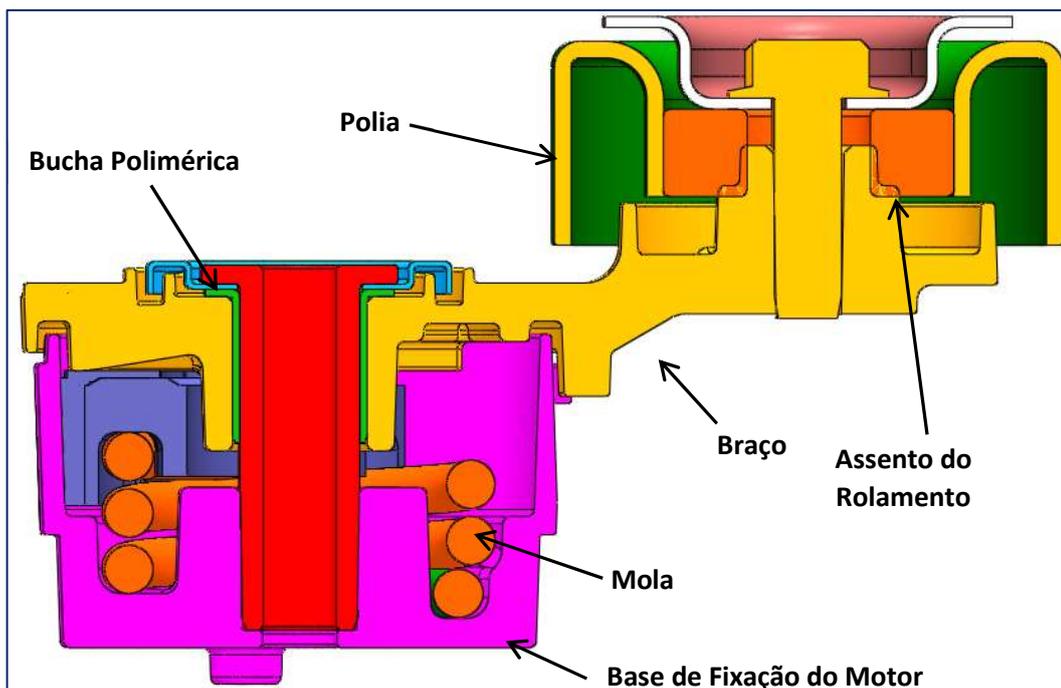


Figura 3 - Exemplo de um esticador para a correia de acessórios e o sistema de pivotamento pelo eixo central em interface com a bucha
 Fonte: Autor (2018)

Como pode se observar pela Figura 4, o componente polimérico quem compõe normalmente esta peça é o polímero PA 6.6 com 35% de fibra de vidro (poliamida), que devido a interação com o eixo ocorre um desgaste na mesma. Por conta desse fato é necessário testes e verificação de desgaste na flange e no corpo da bucha usando diferentes parâmetros de medição, como avaliação da perda massa e ou diminuição da espessura da parede da bucha, onde será usado como dado de saída no planejamento de experimento. Com relação aos fatores controlados para o teste como amplitude, altura da mola e frequência de trabalho, será verificado quais são influentes nesse desgaste, e por intermédio deles verificar a possibilidade da estimativa de desgaste da bucha conforme a mudança dos fatores parametrizados antes do teste.

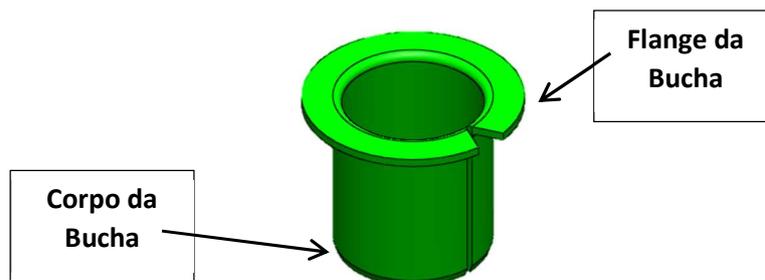


Figura 4 - Exemplo típico de bucha polimérica flangeada
 Fonte: Autor (2018)

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa pesquisa é por meio de um planejamento experimental fatorial aplicado a um teste tribológico, desenvolver um modelo matemático para a taxa de desgaste de bucha polimérica que compõe o eixo do esticador do motor e verificar quais fatores pode influenciar no desgaste de uma bucha em trabalho deslizante rotativo com eixos metálicos em esticadores automotivos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Definição dos fatores (frequência, altura da mola, amplitude) e níveis (frequência de 21Hz, 22,5Hz e 24Hz; altura da mola de 34,12mm, 36,12mm e 38,12mm; amplitude de 3,5mm, 5mm e 6,5mm) para a execução do experimento e definição das variáveis de saída como espessura do flange da bucha, espessura do corpo da bucha e massa da bucha polimérica.

Verificações de quais fatores são estatisticamente significativos em cada variável de saída; aplicação do planejamento de experimento para estudo comportamental de cada variável de saída e verificação da curvatura dos dados; e verificação de uma possível regressão linear para cada variável de saída.

Otimização e composição de modelos matemáticos.

1.2 Justificativa

Devido à limitação de recursos financeiros e tempo para desenvolvimento de novos produtos, faz se necessário cada vez mais o estudo relacionado à análise sistêmica de falhas para prevenção das mesmas, e também com a possível predição dessa falha faz com que as empresas desenvolvam seus projetos de maneira mais assertiva evitando falhas de campo ou o chamado *recall*. Além disso faz-se necessário também a investigação e caracterização de quais são os componentes que sofrem um maior desgaste e quais fatores influênciam na aceleração desse processo, sendo assim possível a mitigação desse comportamento que tende em resultar numa maior confiabilidade do produto ou até na predição dessa falha, fazendo assim com que em cada revisão periódica do automóvel seja possível verificar a funcionalidade da peça.

No cenário atual altamente globalizado com alta competitividade é mandatário as empresas procurarem cada vez mais meios para reduzir custos, mas sempre procurando manter a confiabilidade e qualidade do produto, devido a isso é justificável

aprofundar-se em estudos para desenvolvimentos de modelos matemáticos para predição e ou mitigação de falhas devido ao desgaste e também na possível compreensão de quais fatores podem ser os maiores causadores de falhas desse produto desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição da Tribologia

De acordo com Bhushan (2013), tribologia é crucial para os maquinários modernos dos quais são usados superfícies de rolagem e de escorregamento. Exemplos de atritos produtivos são freios, embreagens, rodas motrizes nos trens e automóveis, parafusos e porcas. Exemplos de desgastes produtivos são escrever com um lápis, usinagem, polimento e raspagem. Exemplos de atrito e desgaste improdutivo são combustão interna e motores de avião, engrenagens, cames, rolamentos e selos.

Para Kawakame e Bressan (2000), tribologia é “a ciência do atrito, desgaste e lubrificação de superfícies sólidas em movimento relativo”, atualmente é considerada como uma das linhas principais de pesquisa da ciência e engenharia dos materiais.

De acordo com Gerdeen e Rorrer (2012), tribologia é pobremente traduzida do Grego como “a ciência da fricção”. Em uma visão otimista, o “Tri” pode ser considerado para as três áreas da fricção, desgaste e lubrificação.

A resistência ao desgaste não é verdadeiramente uma propriedade dos materiais e sim um comportamento complexo que depende do par de materiais em contato e de vários outros fatores. As taxas de desgaste em um sistema de tribológico no qual dois corpos sólidos deslizam um contra o outro dependem não só das propriedades dos materiais envolvidos, mas também da geometria do contato, da pressão de contato, da rugosidade da superfície, da velocidade de deslizamento, da temperatura e do meio ambiente, da presença e eficácia de qualquer lubrificante, e de outros detalhes (KAWAKAME; BRESSAN, 2000).

Equação 1:

$$Q = k \cdot N / H = (k \cdot A \cdot P) / H$$

- Q = volume de material removido (mm^3 / distância percorrida (m));
- N é a carga normal sobre a superfície que desgasta;
- P é a pressão normal (carga normal por unidade de área nominal de contato entre as duas superfícies);
- A é a área nominal de contato;
- H é a dureza do material mais macio;
- k é o coeficiente de desgaste de Archard, é um número adimensional.

A equação é na verdade a forma dimensional mais simples de se relacionar corretamente a taxa de desgaste Q com a pressão média de contato e a dureza. Archard desenvolveu esta equação para o desgaste por deslizamento, mas posteriormente mostrou-se que também pode ser aplicada para o desgaste entre dois corpos abrasivo e que envolve escoamento plástico em que partículas angulares duras são arrastadas sobre uma superfície de contato. O valor do parâmetro

k pode ser usado para se comparar a severidade do desgaste do mesmo material sob condições diferentes, e comparar a resistência ao desgaste de diferentes materiais sob condições semelhantes. A escolha do material e do sistema tribológico influencia o valor do coeficiente de desgaste (KAWAKAME; BRESSAN, 2000).

Bhushan (2013) menciona que, de acordo com algumas estimativas, perdas resultantes da ignorância sobre a tribologia resultam num montante de perda 4% da margem nacional do produto americano (ou por volta de US\$200 bilhões de dólares por ano em 1966) e aproximadamente um terço dos recursos de energia presente no mundo usa uma alguma forma de atrito ou outra. Conseqüentemente, a importância da redução de atrito e controle do desgaste não pode ser enfatizada demais para razões econômicas e confiabilidade de longo termo.

De acordo com Jost (1966; 1976 apud BHUSHAN, 2013), reduções por volta de 1% na margem do produto nacional de uma nação industrial podem ser realizadas através de melhores práticas tribológicas. De acordo com recentes estudos, reduções de custo são esperadas na ordem de cinquenta vezes o custo de pesquisa. As reduções são substanciais e significantes, e essas reduções podem ser obtidas sem o investimento pesado de capital em desenvolvimento.

Bhushan (2013) afirma que a propósito da pesquisa na tribologia é a compreensão da minimização e eliminação de perdas resultantes do atrito e desgaste em todos os níveis de tecnologia onde o atrito de superfícies é envolvido. Ainda para o autor a pesquisa em tribologia caminha a indústria para uma maior eficiência, melhor desempenho, menos parada e reduções significativas.

Para Laranjeira (2011), o desgaste e o atrito não são propriedades de material, mas a consequência de um dado sistema tribológico. No Quadro 1, apresentam-se os oito elementos principais para descrever um sistema tribológico, esses elementos servem de base na análise do comportamento ao desgaste por atrito de um dado par de materiais.

Quadro 1 - Elementos necessários para descrever o sistema tribológicos

Materiais em contato	Tipo de Movimento
Geometria dos pares materiais	Carga
Topografia de Superfície	Lubrificação
Configuração de contato	Condições de ambiente

Fonte: Laranjeira (2011)

2.1.1 Tribologia dos Polímeros

De acordo com a Sociedade Americana de Materiais (ASM, 1992), compostos termoplásticos moldáveis por injeção estão crescendo na substituição por metais em muitas engrenagens e aplicações de rolamento. A facilidade e economia de complexidade de manufatura das peças pela injeção de moldes são muito bem reconhecidas. A Sociedade Americana de Materiais (ASM, 1992) afirma que a habilidade de absorver impacto, vibração, e operar com menos energia e ruído - com pouco ou sem manutenção são vantagens adicionais obtidas com compósitos termoplásticos. Ainda segundo o autor melhorias adicionais em mecânica e propriedades tribológicas podem ser alcançadas através da incorporação de vidro ou fibra de carbono reforçada e politetrafluoroetileno (PTFE) ou outros lubrificantes.

Segundo a Sociedade Americana de Materiais (ASM, 1992), essas cargas, reforçadas, e lubrificadas, quando composto com a resina base apropriada, produzem um conjunto quase ilimitado de compostos que proporciona uma capacidade de carga, coeficientes de atrito reduzidos, melhor duração do desgaste, força mecânica superior, melhores propriedades térmicas, maior resistência à fadiga, resistência à fluência, e excelente estabilidade dimensional e reprodutibilidade.

Gerdeen e Rorrer (2012) destacam que historicamente muito trabalho foi feito no deslizamento de sistemas metálicos, ambos secos e lubrificados. Deste grande volume de trabalho virtualmente todas as “leis” atuais de fricção evoluíram. Infelizmente o sub-tópico de polímeros sobre metais ou polímeros sobre deslizamento de sistemas poliméricos viola a maioria do que é falado sobre as “leis” consequentemente invalidando-os em relação aos polímeros.

A Sociedade Americana de Materiais (1992) frisa que estudos anteriores demonstraram que a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito em plásticos versus metal aumenta com a temperatura em um ambiente fechado. Segundo o mesmo autor, novas oportunidades na indústria de transporte indica um aumento de requerimento por capacidade termal de compósitos termoplásticos.

Para Nunes (2008), comparados com metais e cerâmicas, os polímeros exibem menores coeficientes de atrito, com valores normalmente entre 0,1 e 0,5. Dessa forma, os polímeros são muitas vezes usados em aplicações tribológicas sem lubrificação, usualmente deslizando contra corpos mais duros.

Gerdeen e Rorrer (2012) descrevem que falhas de polímeros em aplicações tribológicas são frequentemente catastróficas, ocorrendo em uma ordem de escala de

uma ordem de minutos ou horas. Propriedades termo físicas são relativamente importantes em polímeros deslizantes com metais. Polímeros frequentemente em ordem de magnitude tem menos habilidade de transferir o calor para da interface deslizante comparada com metais. Ainda segundo os autores, ainda há frequentemente mais potencial de ocorrer reações químicas em polímeros deslizantes com metais do que em metais deslizantes com metais. Entretanto, sobre cargas leves com velocidades baixas, tem um potencial de exceder a performance de sistemas metálicos com atrito extremamente baixo ($\mu = 0.2$) e um pouco ou nada de detritos do desgaste (GERDEEN; RORRER, 2012).

Para Laranjeira (2011), projetos de sistemas tribológicos de polímeros são complexos. Os valores de referência de desgaste e atrito são meramente indicativos, sendo válidos só em condições particulares. Por isso, cada projeto necessita de testes tribológicos específicos para determinar o desempenho ao desgaste e ao atrito do par de materiais envolvidos, perante condições de operação particulares.

De acordo com Laranjeira (2011), os resultados dos testes dependem do quadro tribológico, por isso, as condições do ensaio devem ser o mais próximo possível do ambiente de solicitação, incluindo a micro e macroestrutura do material de deslizamento, a geometria de contato, a pressão de contato, o tipo de escorregamento e dureza. Deve ter-se em consideração que para alguns materiais, as suas propriedades, físicas e mecânicas, podem variar ao longo do ensaio, conforme Figura 5.



Figura 5 - Representação esquemática de alguns dos parâmetros relevantes que condicionam o comportamento ao desgaste e ao atrito de um material
Fonte: Laranjeira (2011)

Para Silva (2010), o termo polímero é utilizado para descrever uma grande faixa de materiais, porém poucos polímeros apresentam propriedades tribológicas notáveis. Devido a isso, muitas pesquisas são voltadas para esse número relativamente limitado de polímeros (Quadro 2). As características tribológicas desses polímeros favorecem sua aplicação em vários ramos de indústrias (SILVA, 2010).

Quadro 2 - Características tribológicas de polímeros típicos.

Polímeros	Características tribológicas
Politetrafluoretileno (PTFE)	Baixo atrito, mas alta taxa de desgaste. Alto limite de temperatura operacional.
Nylon	Coefficiente de atrito moderado e baixa taxa de desgaste. Desgaste acelerado por água. Relativamente baixo limite de temperatura.
Poliéter éter cetona (PEEK)	Alto limite de temperatura operacional. Resistência a muitos reagentes químicos. Adequado para altas tensões de contato. Alto coeficiente de atrito quando na forma pura.
Poliétileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM)	Alta resistência ao desgaste em presença de água. Moderado coeficiente de atrito. Boa resistência ao desgaste abrasivo. Relativamente baixo limite de temperatura.
Poliuretanos	Boa resistência ao desgaste abrasivo e ao desgaste sob rolamento. Relativamente alto coeficiente de atrito sob deslizamento.
Poliâmidas	Polímeros de alto desempenho, adequados para altas tensões de contato e temperaturas operacionais.
Resinas epóxis e fenólicas	Usada como ligantes em materiais compósitos.

Fonte: Silva (2010)

2.2 Polímeros

2.2.1 Definição dos Polímeros

Para Canevarolo Jr. (2002), a palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligados por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo de monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, pode-se dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras.

De acordo com Ebewele (2000), conseqüentemente um polímero é uma molécula maior (macromolécula) construída pela repetição de pequenas unidades químicas.

Na Figura 6, a molécula estireno (1) possui ligação dupla. Químicos conceberam um método para abertura dessa ligação dupla, de modo que literalmente milhares de moléculas de estireno se ligam entre si. A estrutural resultante, anexa em colchetes, é o polímero poliestireno (2). O estireno ele próprio é referido como um monômero (EBEWELE, 2000).

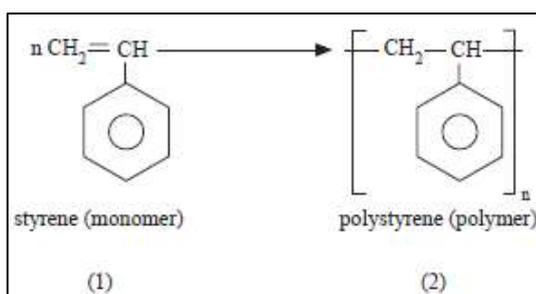


Figura 6 - Formação do Polímero Poliestireno
Fonte: Ebeuele (2000)

Mais um exemplo de Gerdeen e Rorrer (2012), monômero etileno CH_2 molécula geralmente mostrada como (Figura 7):



Figura 7 - Monômero Etileno
Fonte: Gerdeen e Rorrer (2012)

A Figura 8 mostra o polímero como uma cadeia de monômeros, a molécula de polietileno (GERDEEN; RORRER, 2012).

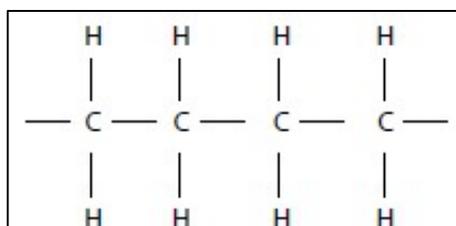


Figura 8 - Polímero Polietileno
originário do Monômero Etileno
Fonte: Gerdeen e Rorrer (2012)

Em geral os nomes químicos são os nomes dos monômeros (X) e o polímero os nomes são poli (X). Mas, tem também os copolímeros que são formados de dois monômeros (XY) que são chamados poli (XI) ou as vezes referidos como o X – Y copolímero (GERDEEN; RORRER, 2012).

2.2.2 Classificação dos Polímeros

Já Silva (2003) representa que os materiais poliméricos podem ser agrupados de acordo com diversos tipos de classificação, dentre outras pode-se citar: estrutura química, fusibilidade¹, comportamento mecânico, tipos de aplicação e escala de produção, conforme Quadro 3. Além disso o autor afirma que umas das principais formas de classificação dos polímeros utilizados pelos engenheiros é tipos de ligações atômicas da macromolécula (estrutura molecular), e o números de diferentes meros presentes no polímero e seu desempenho mecânico.

Quadro 3 - Principais polímeros e símbolos de abreviações comuns subdividido em três tipos

Grupo	Nome	Acrônimo
Termoplástico	Poliétileno ^a	PE
	Poliéster	PET
	Polipropileno	PP
	Poliestireno	PS
	Cloreto de Polivilino ^a	PVC
	Poliacetal	POM
	Acrílico	PMMA
	Poliamida (Náilon)	PA
	Policarbonato	PC
	Politetrafluoroetileno	PTFE
	Poliuretano ^a	PUR
Termofixo	Epoxy	PE
	Melamina-formaldeído	MF
	Urea-formaldeído	MF
	Poliéster-insaturado	UP
	Fenólica	PF
	Alquídico	
Termoplástico Elastômero ^b Copolímero	Poliuretano ^a	PUR
	Poliétileno ^a	PE
	Cloreto de polivinilo ^a	PVC
	Poliuretano	PU
	Bloco Co-poliéster	COPE
	Bloco Co-poliamida	COPA
	Outros blocos copolímeros	
^a Alguns polímeros que podem ser termofixos e termoplásticos.		
^b A maioria dos elastômeros termoplásticos são copolímeros.		

Fonte: Adaptado e traduzido de Gerdeen e Rorrer (2012)

¹ Fusibilidade é a facilidade com que um material derrete.

2.2.2.1. Classificação quanto à origem

De acordo com Isidoro (2009), os polímeros podem ser classificados como naturais e sintéticos. Naturais são aqueles que se encontram na natureza e apresentam geralmente estruturas mais complexas que os polímeros sintéticos. A título de exemplos temos as proteínas, a celulose, o amido e as resinas. Já os sintéticos são compostos orgânicos, obtidos industrialmente através de reações de polimerização geralmente de moléculas simples. Exemplos como nylon, PVC, vidro acrílico, polietileno e etc.

Para Candian (2007), pode ser adicionado ainda quanto a origem os polímeros artificiais que são aqueles que sofreram processo de modificação química dos polímeros naturais, como o celulóide. Exemplos como fibras de rayon e celofane.

2.2.2.2. Classificação quanto à estrutura molecular

Quanto a estrutura molecular para Candian (2007), a cadeia de um polímero linear é quando não possui ramificações, ou seja, a sequência de meros é contínua. Já uma cadeia ramificada possui cadeias laterais ligadas a cadeia principal e devido a essa ramificação, os polímeros possuem um menor grau de cristalinidade, conforme Figura 9. A cadeia é dita reticulada quando a estrutura polimérica é tridimensional, com as cadeias unidas por ligações covalente ou quando possuem muitas ligações cruzadas.

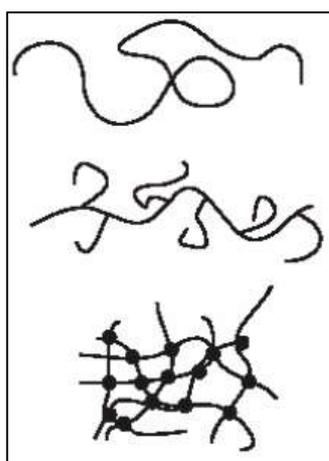


Figura 9 - Tipos de configuração molecular: linear, ramificada e reticulada.
Fonte: Candian (2007)

Segundo Silva (2003), esta classificação divide os polímeros em três grandes famílias:

- Termoplásticos (de cadeia linear ou ramificada);
- Elastômeros (borrachas) e;
- Termofixos (estrutura tridimensional).

2.2.2.3. Classificação com relação à característica tecnológica

Dalfré (2007) classifica os polímeros com relação a característica tecnológica em dois grandes grupos: os termoplásticos e os termofixos (termorrígidos).

Kumar e Gupta (2003) afirmam que esse método é um dos modos mais antigos para classificar os polímeros e é baseado na resposta do aquecimento. Nesse sistema tem dois tipos de polímeros: termoplásticos e termofixos. Tudo isso baseado na fundição dos polímeros no aquecimento e solidificação no resfriamento. Segundo o autor os ciclos de aquecimento e resfriamento pode ser aplicado muitas vezes sem afetar as propriedades dos termoplásticos.

Kumar e Gupta (2003) citam que os polímeros termofixos, por outro lado, fundem somente da primeira vez que são aquecidos. Durante o aquecimento inicial o polímero é “curado”; depois disso o polímero não funde novamente com reaquecimento, mas degrada.

Devido a isso Dalfré (2007) afirma que os termoplásticos podem ser reciclados pois podem ser amolecidos ou liquefeitos por aquecimento e endurecimento diversas vezes, sem perder suas propriedades, e alguns podem até dissolver-se em vários solventes. Segundo o autor, possuem estrutura molecular formada por moléculas lineares dispostas na forma de cordões soltos, mas agregados com um novelo de lã. Ainda de acordo com o autor os termoplásticos podem ser subdivididos em convencionais, especiais e de engenharia.

Já os materiais termofixos, Dalfré (2007) afirma que não é possível sua reciclagem pois esse tipo de material utiliza o aquecimento para dar formato a uma peça apenas uma vez, visto que não pode mais amolecer. O aquecimento do polímero acabado promove a decomposição do material antes da sua fusão.

Segundo Dalfré (2007), a estrutura molecular é formada por ligações cruzadas químicas primárias entre macromoléculas, formando uma rede, presos por meio de numerosas ligações, não se movimentando com tanta liberdade como nos termoplásticos.

2.2.2.4. Classificação quanto ao comportamento mecânico

Segundo Candian (2007), em relação ao comportamento mecânico os polímeros podem dar origem aos plásticos, as fibras poliméricas e aos elastômeros (ou borrachas).

Lima (2007) afirma que os grupos são definidos da seguinte maneira:

- Elastômeros ou borrachas: são polímeros que apresentam ampla faixa de elasticidade à temperatura ambiente.
- Plásticos: são polímeros que sob pressão e calor, tornam-se fluídos e podem ser moldados.
- Fibras: são polímeros compostos por macromoléculas lineares, orientadas longitudinalmente, com elevada razão entre comprimentos e dimensões laterais.

2.2.2.5. Classificação quanto à composição molecular

Segundo Candian (2007), os polímeros são produzidos por meio de uma reação química conhecida por polimerização. Ela consiste na combinação de moléculas de monômeros, que podem ser iguais (homopolímeros) ou diferentes (copolímeros), formando cadeias compridas, sem alterar sua estrutura molecular.

Os copolímeros, em função da forma como as moléculas se unem entre si podem apresentar vários tipos, conforme Quadro 4. As suas estruturas podem ser distribuídas aleatoriamente, alternadamente, em bloco ou ramificadas, conferindo diferentes estruturas, o que conseqüentemente origina diferentes propriedades (SMITH, 1998 apud ISIDORO, 2009).

Quadro 4 - Homopolímeros e Copolímeros

Polímero		Cadeia
Homopolímero		... A A A A A A ...
Homopolímero		... B B B B B B ...
Copolímero	Aleatório	... A B B A B A A B A ...
	Alternado	... B A B A B A B A B ...
	Em Bloco	... A A A A B B B B ...
	Ramificado	A A A A A A B B B B

Fonte: Traduzido de Isidoro (2009)

2.2.2.6. Classificação quanto à estrutura química

Canevarolo Jr. (2002) assegura que dentro dessa classificação, analisa-se o polímero através da estrutura química do seu mero. Duas subdivisões em princípio são possíveis: polímeros de cadeia carbônica e polímeros de cadeia heterogênea, conforme Quadro 5.

Quadro 5 - Exemplos de Polímeros de Cadeia Carbônica e Polímeros de Cadeia Heterogênea

Polímeros de Cadeia Carbônica	Polímeros de Cadeia Heterogênea
Poliiolefinas	Poliéteres
Polímeros de Dienos	Poliésteres
Polímeros estirênicos	Policarbonato
Polímeros clorados	Poliâmidas
Polímeros fluorados	Poliuretanos
Polímeros acrílicos	Aminoplásticos
Polivinil ésteres	Derivados da celulose
Poli (fenol-formaldeído)	Siliconas

Fonte: Traduzido de Canevarolo Jr. (2002).

2.2.2.7. Classificação quanto ao nível de consumo

Os materiais poliméricos podem ser classificados em três grandes grupos: polímeros para usos gerais (commodities), polímeros para usos específicos (quasi-commodities) e polímeros de alto desempenho (especialidades), conforme Figura 10. Polímeros tipo commodities são aqueles produzidos em grande escala, têm baixo valor agregado, não apresentam diferenciação, são utilizados para finalidades gerais e são consumidos em grandes quantidades. Os chamados polímeros quasi-commodities são, também, produzidos em grande escala, porém em nível mais baixo do que as commodities. Entretanto, quasi-commodities apresentam desempenhos diferenciados e propriedades que os fazem ser ideais para determinadas aplicações. Polímeros de especialidades são aqueles que apresentam alto desempenho, são produtos específicos, com propriedades bem definidas e incomuns, tem alto valor agregado e são produzidos em escalas de pequeno porte (HEMAIS, 2003).

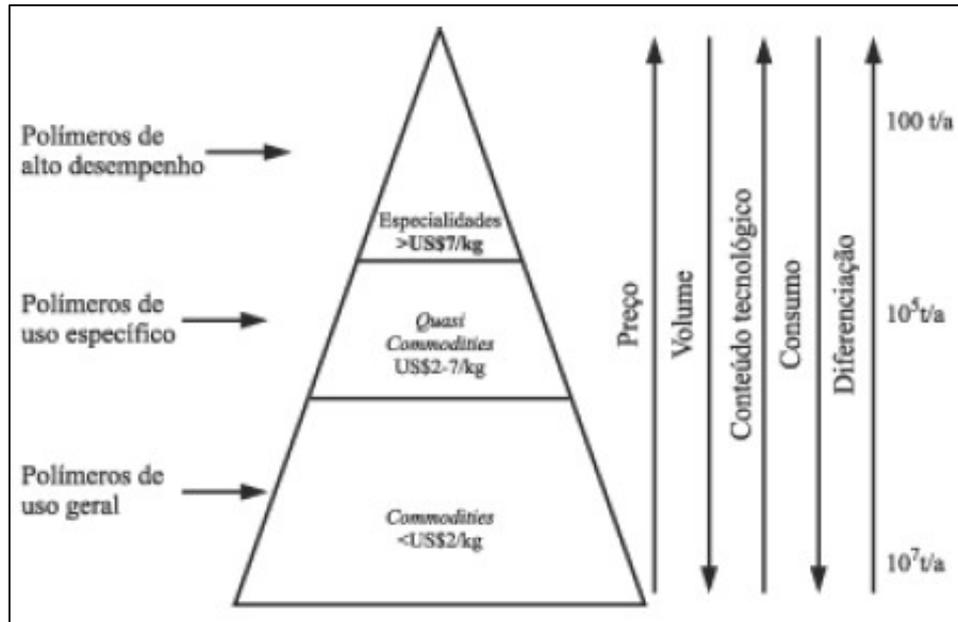


Figura 10 - Classificação dos Polímeros quanto ao nível de consumo
Fonte: Hemais (2003)

2.2.3 Aplicação dos Polímeros

Segundo Gerdeen e Rorrer (2012), polímeros são usados em aplicações tribológicas por muitas de suas razões como elas são aplicadas em aplicações estruturais, conforme Quadro 6. Em muitas instâncias, polímero irá realizar uma dupla função como ambos um material estrutural e tribológico. Um exemplo de dupla funcionalidade, são polímeros auto lubrificantes que são injetados por molde dentro de alojamentos estruturais para velocidades pequenas carregadas levemente por eixos rotativos. Preocupações tais como peso, custo e manufaturabilidade são alguns dos mesmos problemas com o uso de polímeros e compostos poliméricos para aplicações de deslizamento como em aplicações estruturais.

Quadro 6 - Exemplos de polímeros em aplicações tribológicas

- | | |
|----|---|
| 1. | Guias auto lubrificantes de montagem deslizante |
| 2. | Engrenagens |
| 3. | Para eixos rotacionais com cargas leves |
| 4. | Bombas |
| 5. | Corrente transportadora |
| 6. | Contadores de fluidos |
| 7. | Selos |
| 8. | Pneus e Rodas |
| 9. | Correias |

Fonte: Traduzido de Gerdeen e Rorrer (2012)

Segundo Ferreira, Medeiros e Catarina (2010), os polímeros de engenharia representam atualmente uma classe de materiais altamente capacitados para aplicações extremas.

Silva (2003) afirma que os termoplásticos de engenharia são materiais que são muito utilizados na fabricação de peças para dispositivos mecânicos e ultimamente tem ampliado seu escopo de aplicações, muitas vezes substituindo os metais, pela sistemática melhoria de propriedades como a resistência mecânica, a tenacidade e a estabilidade dimensional. Outras propriedades dos polímeros de engenharia são estabilidade térmica a altas temperaturas e resistência a abrasão.

As crises do petróleo de 1973 e de 1979 trouxeram a conscientização para o problema da escassez de combustível e para a vulnerabilidade do uso indiscriminado de recursos naturais de fontes não renováveis. Essas crises podem ser consideradas como o momento decisivo da tomada de posição quanto à construção de carros mais eficientes, seguros, confortáveis e que consumissem menos combustível. Pode-se dizer, porém, que somente após a superação de limitações tecnológicas, com o desenvolvimento de polímeros de alto desempenho, é que os plásticos passaram a fazer parte essencial dos automóveis. Hoje, considerando-se o volume dos materiais, são usados mais plásticos do que aço na construção de um veículo, devido ao grande número de aplicações que os polímeros encontraram nesse produto. A média de 30 quilos de polímeros empregada por veículo, na década de 70, passou a representar cerca de 180 quilos no final da década de 90 e estima-se que nos próximos cinco anos esse valor ultrapasse os 200 quilos (HEMAIS, 2003).

Laranjeira (2011) afirma que as poliamidas são um polímero de grande interesse em engenharia que tem sido bem aceite na indústria aeronáutica, automóvel, eletrônica e química. Estes materiais são utilizados em chumaceiras e peças de baixo atrito não lubrificadas, componentes resistentes ao impacto, velocímetros, mecanismo de limpa para-brisas, entre outros. Ainda segundo o autor a poliamida reforçada com fibra de vidro é utilizada, por exemplo, em pás de ventiladores de motores, travões, reservatórios de óleo de motores, revestimento a válvulas e caixas de colunas de direção de motores. Em aplicações eletrônicas a poliamida faz parte de dispositivos de ligação, fichas, isolamento de fios de ligação, suporte de antenas e terminais, conforme Figura 11.



Figura 11 - Exemplos de aplicações de algumas poliamidas
Fonte: Laranjeira (2011)

Bhushan (2013) cita que componentes tribológicos comuns dos quais são usados em aplicações industriais, incluem contato por deslizamento e rolamento de contato cilíndrico, selos, engrenagens, cames e comandos, anéis de pistão, escovas elétricas e ferramentas de formar e cortar. Ainda de acordo com o autor mais recentemente, sistemas micro/nanoeletromecânico (MENS/NEMS), também chamado de micro/nano dispositivos ou micro/nano componentes estão sendo produzidos usando técnicas de micro/nano fabricação.

Para Bhushan (2013), componentes tribológicos que operam em baixo para moderado contato de stress (na ordem de 5 Mpa) incluem contato deslizantes, selos, anéis de pistão e escovas elétricas. Já para o autor os componentes que operam com stress Hertzian² alto (na ordem de 500 Mpa) incluem rolamento de contato de esferas, engrenagens, cames e comandos.

² O caso mais geral ocorre quando contato do corpo tem o dobro do raio da curvatura; isso é, quando o raio no plano do rolamento é diferente do raio do plano perpendicular, ambos os planos tomados através do eixo da força de contato. Aqui deve-se considerar somente dois casos especiais de contato de esferas e contato de cilindros. Os resultados apresentados são conhecidos como stress Hertzian.

2.2.3.1. Exemplos de Aplicação Tribológicas em Polímeros

2.2.3.1.1. Contato de Buchas Deslizantes Rotativas

Para Bhushan (2013), o contato de buchas deslizantes rotativas, são os elementos de máquinas que suportam o movimento de um eixo contra um alojamento estacionário, onde são chamados de rolamentos deslizantes. No geral, pode-se classificar rolamentos como também contatos deslizantes ou rolamentos por contato de rolo. Em rolamentos de contato deslizantes, também conhecidos como deslizante ou rolamentos planos ou buchas, que a carga é transmitida entre a movimentação das peças pelo contato deslizante, conforme Figura 12.

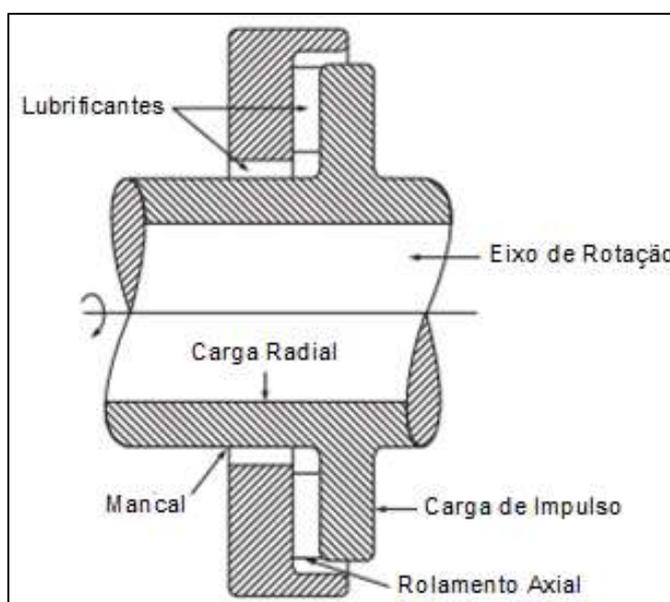


Figura 12 - Esquema do eixo de rotação suportado por um rolamento e um mancal.

Fonte: Traduzido de Bhushan (2013)

2.2.3.1.2. Contatos de Rolamentos Rolantes

A definição de contatos de rolamentos rolantes de acordo com Wang e Chung (2013) é que em muitas aplicações e frequentemente são selecionados para alcançar um tempo de vida útil requerido; conseqüentemente é necessário fazer o cálculo de sua vida útil. Apesar de o rolamento poder falhar devido a muitas razões (montagem errada, desgaste, queima de graxa, falha da gaiola e assim vai), cálculo de vida útil de rolamento é limitado pela predição da fadiga de contato rolante descrito como o tempo ou número de revoluções são precisos antes de estilhaços, micro estilhaços, ou descascamento ocorrer, conforme Figura 13.

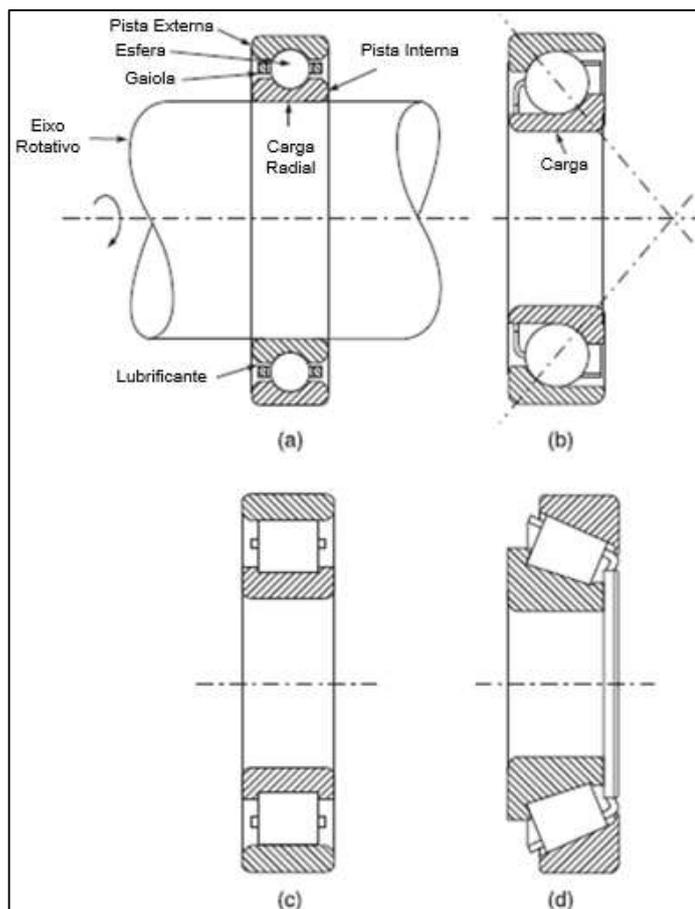


Figura 13 - Esquemas de (a) um rolamento de esfera radial, (b) rolamento de esferas com contato angular, (c) rolamento de rolo cilíndrico, e (d) rolamento de rolo cônico.

Fonte: Traduzido de Bhushan (2013)

2.2.3.1.3. Selos

Sobre “selos”, Bhushan (2013) menciona que:

A função primária dos selos, chamado de selos de fluídos, é de limitar a perda de lubrificante ou processo de fluído (líquido ou gás) dos sistemas e prevenir contaminação dos sistemas pelo ambiente operacional. Os selos são divididos entre duas principais classes: selos estáticos e dinâmicos, conforme Figura 14. Selos estáticos são vedação, juntas de *O’ring*, juntas acopladas, e dispositivos similares usados para selar conexões estáticas ou aberturas. Um selo dinâmico é usado para restringir o fluxo do fluído através da abertura fechado pelo movimento relativo de superfícies. Selos dinâmicos incluem tipo de folga fixa (selos de labirinto, anéis de vedação flutuantes e selos ferrofluidos) e tipos de superfícies guiadas (selos de face mecânica, lábios de vedação e selos abrasíveis).

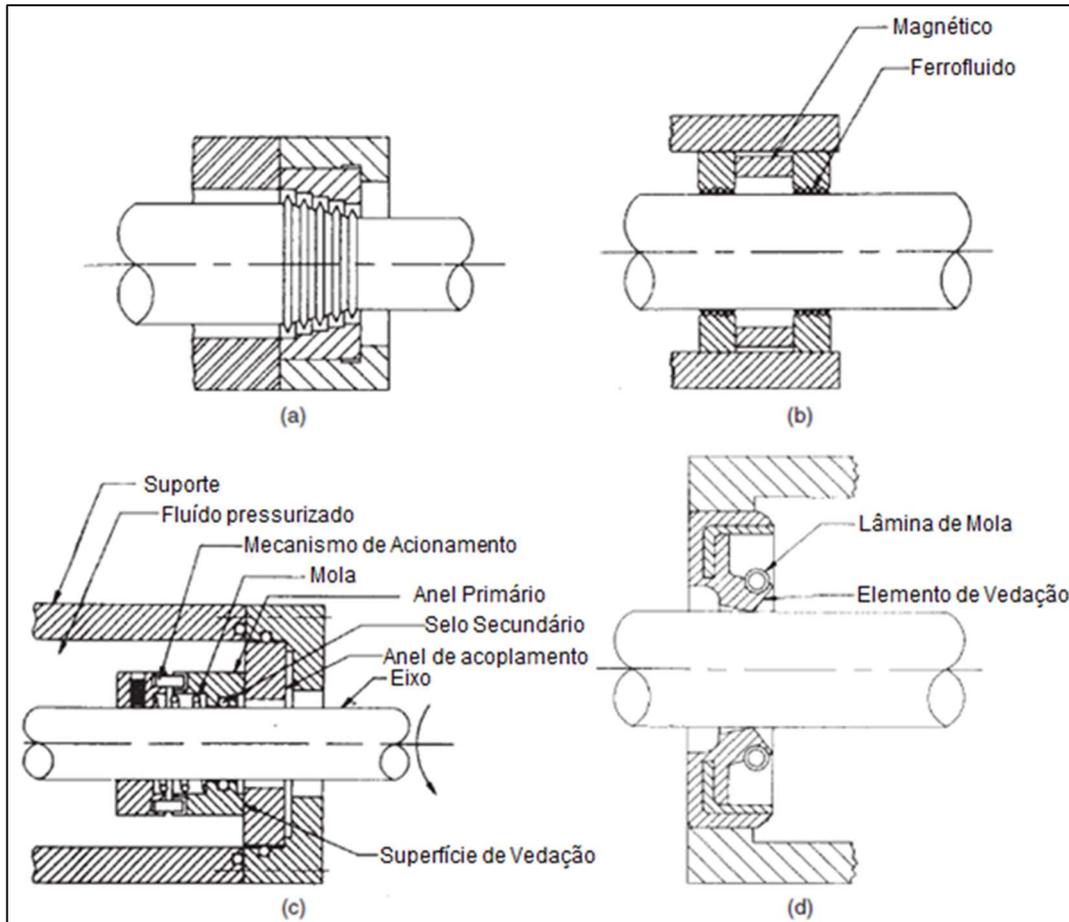


Figura 14 - Esquemas do (a) selo de labirinto, (b) selo ferrofluidico, (c) uma face de selo mecânica com pressurização externa, anel primário de rotação e anel de acoplamento fixo e (d) um selo de lábio em superfície cilíndrica.

Fonte: Traduzido de Bhushan (2013).

2.2.3.1.4. Engrenagens

Segundo Bhushan (2013), engrenagens são rodas dentadas usadas para transmissão de movimento rotacional de um eixo para outro e uma mudança na velocidade rotacional. Ainda o autor afirma que tem diferentes tipos de engrenagem incluindo de dente reto, helicoidal, angulares e engrenagens sem fim, conforme Figura 15.

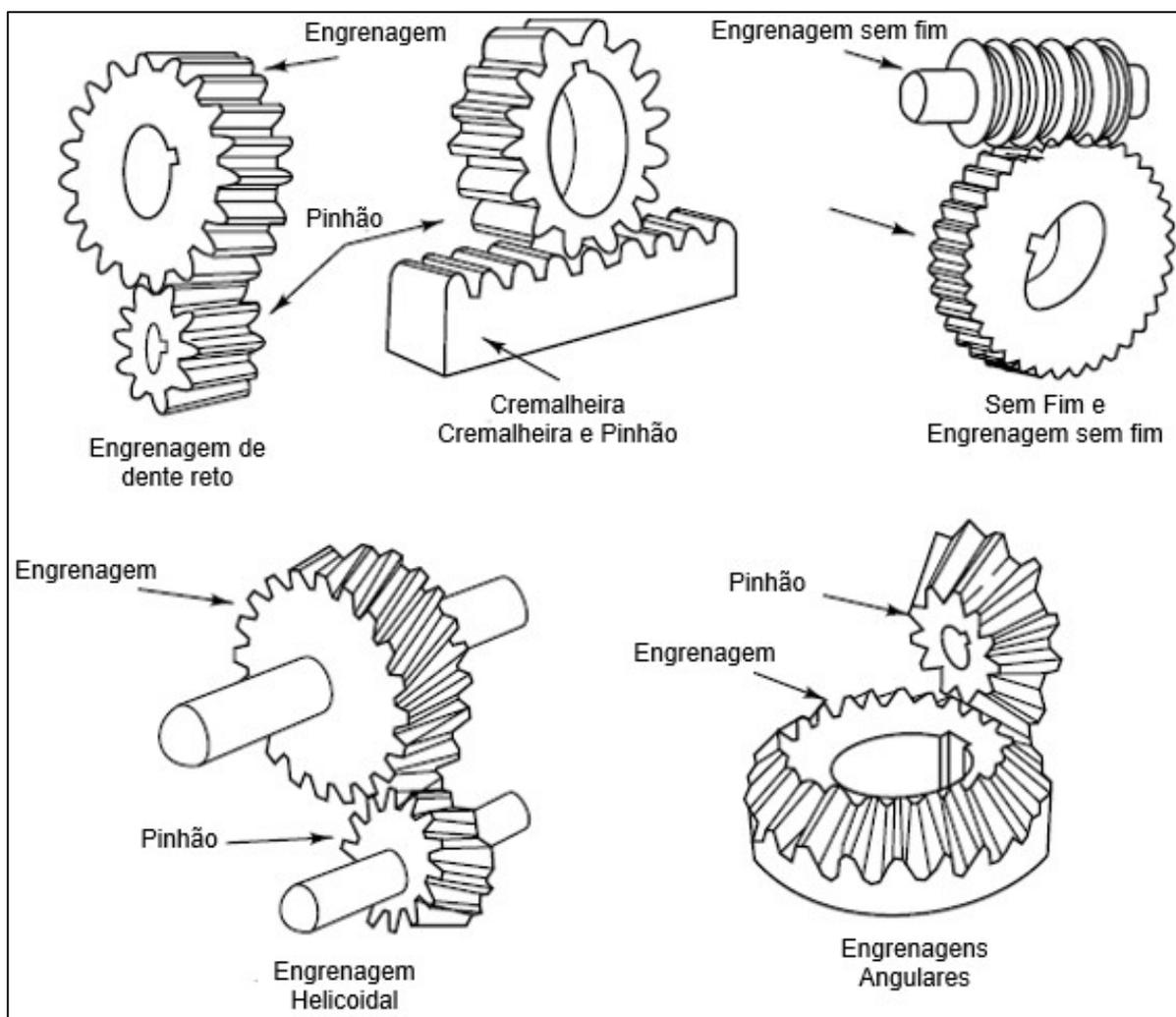


Figura 15 - Tipos de Engrenagens
 Fonte: Traduzido de Joshi (2007)

2.2.3.1.5. Sistemas Seguidores de Cames

Bhushan (2013) afirma que sistemas seguidores de cames são extensivamente empregados em máquinas de engenharia para transformar movimentação rotativa para movimento deslizante ou vice-versa, em sistema de válvulas automotivas e máquinas têxteis. O came seguidor pode ser de seguidor plano ou um seguidor de rolo, conforme Figura 16. Segundo Joshi (2007), no seguidor plano a variação do raio 'R', do pivô de rotação, movimenta radialmente a chaveta em direção ou distante do pivô. Um aumento no raio resulta em um corte de curso, e uma diminuição causa o retorno do curso. Geralmente, o retorno do curso pode ser feito pela gravidade, ou uma mola. Para um positivo, e preciso retorno de curso, um came de encaixe ou um came plano é usado.

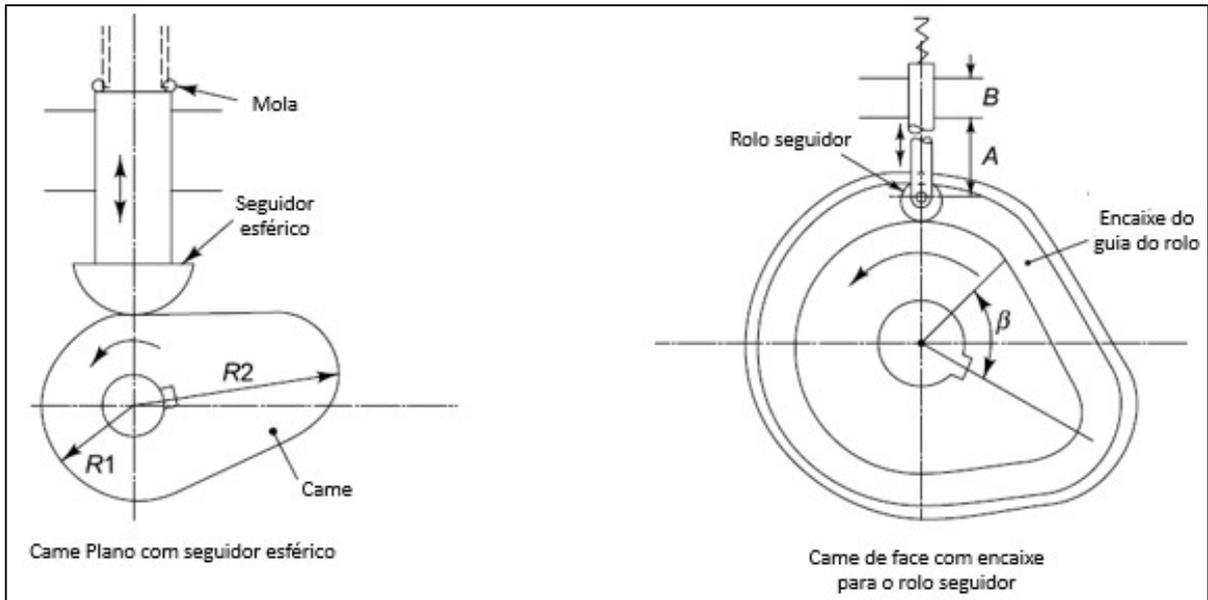


Figura 16 - Esquema de um came plano e um came com rolo seguidor

Fonte: Traduzido de Joshi (2007)

2.2.3.1.6. Anéis de Pistão

Bhushan (2013) define anéis de pistão como dispositivos mecânicos de selagem usados para selar pistões, êmbolo dos pistões, haste de pistão retilíneo e interno dos cilindros. Em motores a gasolina e diesel e bombas de compressor tipo retilíneo lubrificado, os anéis são geralmente anéis de metal de compressão do tipo dividido. O autor afirma que quando são posicionados nos sulcos do pistão provido de lubrificação, um selo de movimentação é formado entre o pistão e a borda do cilindro. Para Bhushan (2013) os anéis de pistão são divididos em duas categorias anéis de compressão e anéis de controle do óleo, conforme Figura 17.

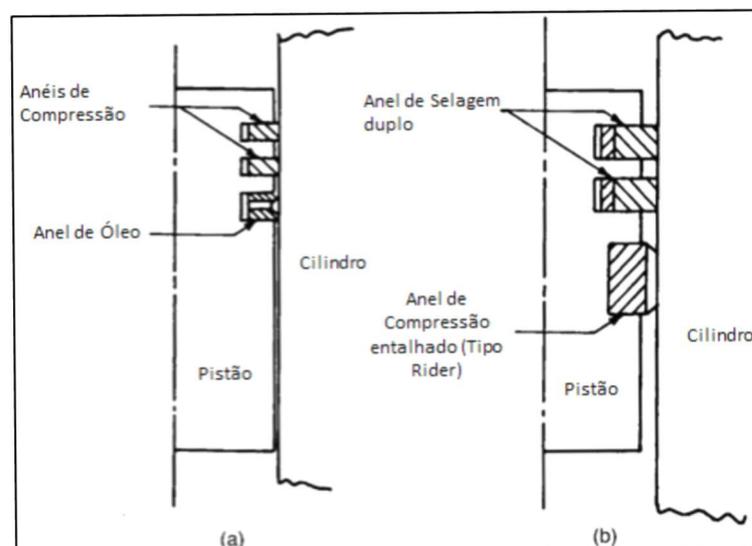


Figura 17 - Esquema de (a) pistão lubrificado e (b) não lubrificado

Fonte: Traduzido de Bhushan (2013)

Em motores de combustão interna Andersson (2003 apud Volci, 2007) explica que os anéis de pistão são retentores metálicos responsáveis basicamente por duas funções primordiais no funcionamento de um motor a combustão interna: manter os gases pressurizados da combustão na parte superior e a segunda função, que se tornou mais importante nos últimos tempos em função do maior rigor das normas de emissões, manter o óleo do motor abaixo do pistão, conforme Figura 18.



Figura 18 - Conjunto de anéis montados sobre o pistão
Fonte: Volci (2007).

2.2.3.1.7. Escovas Elétricas

Wang e Chung (2013) afirma que escova elétrica é um condutor para transferir sinal elétrico ou energia elétrica entre uma peça estacionária e a peça móvel que geralmente é um comutador, anel de deslizamento, ou outros condutores móveis. Bhushan (2013) especifica que máquinas que utilizam escovas elétricas podem ser amplamente classificados em dois grupos, conforme Figura 19.

Para Bhushan (2013), no primeiro grupo, as máquinas requerem um comutador. Nessas máquinas, as escovas têm de ser capazes de transferir a corrente elétrica para o circuito externo como também na assistência da função de comutação. Dentro dessa classe de máquina são o motor de corrente contínua e geradores.

No segundo grupo Bhushan (2013) define que nas máquinas as escovas são usadas somente para transmitir energia elétrica de uma fonte estacionária para um componente móvel por meio de anel de deslizamento. Exemplos de anel de deslizamento são geradores de corrente alternada, motores e aplicações especiais.

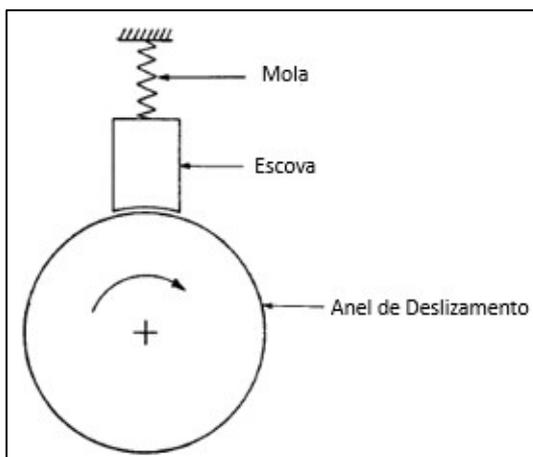


Figura 19 - Esquema de escova elétrica com anel de deslizamento.

Fonte: Traduzido de Bhushan (2013)

2.2.3.1.8. Sistemas Micro Eletromecânicos (MEMS) / Sistemas Nano Eletromecânicos (NEMS)

Bhushan (2007 apud Bortoleto 2015) comenta que a nanotribologia tem sido intensamente estudada nos anos recentes, devido ao desenvolvimento da nanotecnologia, especialmente em sistemas micro ou nanoeletromecânicos (MEMS/NEMS), conforme Figura 20. Bortoleto (2015) afirma que para esses sistemas, devido ao seu pequeno tamanho e alta relação superfície/volume, o atrito e as forças de adesão podem apresentar fenômenos incomuns, que desempenham um papel importante na determinação de suas propriedades mecânicas.

Para Bortoleto (2015), destacam-se também, os estudos e abordagens da nanotribologia aplicados à investigação das origens do atrito e para o desenvolvimento de um entendimento fundamental dos fenômenos interfaciais em pequena escala.

Gnecco e Meyer (2007) citam que o principal desafio para projetistas de MEMS é de superar os efeitos do atrito. Como o nome sugere, atrito é o efeito onde estruturas microscópicas tendem a aderir uma a outra quando elas estão em contato.

Segundo Gnecco e Meyer (2007), com o aumento da complexidade dos componentes, uma profunda investigação desse fenômeno é essencial para contrariar isto. Atrito é também a causa principal de falhas em muitas aplicações MEMS/NEMS incluindo acelerômetros usados em dispositivos de Air-Bag automotivos e dispositivos de micro espelhos digitais (DMDs) usados em equipamentos comerciais de processamento de luz digital.

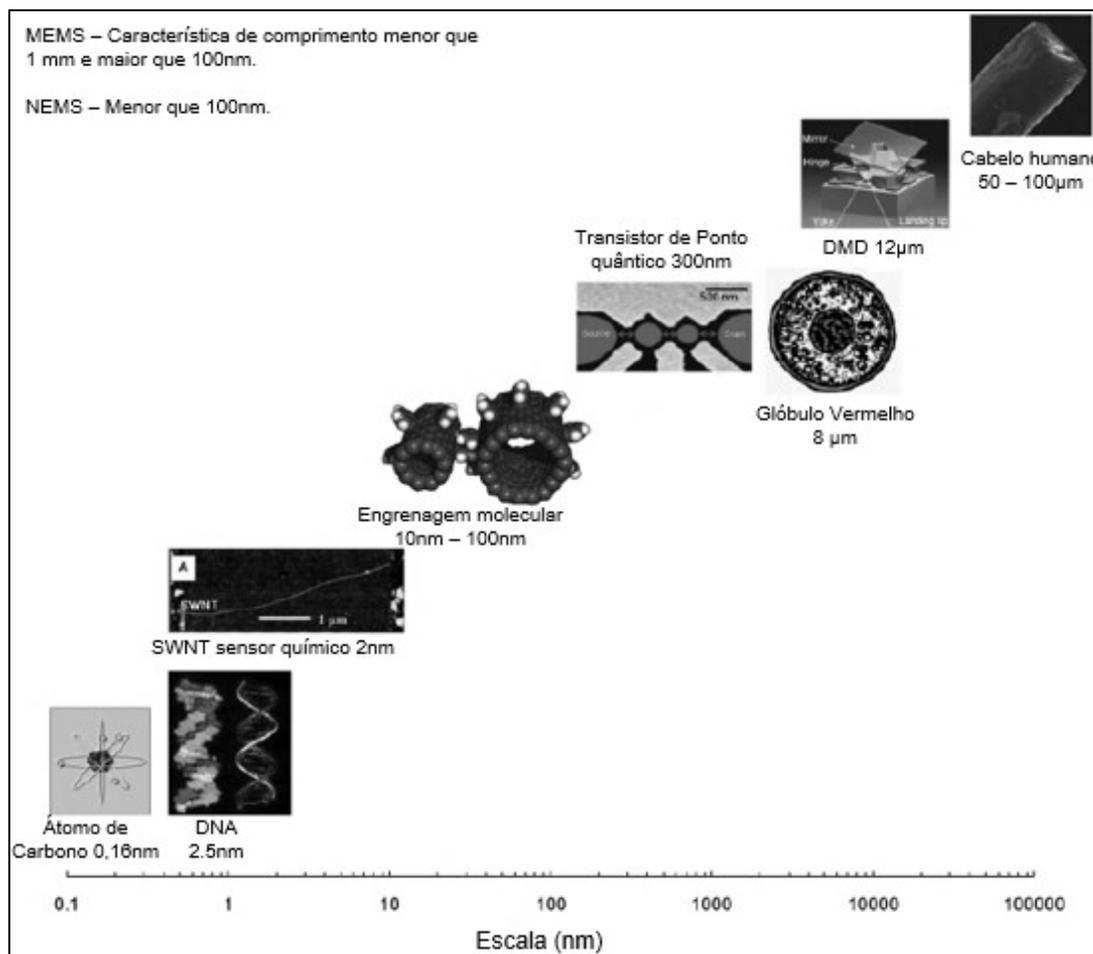


Figura 20 - Características dimensionais de MEMS, NEMS e BioNEMS em perspectiva
 Fonte: Traduzido de Bhushan (2013)

2.2.4 Desgaste em Polímeros

De acordo com Bhushan (2013), polímeros incluem plásticos e elásticos. Polímeros geralmente exibem baixo atrito quando comparados a pares de metais e cerâmicos, mas exibem desgaste moderado. Ainda segundo o autor, os plásticos mais comuns usados em aplicações de deslizamento contra superfícies de acoplamentos duros incluem acetal, poliamida (Nylon), polietileno de alta densidade (PEAD), poliimida, sulfeto de polifenileno (PPS) e PTFE. Já para os elásticos o autor afirma que, um número de elásticos são também usados em aplicação de rolamentos e selos em cargas e velocidades mais baixas do que em plásticos. Os mais comuns são borracha natural e borracha sintética, borracha de butadieno – acrinitrilo, borracha de estireno-butadieno e borracha de silicone.

De acordo com Silva (2010), em geral processos de atrito e desgaste envolvem interações complexas entre os materiais em contato que dependem não apenas das propriedades dos materiais mas das condições de deslizamento.

Segundo Briscoe e Sinha (2002), o processo de 'desgaste' pode ser definida variadamente mas geralmente é quantitativamente medido em termos de massa ou volume, perda de um deslizamento ou contato erudido.

Myshkin, Petrokovets e Kovalev (2005) afirmam que as mudanças na camada superficial aumentam devido ao stress mecânico, temperatura e reações químicas. Polímeros devido as suas estruturas específicas e comportamento mecânico são mais sensitivos a esses fatores. Ainda de acordo com o autor a temperatura local na interface pode ser substancialmente maior do que o ambiente, e ainda pode ser aumentada pelos contatos de aspereza pela transição das 'rebarbas' ou 'pontos quentes'. A temperatura exerce uma influência no desgaste de polímeros. Conseqüentemente, foi mostrado um número de polímeros deslizando contra o aço onde passa um mínimo na característica temperatura.

Para Briscoe e Sinha (2002), há pelo menos três caminhos pelo qual o desgaste do polímero pode ser racionalizado simples como a Figura 21:

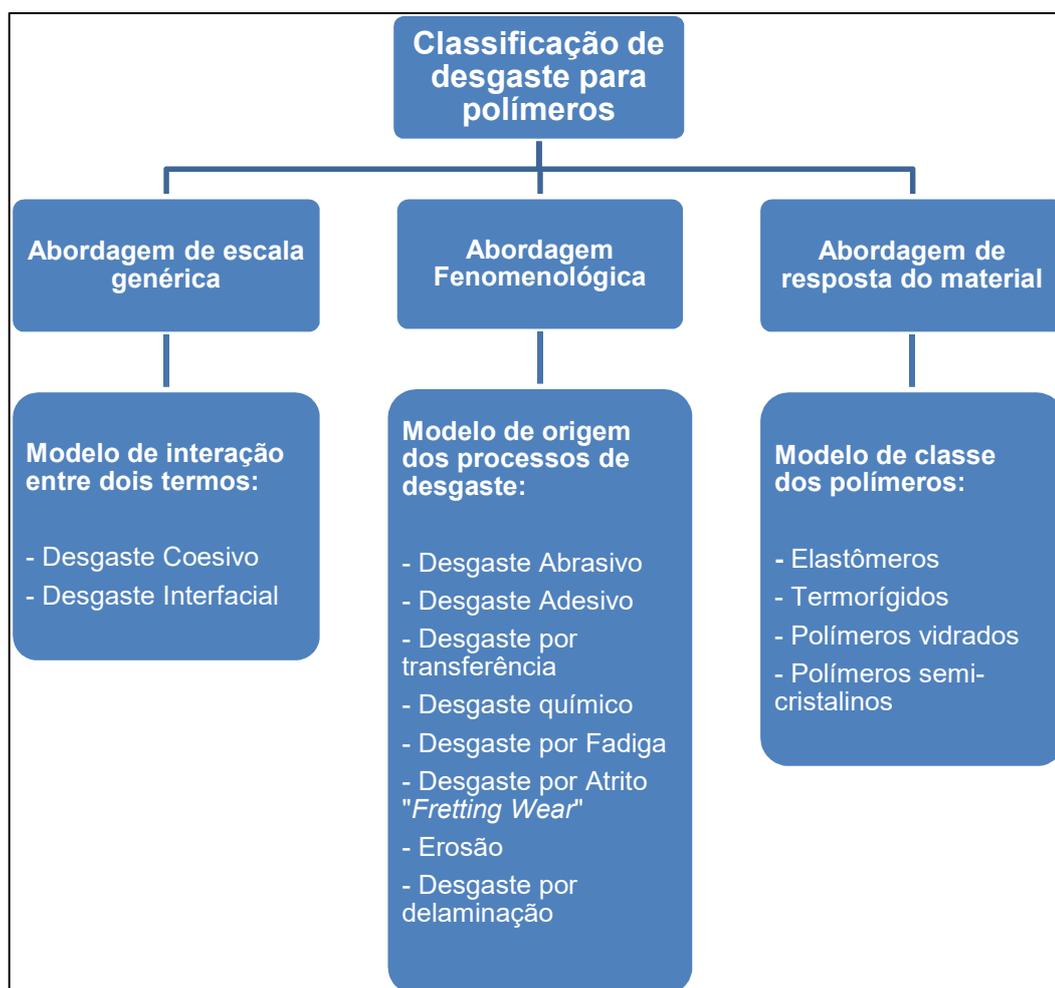


Figura 21 - Abordagem simplificada para a classificação de desgaste de polímeros.
Fonte: Briscoe e Sinha (2002)

Briscoe (1981 apud Rodrigues, 2007) menciona que são distinguidos os processos de desgaste para os materiais poliméricos como o desgaste coesivo (inclui os mecanismos de abrasão e fadiga superficial; o desgaste é resultante da abrasão associada à deformação plástica do polímero ou por crescimento da trinca na região deformada) e desgaste interfacial (inclui adesão e reação triboquímica; o desgaste pode ser resultante da adesão entre as superfícies e a deformação ocorrer apenas na superfície do polímero).

2.2.4.1. Abordagem de escala genérica

A afirmação de Briscoe e Sinha (2002), é de que abordagens de escala genérica podem ser tomadas primeiro, do qual emerge de um valor aceitável do modelo de fricção de dois termos que não interagem.

Para Briscoe e Tabor (apud Gahr, 1987), são as classes gerais de processos de desgaste de polímeros. O desgaste coesivo abrange os mecanismos de abrasão e fadiga, enquanto o desgaste interfacial inclui adesão e processos químicos. Desgaste interfacial resulta da dissipação de energia através de uma zona adjacente muito estreita de contato dos materiais, conforme Figura 22.

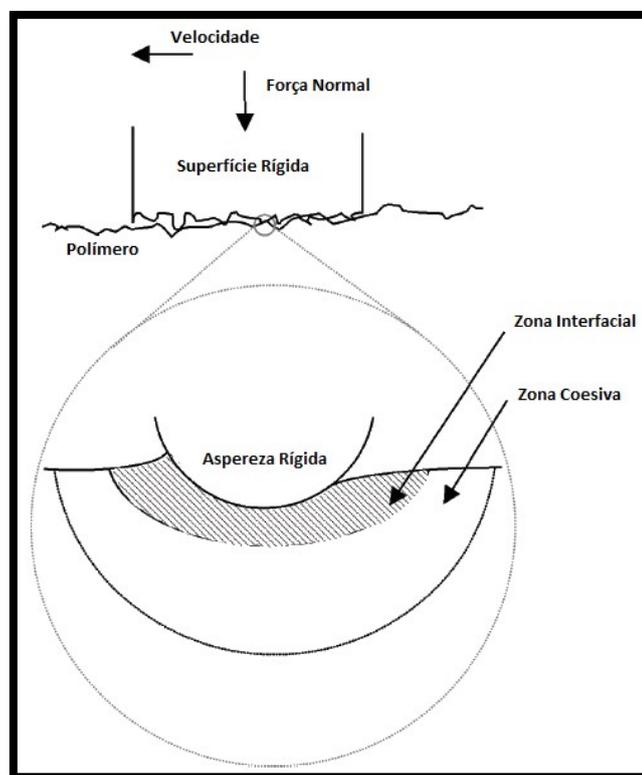


Figura 22 – Modelo de processo de desgaste de dois termos. A distinção entre o processo de desgaste interfacial e coesivo surge da extensão do material mais mole

(usualmente polímero) por uma rígida, por uma aspereza não dissipada da contraface. Para o desgaste interfacial a energia de fricção é dissipada principalmente pela interação adesiva, enquanto o desgaste coesivo é dissipado pelas interações adesiva e abrasiva (subsuperfície)
Fonte: Traduzido de Briscoe e Sinha (2002)

2.2.4.1.1. Desgaste Coesivo

Silva (2010) afirma que o desgaste coesivo resulta da deformação superficial e subsuperficial do material, originada pela passagem de protuberâncias do contracorpo sobre a superfície do polímero. A deformação resultante pode ser plástica ou elástica. Ainda segundo a autora, no primeiro caso o mecanismo de desgaste é chamado abrasão, enquanto no segundo é associado a fadiga.

Segundo Sinha (apud ASM, 2002), a subsuperfície danificada no material pode ser causada pelo deslizamento da superfície em duas direções. Primeiro, se um polímero está deslizando contra uma superfície rugosa e dura, as asperezas podem sulcar dentro do corpo do polímero removendo detritos. Ainda de acordo com o autor esses detritos do material são transferidos para a contraface, formando a transferência de filme (também conhecido como “terceiro corpo”), do qual eventualmente faz a contraface parecer suave. A formação de um filme estável na contraface conduz para uma mudança na taxa de desgaste do polímero.

Sinha (apud ASM, 2002) afirma que a segunda causa da subsuperfície danificada é através da trinca por fadiga subsuperfície, do qual pode conduzir para a remoção do material quando essas trincas crescem para a superfície desses polímeros.

2.2.4.1.2. Desgaste Interfacial

Andrade (2017) destaca que o desgaste interfacial se origina da dissipação de energia dentro de uma faixa muito próxima da superfície do polímero e pode ser definida como a remoção do material devido a dissipação de atrito interfacial entre as asperezas resultando em amolecimento do material por aquecimento, desgaste adesivo ou desgaste químico. Ainda para o autor o desgaste interfacial pode ser classificado com relação a sua dissipação de energia: isotérmica e quase-adiabática. A dissipação de calor adiabática pode mudar as propriedades mecânicas da região da interface enquanto a quase-adiabática afeta somente a camada transferida.

2.2.4.2. Abordagem de escala fenomenológica

Briscoe e Sinha (2002) citam que essa abordagem é mais pragmática seguiria uma linha mais clássica e uma listagem de processos de desgaste por algum julgamento entendido das origens e consequências. Deste modo podem ser 'abrasão', 'desgaste por transferência', 'desgaste por atrito', 'desgaste químico', 'erosão', 'desgaste por fadiga', e 'desgaste por delaminação' e assim por diante; isto pode ser descrito como uma classificação fenomenológica e subjetiva.

2.2.4.2.1. Desgaste Abrasivo

Segundo Stoeterau (2004 apud Teixeira, 2012), a abrasão geralmente ocorre quando superfícies duras e rugosas, ou superfícies dúcteis que contém partículas duras, deslizam sobre uma superfície mais mole, ou ocorre quando partículas duras soltas rolam ou deslizam entre duas superfícies. Na Figura 23, pode-se ver um grão abrasivo que adere temporariamente em uma das superfícies, ou é incrustado nela, e risca a superfície oposta.

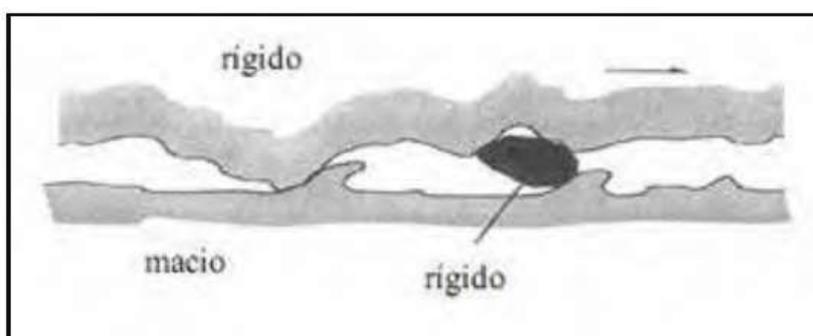


Figura 23 - Esquema do desgaste abrasivo entre um corpo rígido, um corpo macio e uma partícula rígida
Fonte: Teixeira (2012)

De acordo com Teixeira (2012), a Figura 24 ilustra a formação de proa e sulcamento (deformação plástica) pelo mecanismo de desgaste por abrasão bem como o surgimento da fratura frágil e desprendimento do grão.

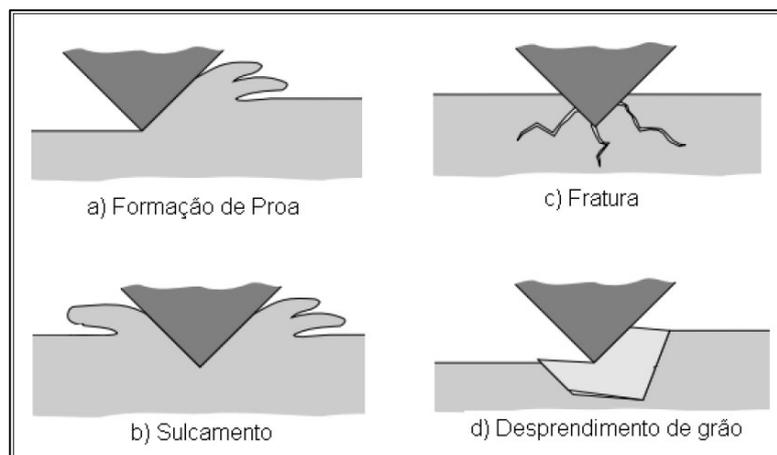


Figura 24 - Principais mecanismos de desgaste por abrasão: a) formação de proa, b) sulcamento, c) fratura, d) desprendimento do grão
Fonte: Teixeira (2012)

Freitas (2009) afirma que o desgaste abrasivo pode ser classificado como de dois ou três corpos, conforme Figura 25. Na abrasão de dois corpos, as partículas abrasivas são movidas livremente sobre a superfície do material como areia em uma calha. Já no processo de três corpos, as partículas ficam aprisionadas entre as duas superfícies, no desgaste abrasivo de três corpos as partículas abrasivas agem como elemento de interface entre o corpo-sólido e o contra-corpo.

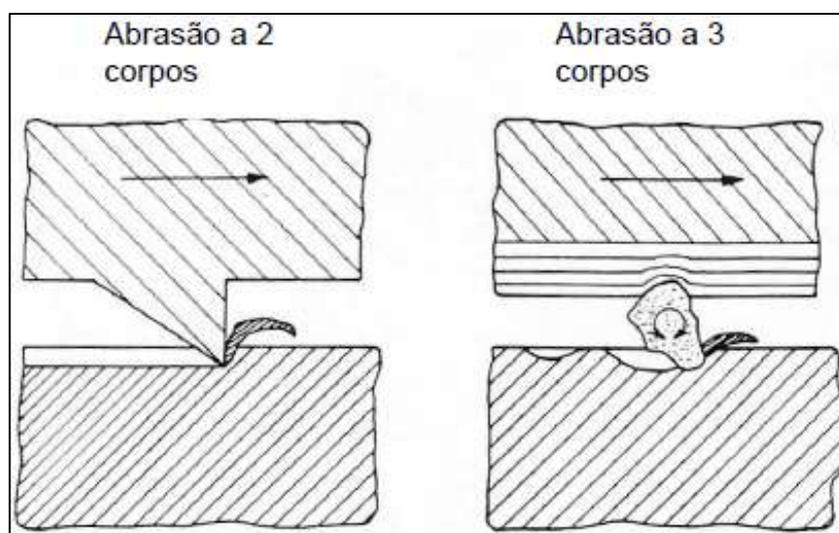


Figura 25 - Desgaste de dois e três corpos.
Fonte: Freitas (2009)

Stoeterau (2004 apud Teixeira, 2012) exemplifica que o mecanismo de desgaste abrasivo é utilizado, em larga escala, em operações de acabamento superficial. O tipo abrasivo de dois corpos é empregado em lixas, limas, rebolos, papéis e tecidos abrasivos. O desgaste do tipo três corpos é empregados para processos de lapidação e polimento.

2.2.4.2.2. Desgaste Adesivo e por transferência de material.

Para Myshkin, Petrokovets e Kovalev (2005), desgaste adesivo resulta do cisalhamento das junções de atrito. Esse processo de desgaste na formação da junção da adesão, a qual cresce e fratura. Uma característica distinta desse desgaste é que a transferência do material de uma superfície para outra ocorre devido uma colagem localizada entre as superfícies sólidas de contato.

Bely (1982 apud MYSHKIN; PETROKOVETS; KOVALEV, 2005) nota que a transferência do polímero é a característica mais importante em desgaste adesivo de polímeros. É razoável que esse processo associado com outros tipos de desgaste (fadiga, abrasão e outros) acompanham o desgaste adesivo, conforme Figura 26.

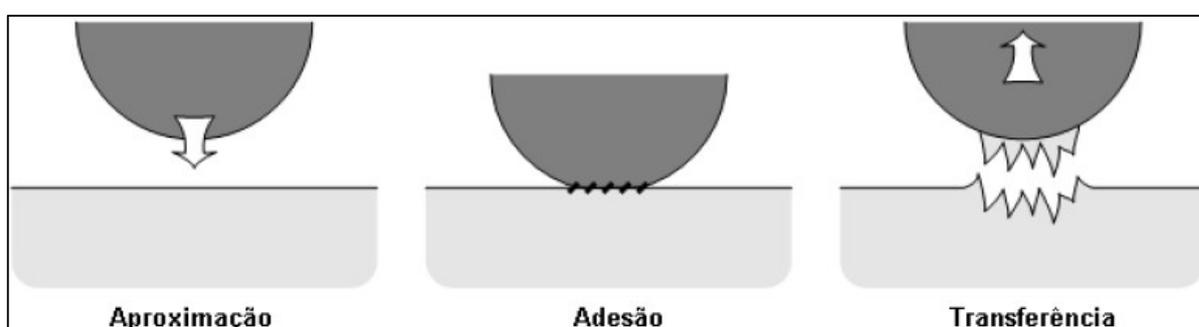


Figura 26 - Esquema de Desgaste Adesivo
Fonte: Teixeira (2012)

Segundo Mishkin (2005 apud Teixeira, 2012), do ponto de vista microscópico, quando dois corpos estão em contato, as forças superficiais de atração e repulsão interagem entre os átomos e as moléculas de ambas as superfícies, conforme Figura 27.

Neste mecanismo de desgaste, as asperezas das superfícies que estão em contato formam junções adesivas. Estas junções aumentam com o aumento da deformação plástica e com o movimento relativo contínuo. A ruptura das junções pode transferir material de uma superfície para outra e gerar os detritos (GAHR, 1987).

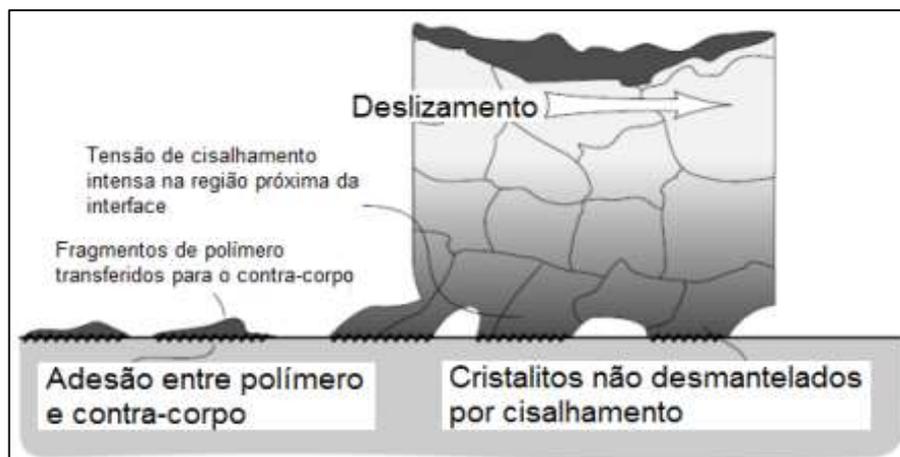


Figura 27 - Mecanismo de transferência normal, apresentado pela maior parte dos polímeros.

Fonte: Boutin e Rocha (2015)

2.2.4.2.3. Desgaste triboquímico

Silva (2010) afirma que a formação de produtos de reações químicas é um fenômeno bem conhecido quando se fala em contatos de deslizamento. Zum Gahr (1987) menciona que este processo é classificado como moderado ou severo é devido a contato entre os corpos onde estão envolvidos eventos como adesão, deformação plástica, formação de junção e transferência de material. Este desgaste resulta em adesivo. Este ocorre apenas quando o contracorpo é “liso” e envolve a transferência de material para o contracorpo mais duro e subsequente remoção como partícula de desgaste (HUTCHINGS, 1992 apud SILVA, 2010).

Segundo Stachowiak e Batchelhor (1996 apud Teixeira, 2012), o desgaste corrosivo ocorre em uma vasta gama de situações. A causa fundamental desta forma de desgaste é a reação química que ocorre entre o material desgastado e um meio agressivo quimicamente, que pode ser tanto um reagente químico, um lubrificante ou mesmo ar. Desgaste corrosivo é um termo geral relacionado com qualquer forma de desgaste dependente de um processo químico ou corrosivo, conforme Figura 28. Ainda segundo os autores, nesta forma de desgaste a taxa de desgaste aumenta enquanto o coeficiente de atrito reduz. Esta contradição que ocorre entre atrito e o desgaste serve para identificar estes processos de desgaste.



Figura 28 - a) Desgaste corrosivo - início da reação química entre as superfícies; b) Desgaste das superfícies pelo mecanismo de corrosão
Fonte: Teixeira (2012)

Santana (2009) define que o desgaste por reação triboquímica é caracterizado quando duas superfícies sólidas em contato reagem com o ambiente. E pode ser dividido em quatro categorias:

- a) O contato metálico entre as asperezas da superfície que promove a remoção de metal devido à aderência. Pequenos detritos do desgaste produzidos podem estar oxidados;
- b) Reação química de metais com o ambiente resulta em camadas de proteção superficial que reduz o contato metálico;
- c) Trincamento da camada superficial devido a altas pressões localizadas ou microfadiga resultando em detritos de desgaste não metálico;
- d) Detritos de desgaste metálico e não metálicos podem atuar como abrasivos nas superfícies em contato. A formação de uma nova camada de proteção pode levar ao amaciamento das superfícies novamente.

2.2.4.2.4. Desgaste por Fadiga

Segundo Zum Gahr (1987), o desgaste devido à fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e destacamento de material causado pelo carregamento cíclico da superfície sólida. A fadiga localizada pode ocorrer em escala microscópica devido ao contato de deslizamento repetido das asperezas de uma superfície sólida em movimento relativo.

Both (2011) menciona que a classificação do desgaste por fadiga separa os modos de ocorrência de acordo pelo modo como os esforços agem e como o material é removido.

Budinsky (1998 apud Both, 2011) classifica da seguinte maneira

- *Pitting* se refere à formação de cavidades na superfície. Isto ocorre pela formação de trincas subsuperficiais causadas por deslizamento ou rolamento repetitivo; o crescimento destas trincas em direção à superfície produz uma fratura localizada. Concentradores de tensão no material, como carbonetos, aumentam a suscetibilidade ao problema.
- O *spalling* ou lascamento é a fratura e remoção de material da superfície na forma de escamas. O mecanismo causador é o mesmo

que no *pitting*, porém a forma como ele se manifesta é mais intensa. É comum em peças revestidas ou com tratamento superficial.

- O desgaste causado por impacto em uma superfície é mais associado à deformação plástica, mas esforços repetitivos podem provocar falha superficial por fadiga. Neste caso, os repetidos choques entre superfícies ocasionam os mecanismos de surgimento e propagação de trincas, que desencadeiam os dois processos já abordados de *pitting* e *spalling*. Ocorre em ferramentas como martelos e furadeiras pneumáticas.
- O brinelling é o dano superficial que surge por carga excessiva em um elemento estacionário. O dano consiste em deformação plástica, e ocorre em um único evento. Embora a ocorrência em um único evento descaracterize à fadiga, este modo de falha é classificado neste grupo por que ele ocorre em componentes que são submetidos a cargas que ultrapassem a sua tensão de escoamento.

Na Figura 29, uma trinca primária é formada em algum ponto fraco da superfície (a) e se propaga (b). Uma trinca secundária pode ser desenvolvida a partir da trinca primária ou se conectar com uma trinca na subsuperfície. Quando a trinca desenvolvida encontra a superfície novamente, uma partícula de desgaste é liberada (STACHOWIAK; BATCHELOR, 1996 apud SANTANA, 2009).

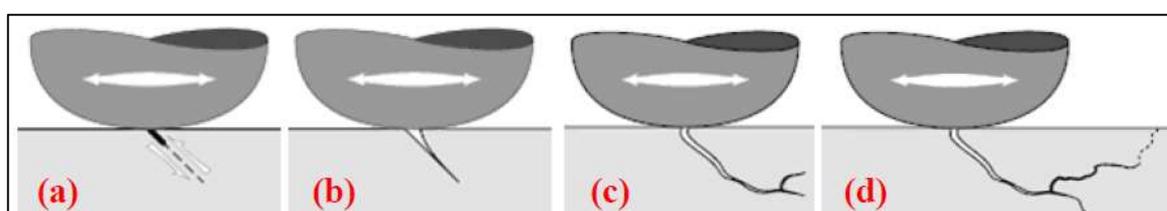


Figura 29 - Mecanismos de propagação de trinca durante o processo de fadiga
Fonte: Santana (2009)

2.2.4.2.5. Desgaste por atrito “*Fretting wear*”

Segundo Bhushan (2013), o desgaste por atrito “*fretting wear*”, ocorre quando movimento oscilatório de amplitude baixa na direção tangencial (variando de um pouco de dezenas de nanômetros para um pouco de dezena de microns) acontece entre as superfícies de contato, que estão normalmente em repouso, conforme Figura 30. Isso é uma ocorrência comum, desde que muitas máquinas são sujeitadas a vibração, ambos em trânsito e operação. Ainda de acordo com o autor exemplos de componentes vulneráveis são encaixe justos, peças parafusadas e entalhes. Os contatos entre cubos, encaixe justo e prensado e caixas de rolamento em eixos rotativos com carga são particularmente propensos a causar danos por atrito.

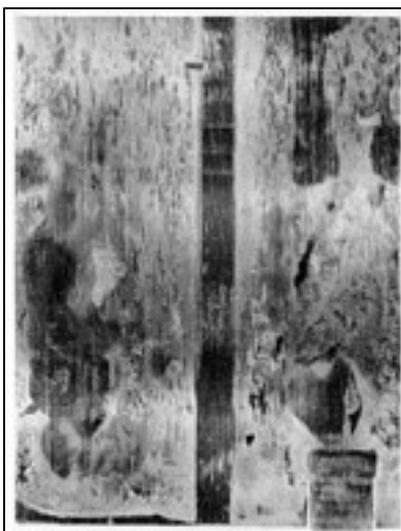


Figura 30 - Danificação por atrito "*fretting damage*" ocorrido no anel do rolamento por causa de pressão de contato insuficiente entre o anel e a caixa do rolamento.

Fonte: ASM (1992)

Sobre "definir" Bhushan (2013) afirma que

Basicamente, *fretting* é uma forma de desgaste adesivo ou abrasivo, onde as forças normais causam adesão entre as asperezas e os movimentos oscilatórios causam ruptura, resultando em detritos do desgaste. Mais comumente, *fretting* é combinado com corrosão, do qual nesse caso o modo de desgaste é conhecido como atrito por corrosão. Por exemplo, no caso de partículas de ferro, o desgaste recente é nascente da superfície oxidada (corroída) para Fe_2O_3 , e a característica fina marrom avermelhada em pó é produzida conhecido como cacau.

2.2.4.2.6. Desgaste por erosão

Partícula sólida de erosão, é um típico modo de desgaste, é a perda de material resultante de um impacto repetitivo de pequenas partículas sólidas, conforme Figura 31. É esperado sempre que as partículas duras são arrastadas em um meio de gás ou líquido que invade um sólido a qualquer velocidade significativa. Em ambos os casos, partículas podem ser aceleradas ou desaceleradas, e o fluido pode mudar as direções de movimentação (Patnaik *et al.*, 2009).

De acordo com Patnaik et al. (2009), apesar do processo principal ser o impacto mecânico, causado pelo choque das partículas sólidas no material em alvo, processos secundários, como térmico, químico, e reações físicas entre as contrapeças estão ocorrendo durante erosão. Ainda de acordo com os autores, estudos para desenvolver o entendimento dos mecanismos de um desgaste erosivo foi motivado por redução de vida útil e falhas mecânicas em componentes usado em ambientes erosivos, por exemplo tubulações transportando lixívia de areia, na refinação de petróleo, na turbo

a gás de avião/lâminas de compressor, em bocais de cauda do motor do foguete, tubos de caldeira expostos a cinzas volantes.

Para Silva (2017), basicamente os mecanismos de desgaste na erosão por partículas sólidas são: o corte, sulcamento, deformação plástica, a fratura frágil e a fusão. O autor afirma, que os mecanismos de corte e sulcamento são semelhantes aos encontrados no desgaste abrasivo, desta forma o microsulcamento é definido como o deslocamento do material para o lado ou a frente da partícula abrasiva em deslocamento. Já quando há predominância de deformação plástica e da fratura frágil, as maiores taxas são encontradas com a incidência das partículas abrasivas em ângulos normais, caracterizando um comportamento frágil.

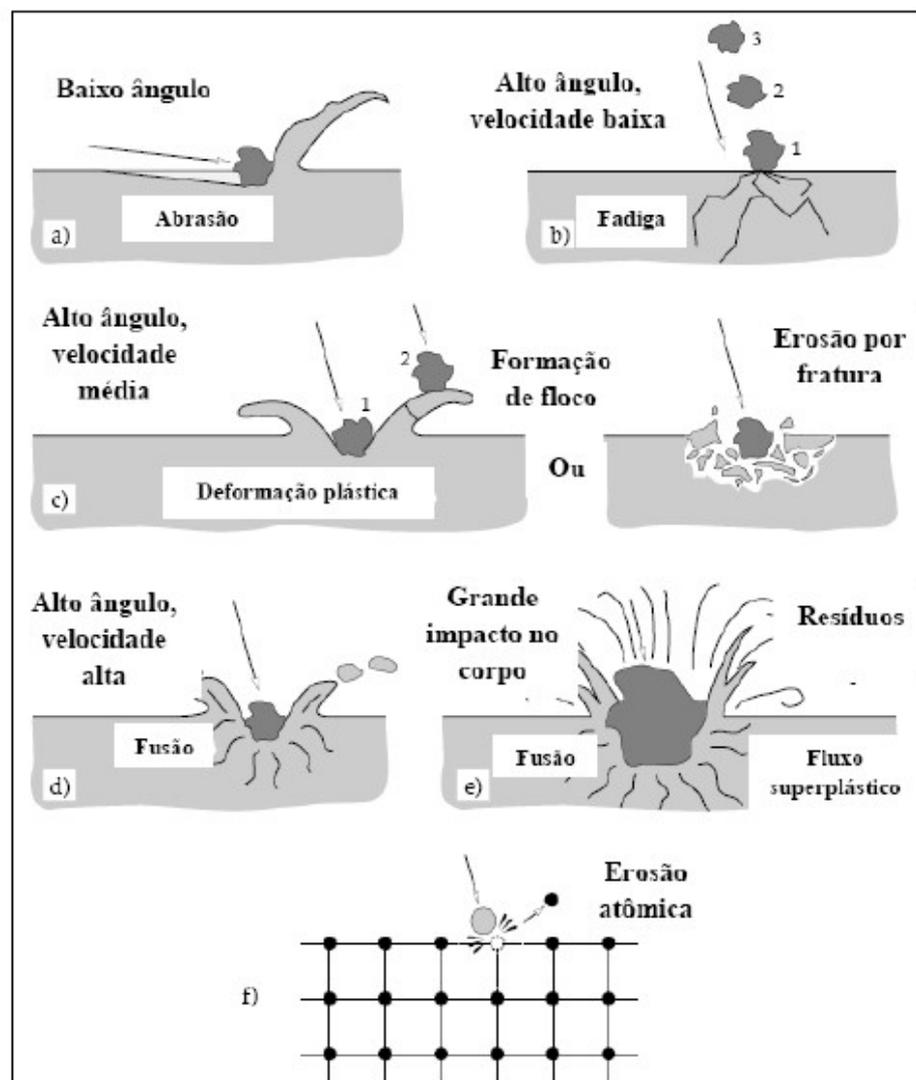


Figura 31 - Possíveis mecanismos de desgaste erosivo: a) abrasão a baixo ângulo de impacto; b) fadiga da superfície a velocidade baixa e alto ângulo de impacto; c) fratura frágil ou múltiplas deformações plásticas durante impacto a médias velocidades e alto ângulo; d) fusão da superfície causada por altas velocidades de impacto; e) erosão macroscópica com efeitos secundários; f) degradação da rede cristalina por impacto de átomos
Fonte: Silva (2017)

2.2.4.2.7. Desgaste por delaminação

De acordo com Johnson (apud SILVA; SILVA; MEDEIROS, 2007) discutindo contatos mecânicos, mencionou que isto aparenta que as partículas do desgaste metálico comumente assumem a forma de plaquetas finas originado das trincas pertos da superfície paralela ou em um ponto agudo da superfície. Essa observação levou Suh a introduzir o termo desgaste por delaminação.

Para Suh (apud SILVA; SILVA; MEDEIROS, 2007) considerando que duas premissas poderiam ser feitas para o modelo de processo de desgaste por delaminação, conforme Figura 32. Na primeira premissa, Suh assumiu que, em alguma fração do contato da aspereza, uma forte junção de escorregamento pode ser formada do qual pode causar o cisalhamento do material até a forma de uma folha desgastada. Na segunda premissa, foi assumido que a criação da folha desgastada pode ser um processo cumulativo, do qual resulta do material sendo cisalhado em pequenas quantidades a cada passagem pela aspereza. O criação da folha de desgaste ocorrerá somente depois de um grande número de asperezas da contraface que passou por cada ponto na superfície.

Dasari, Yu e Mai (2009) afirmam que a espessura da folha desgastada é controlada pela localização do crescimento da trinca na subsuperfície, do qual é controlado pelos carregamentos normal e tangencial na superfície. Adicionalmente, comparado com a teoria do adesivo, a teoria da delaminação prediz que essa microestrutura afeta o comportamento do desgaste e demonstra que a dureza não é o único fator controlável.

Embora o desgaste por delaminação é na maioria das vezes observado em metais e cerâmicas, também é reportado por muitos investigadores em polímeros e compostos poliméricos. Em particular esse modo de danos de desgaste é notado em componentes de joelho artificial juntas do quadril de Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM) devido ao carregamento ciclico e também reproduzido em laboratórios de simulação de testes por desgaste. A deformação plástica intensa da superfície do polietileno através do carregamento cíclico é fundado para ser a origem da nucleação da trinca e propagação. Além disso desgaste por delaminação do PEUAPM é também visto em resina epóxi e PTFE.

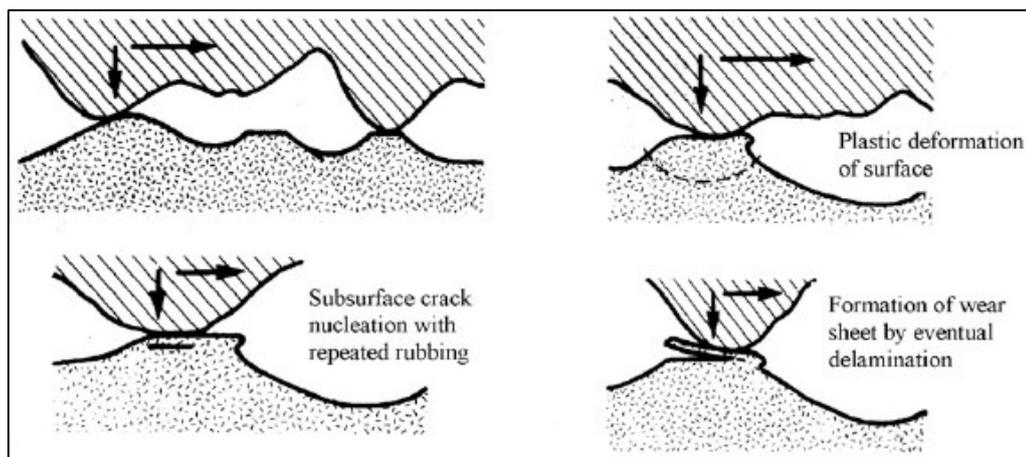


Figura 32 - Representação esquemática de vários estágios envolvidos na formação das folhas de desgastes por delaminação
 Fonte: Dasari, Yu e Mai (2009)

2.2.4.3. Coeficiente de Desgaste

De acordo com Kelly (2000 apud Klaas, 2013), em função de estudos arqueológicos, a humanidade reconhece a importância do desgaste dos metais por séculos. Ainda segundo o autor, as especificidades como a resistência ao desgaste de materiais duros em algumas situações apresentavam exceções e mostravam que partes do quebra-cabeça estavam faltando. Isso porque o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste são características do tribossistema e não propriedades intrínsecas dos materiais (ZEREN, 2007 apud KLAAS, 2013). Estudos afirmam que muitos tribossistemas já foram sugeridos, mais de 1000. Pela quantidade de pesquisadores que fizeram contribuições nessa área, é difícil citá-los (KELLY, 2000 apud KLAAS, 2013). A Figura 33 ilustra a classificação dos tipos de desgaste (por deslizamento, abrasivo, erosivo) e posiciona-os quanto ao coeficiente de desgaste, onde são apresentados três mecanismos de desgaste que podem atuar separadamente ou em conjunto (GAHR, 1987).

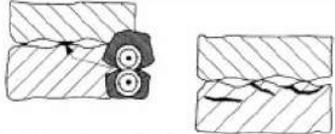
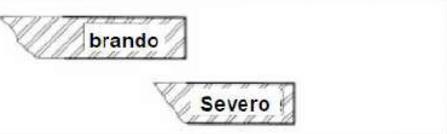
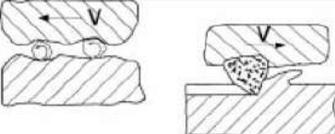
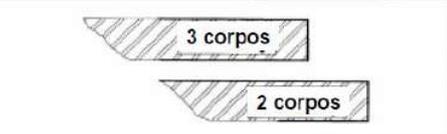
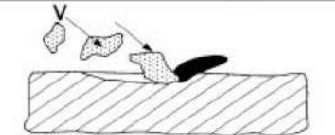
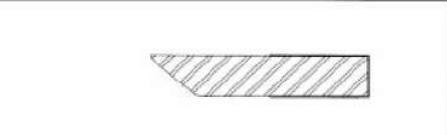
Modo de desgaste	Mecanismo de desgaste	Coeficiente de desgaste k						
		10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
DESLIZAMENTO								
ABRASIVO								
EROSIVO								

Figura 33 - Valores do coeficiente de desgaste (k) para sistemas tribológicos sem lubrificação

Fonte: Compilado de Klaas (2013)

O coeficiente de desgaste é, geralmente, determinada para as condições de atrito em regime estável, obtido após sucessivas passagens pela pista de deslizamento. Os parâmetros daí resultantes são frequentemente utilizados para descrever o comportamento do sistema tribológico. Equações habitualmente utilizadas e são encontradas na literatura (ZAMBELLI; VINCENT, 1998 apud MAIO, 2012).

O Coeficiente de desgaste é dado pela equação:

Equação 2:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot A \cdot L} = \frac{\Delta h}{L}$$

Onde:

W = coeficiente de desgaste (adimensional);

Δm = perda de massa;

ρ = a densidade do material;

A = área aparente de contato;

Δh = perda de espessura da peça ensaiada;

L = distância de deslizamento.

O Coeficiente de desgaste específico é obtido pela equação:

Equação 3:

$$W_s = \frac{\Delta V}{F_N \cdot L} \left[\frac{mm^3}{N \cdot m} \right]$$

Onde:

W_s = Coeficiente de desgaste específico;

Δv = Volume do desgaste;

L = distância de deslizamento;

F_n = Carga normal aplicada.

As taxas específicas de desgaste dos discos de PTFE, PA66 and PPS sobre atrito seco e lubrificada por óleo são mostradas na Figura 34. Foi encontrado que o desgaste dos discos de polímero em ordem decrescente de PTFE>PA66>PPS ambos sobre atrito seco e condição lubrificada a óleo. Foi observado que o desgaste de PTFE e PPS são menores sobre óleo lubrificante do que deles no atrito seco, enquanto o desgaste do PA66 é acrescido por adição de óleo na superfície de desgaste (JIA et al., 2007).

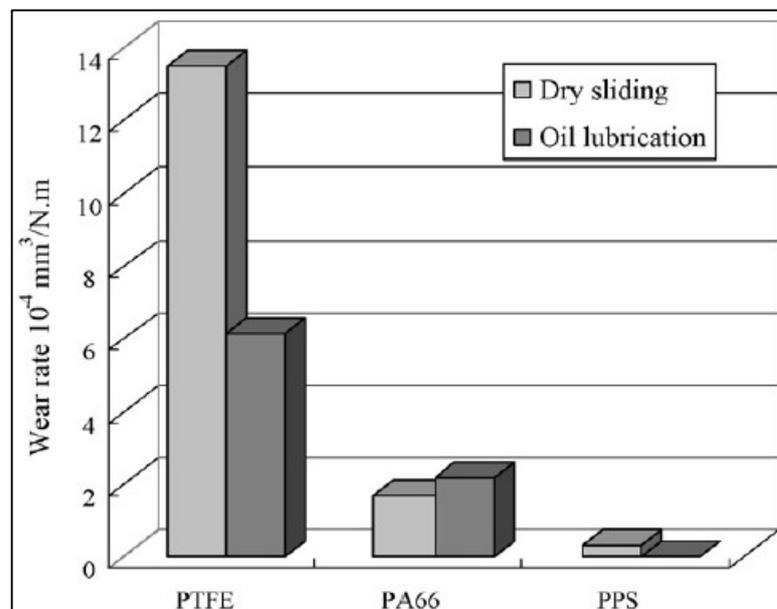


Figura 34 - Taxas de desgaste de discos de polímero por deslizamento a seco e condições de parafina lubrificada (carga aplicada: 2.0N, velocidade de deslizamento: 0.2m/s)
Fonte: Compilado de Jia et al. (2007)

O microscópio MEV das superfícies desgastadas dos discos de PTFE, PA66 and PPS sobre condições de atrito seco e lubificado por óleo são dadas na Figura 35. Foi observado que a superfície desgastada do PTFE sobre condições de atrito

seco é caracterizado por óbvios arranhandos paralelos em relação a direção de deslizamento (Fig. A); as superfícies desgastadas do PA66 e PPS são suaves, e as marcas da deformação plástica são observadas; e não foram encontrados detritos nesses casos (Fig. C e E) (JIA et al., 2007).

Como para condições lubrificadas por óleo, tem bastante detritos nas superfícies desgastadas, a superfície do PA66 é notado que tem obviamente e profundas marcas de atrito (Figura 35d). Os resultados experimentais discutidos anteriormente encontrou que a taxa de desgaste do PA66 sobre condições lubrificada a óleo foram maiores do que sobre atrito seco. Combinado com a morfologia da superfície desgastada do PA66, pode ser deduzido que o óleo pode propagar dentro das microtrincas e microporos nas superfícies do PA66, do qual induz a redução das propriedades mecânicas sobre condição lubrificada a óleo, então maior desgaste é observado no caso do PA66 sobre óleo lubrificado (JIA et al., 2007).

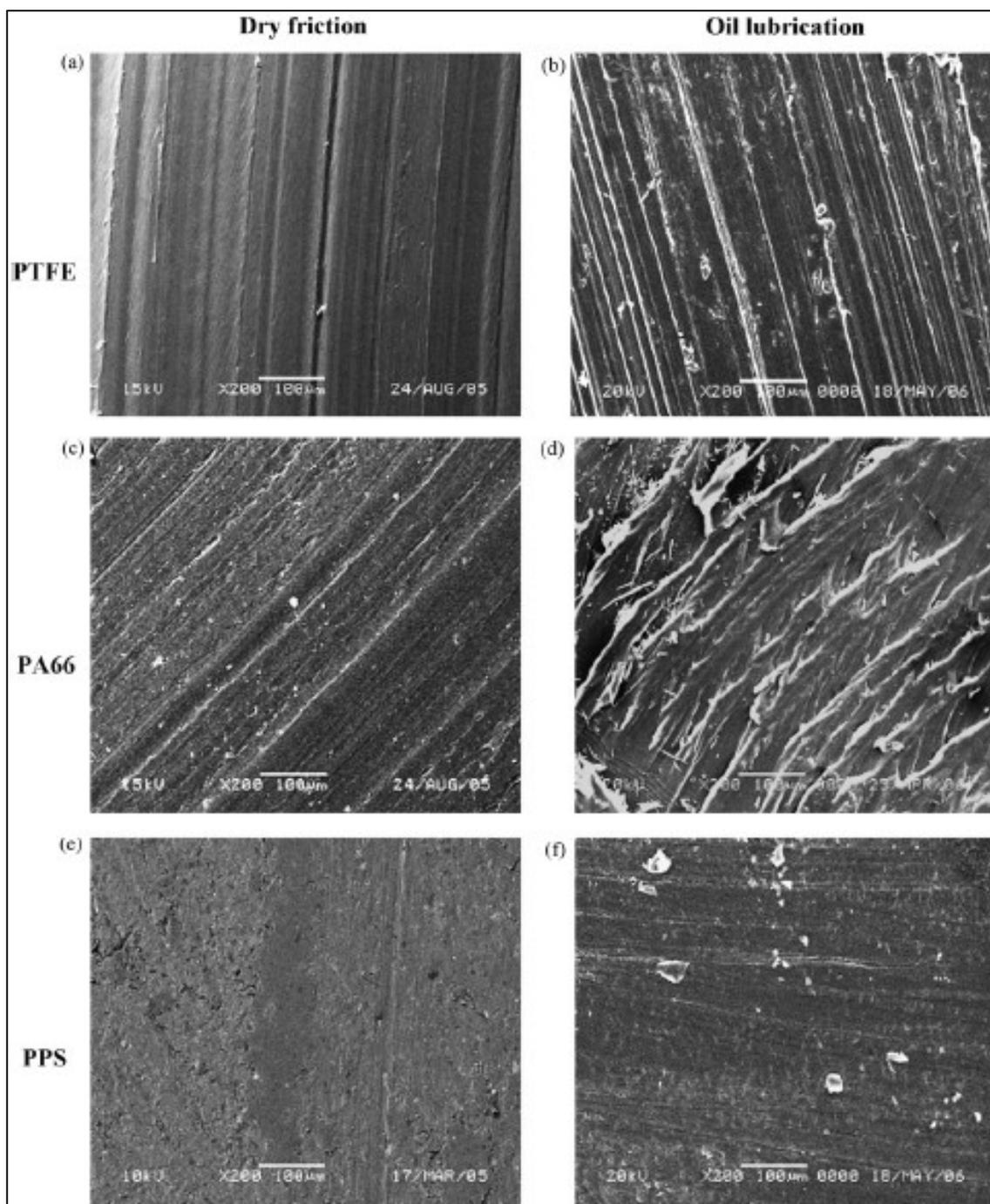


Figura 35 - Microscópio MEV de superfícies desgastadas sobre deslizamento a seco e condição de lubrificação por parafina líquida (carga aplicada: 2.0N, velocidade de deslizamento: 0.2m/s)
 Fonte: (Jia *et al.*, 2007)

2.2.5 Parâmetros tribológicos influentes no sistema bucha-metal

Segundo Wang *et al.* (2008 apud Laranjeira, 2011), o comportamento tribológico de um dado par de materiais é influenciado por vários fatores, Figura 36. O coeficiente de atrito das poliamidas é bastante influenciado por factores como a carga, a velocidade de deslizamento, a temperatura. As propriedades do material, a umidade e a presença de lubrificação (HABIB, 2007 apud LARANJEIRA, 2011).



Figura 36 - Representação esquemática dos parâmetros que influenciam o comportamento das poliamidas e os parâmetros que podem resultar do respectivo sistema tribológico
 Fonte: Laranjeira (2011)

2.2.5.1. Rugosidade e Dureza

Quaglioni et al. (2009 apud Silva, 2010) mencionam que investigaram a influência da rugosidade do contracorpo sobre o atrito a seco de plásticos de engenharia utilizados na tecnologia de mancais. Foi afirmado que há uma relação entre rugosidade do contracorpo, propriedades elásticas dos polímeros e atrito. Segundo estes autores, plásticos “moles”, caracterizados por baixo módulo de elasticidade exibem melhor comportamento ao deslizamento quando em contato com superfícies mais lisas. Já os plásticos de módulo de elasticidade mais alto apresentam menor atrito quando deslizando sobre contracorpos mais rugosos.

Para Stachowiak (2005 apud Laranjeira, 2011), no estudo de materiais poliméricos é recomendado que o material antagonista seja bastante mais duro. De acordo Rymuza (2007 apud Laranjeira, 2011), coeficiente de atrito é fortemente influenciado pela rugosidade do material antagonista. Para rugosidades baixas o coeficiente de atrito é mais elevado do que para rugosidade mais altas, devido á adesão do polímero, contudo esta tendência inverte-se a partir de um certo valor de rugosidade. Relativamente ao valor da rugosidade, deve ser a menor possível, para reduzir o efeito de abrasão no polímero (UNAL, 2005 apud LARANJEIRA, 2011).

Franklin e Kraker (2003) estudaram a influência da topografia superficial do contracorpo de aço ferramenta sobre o desgaste do compósito POM (polioximetileno) com 20% de PTFE, além da rugosidade eles analisaram a influência da orientação dos riscos oriundos do lixamento durante o acabamento superficial do contracorpo, conforme Figura 37. Foi constatado, que a taxa de desgaste do compósito é influenciada pela topografia superficial do contracorpo. Ainda de acordo com o autora enfatizaram a importância da orientação, riscos, perpendiculares à direção do

deslizamento exercem maior influência sobre o desgaste do compósito polimérico que riscos paralelos. Já que com riscos paralelos a abrasividade é baixa em relação aos riscos perpendiculares.

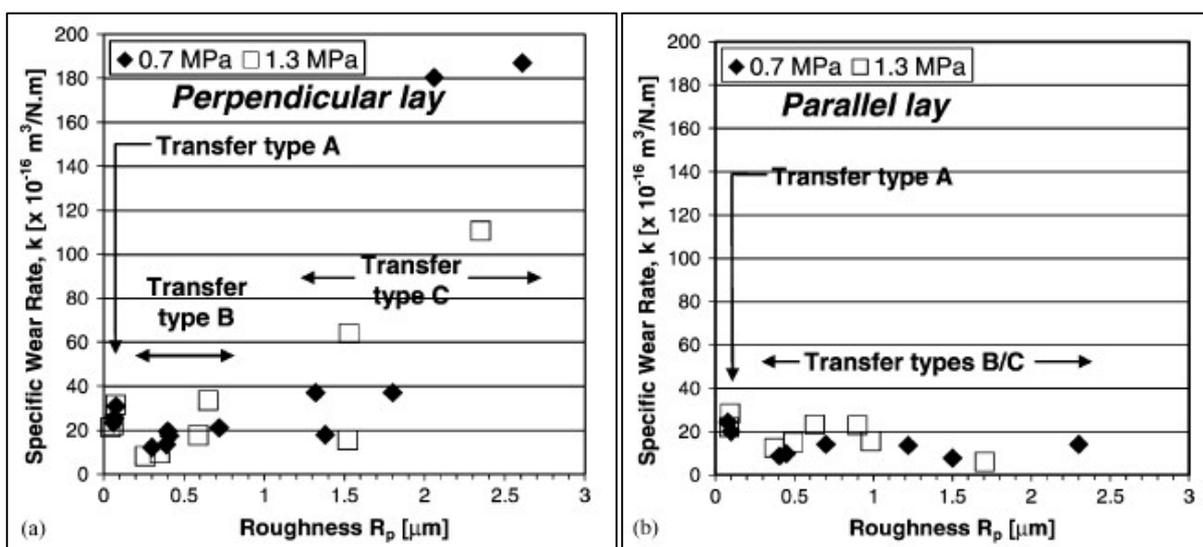


Figura 37 - Taxa de desgaste específica em função da rugosidade R_p aplicado em superfícies de pressão de 0.7 e 1.3 MPa, para (a) superfícies retificadas perpendicularmente ao deslizamento; (b) superfícies retificadas paralelamente ao deslizamento
Fonte: Franklin e Kraker (2003)

Franklin e Kraker (2003) afirmam que em 2001 já havia sido investigado a influência da rugosidade superficial do contracorpo e da orientação dos riscos sobre o desgaste de diferentes polímeros. Constatou-se que o aumento da rugosidade R_a acarreta em aumento na taxa de desgaste de muitos polímeros de engenharia, porém a magnitude do efeito é diferente de polímero para polímero. Mencionam também que para baixa rugosidade ($R_a = 0,05\mu\text{m}$) a orientação dos riscos paralela ao deslizamento resulta em maiores taxas de desgaste e quando a rugosidade é alta ($R_a = 0,8\mu\text{m}$) os riscos perpendiculares ao deslizamento originam taxas maiores de desgaste, conforme Figura 38. Eles explicam que este fenômeno está associado com a contribuição abrasiva e adesiva (ou coesiva e interfacial como mencionado por Hutchings (1992 apud VALE, 2014).

Hutchings (1992 apud Vale, 2014) menciona que normalmente a aplicação tribológica se dá em contatos do tipo metal-polímero. Como o módulo de elasticidade dos polímeros é tipicamente dez vezes menor do que os metais e as cerâmicas, pode-se modelar o contato razoável de aproximação, de um polímero contra um corpo rígido.

Tratamentos térmicos para metais podem ser necessários, contudo valores acima de 700 Vickers de dureza já são suficientes para considerar o contra-corpo como rígido (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2001 apud VALE, 2014). Com isso praticamente, toda a deformação devido ao contato que acontece no polímero, e o acabamento superficial contra-corpo tem uma grande influência dos mecanismos do desgaste resultante do movimento (HUTCHING, 1992 apud VALE, 2014).

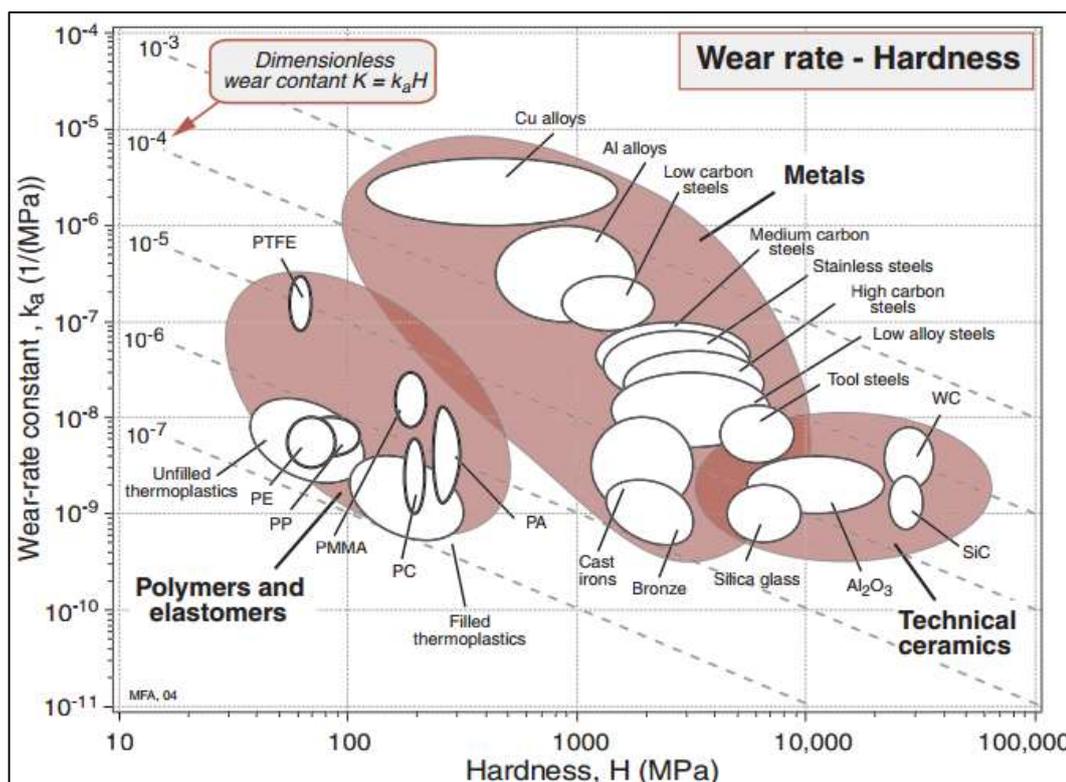


Figura 38 – A taxa de desgaste normalizada, K_a , comparado contra Dureza, expressado em MPa ao invés de Vickers (H in MPa = $10 H_v$). O gráfico mostra uma visão do caminho de quais materiais comuns de engenharia se comportam.

Fonte: Ashby (2005).

2.2.5.2. Velocidade de deslizamento

Segundo Yamaguchi (1990 apud Vale, 2014), o comportamento do coeficiente de atrito em relação á velocidade é difícil de ser modelado. Com o deslizamento, principalmente para altas velocidades, ocorre aumento da temperatura, causando vários efeitos nos materiais, principalmente quando os valores estão próximos a temperatura de transição vítrea³. O comportamento do coeficiente de atrito cinético em função da velocidade de deslizamento é fortemente dependente de condições de

³ Temperatura de transição vítrea: é a temperatura em que, após resfriamento, uma cerâmica não cristalina ou polímero transforma-se de um líquido super-resfriado para um vidro rígido (CALLISTER; RETHSWISCH, 2008).

superfície que incluem: a presença de impurezas ou filmes transferidos e condições de lubrificação (LIU; SCHAEFER, 2006 apud VALE, 2014).

Para Quaglini (2009 apud Vale, 2014), a maioria dos polímeros exibem comportamento visco-elástico. Destem modo, a força tangencial, ou a força de atrito, entre o corpo e o contra-corpo torna-se função da velocidade de deslizamento.

2.2.5.3. Carga

Vale (2014) afirma que a pressão de contato exerce papel fundamental para o desgaste de determinado material, e normalmente, age como limitantes para uma aplicação tribológica sendo um fator que afeta a seleção do material. Ainda para o autor, os materiais poliméricos; comparados com ligas metálicas, compósitos e cerâmicas; apresentam faixa reduzida de aplicação, conforme pode ser verificado na Figura 39, na qual se apresenta a relação entre o coeficiente de desgaste dimensional e a pressão de contato para os materiais descritos. Percebe-se que os materiais poliméricos devem ser submetidos a uma pressão normal muito menor que os demais materiais para terem o mesmo coeficiente de desgaste dimensional.

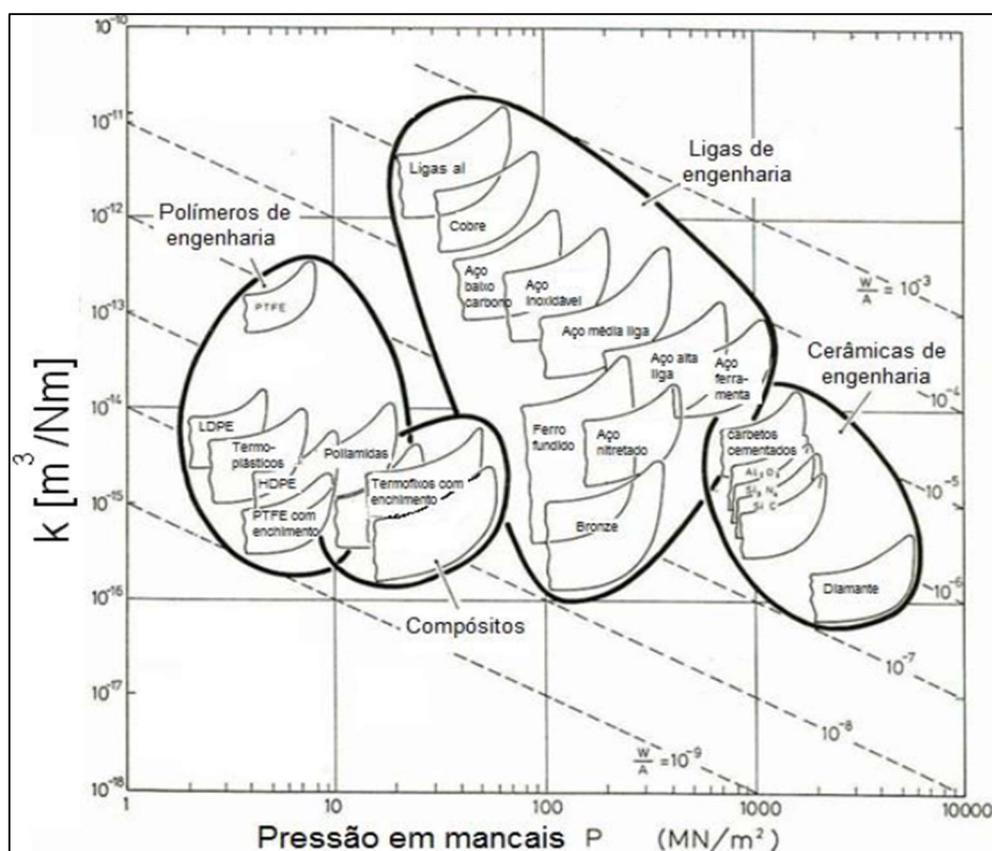


Figura 39 - Mapeamento qualitativo de desgaste em função da pressão de contato para diversos materiais

Fonte: Vale (2014)

Em relação à carga aplicada, perante condições diferentes de ensaio a seco, Rajesh et al. (2002); Unal et al. (2004; 2006); Yu et al. (2008); Una e Mimaroglu (2003) (apud LARANJEIRA, 2011) concluíram que o coeficiente de atrito nas poliamidas diminui perante um aumento de carga e que a resistência ao desgaste aumentou perante as mesmas condições.

Já para Meng et al. (2009 apud Laranjeira, 2011) concluíram que o coeficiente de atrito e o coeficiente de desgaste da poliamida aumentava perante um aumento de carga aplicada. O aumento de carga provoca um aumento do calor no contato, o que acarreta dois efeitos contraditórios no comportamento atrito, por um lado a tensão de corte diminui, o que provoca uma diminuição do coeficiente de atrito, por outro lado o módulo de rigidez diminui com a temperatura, o que provoca um aumento da área real de contato e conseqüentemente aumenta o coeficiente de atrito.

A definição de Xing et al. (2009 apud Laranjeira, 2011), que testaram a poliamida reforçada com diferentes cargas e concluíram que o coeficiente de atrito aumenta perante um aumento de carga e que a resistência ao desgaste diminuiu perante as mesmas condições. O aumento de carga provoca, um aumento de calor gerado por atrito, o que compromete a viscoelasticidade do material e conseqüentemente resistência das ligações moleculares diminui. Este fenômeno permite que material da matriz seja transferido para a contraface, o que provoca que a fibra tenha um efeito de abrasão e conseqüentemente o coeficiente de atrito aumente.

2.2.5.4. Relação PV para buchas

Os polímeros fluem prontamente em pressões e temperaturas modestas. Assim sendo polímeros e compostos poliméricos são usados relativamente a cargas baixas, velocidade e temperatura, mais baixo que no caso dos metais e cerâmicos. Polímeros geralmente tem baixa condutividade térmica, conseqüentemente resultando em temperaturas altas de interface. As temperaturas de interface geradas durante deslizamento é a função da pressão normal x velocidade de deslizamento (PV), portanto polímeros e lubrificantes sólidos são classificados baseado no limite PV. Além do limite PV, polímeros começam a derreter na interface mesmo na temperatura ambiente e a taxa de desgaste cresce rapidamente (BHUSHAN, 2013).

Segundo Bhushan (2013), os polímeros tem uma alta tolerância para partículas abrasivas (capacidade de incorporação), resiliência em distribuição da carga sobre condições de desalinhamento (portanto prevenção de travamento), baixo custo e fácil

disponibilidade. Polímeros são geralmente insensíveis a ambientes corrosivos ao contrário dos metais, mas reagem com muitos fluídos; eles incham degradando as propriedades mecânicas. Ainda de acordo com o autor, o limite PV dos polímeros em condições lubrificadas (óleos ou água) pode ser acima de uma magnitude maior do que em condições secas. Um líquido médio remove calor do atrito da interface, portanto permitindo operação em condição de PV alto. Para o autor, polímeros de alta temperatura podem ser trabalhar em condições lubrificada com um PV de 17,5MPa x m/s (500,000 psi x ppm), comparável ao limite PV dos grafites carbono (carbono manufacturado), comumente usado em aplicações de desgaste, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Limites PV, coeficientes de desgaste e coeficientes de atrito de vários plásticos virgens ou preenchidos com material adicional deslizando no metal, sobre condições seca. (Valores aproximados retirado de várias publicações)

Material	Limites PV na (V) e 22° C. MPa.m/s (em m/s)	Operação de temperatura máxima (°C)	Coeficiente de desgaste, k (x 10 ⁻⁷ mm ³ /Nm)	Coeficiente de Atrito
PTFE Virgem	0.06 (0.5)	110 – 150	4000	0.05 – 0.1
PTFE (preenchido com fibra de vidro)	0.35 (0.05-5.0)	200	1.19	0.1-0.25
PTFE (preenchido com fibra de grafite)	1.05 (5.0)	200	-	0.1
Acetal	0.14 (0.5)	85-105	9.5	0.2-0.3
Acetal (preenchido com PTFE)	0.19 (0.5)	-	3.8	0.15-0.27
PEUAPM	0.10 (0.5)	105	-	0.15-0.3
PEUAPM (preenchido com fibra de vidro)	0.19 (0.5)	-	3.8	0.15-0.27
Poliamida	0.14 (0.5)	110	38.0	0.2-0.4
Poliamida (preenchida com grafite)	0.14 (0.5)	150	3.0	0.1-0.25
Policarbonato	0.03 (0.05) 0.01 (0.5)	135	480	0.35
Policarbonato (preenchido com PTFE)	0.06 (0.5)	135	-	0.15
Policarbonato (PTFE, Fibra de Vidro)	1.05 (0.5)	135	5.8	0.2
Poli (sulfeto de p-fenileno)	3.50 (0.5)	260-315	-	0.15-0.3
Poli (sulfeto de p-fenileno) (PTFE, Fibra de Carbono)	3.50 (0.5)	260-315	-	0.1-0.3
Poli(amida-imida)	3.50 (0.5)	260	-	0.15-0.3
Poli(amida-imida) (PTFE, grafite)	1.75 (0.5)	260	-	0.08-0.3

Poliéster aromático linear (preenchido com grafite)	1.75 (0.5)	260-315	-	0.2-0.4
Fenólico	0.17 (0.05)	260	-	0.9-1.1
Fenólico (preenchido com PTFE)	1.38 (0.5)	-	-	0.1-0.45
Poliimida	3.50 (0.5)	315	30	0.15-0.3
Poliimida (preenchido com grafite)	3.50 (0.5)	315	5	0.1-0.3
Epóxi (preenchido com vidro)	1.75 (0.5)	260	-	0.3-0.5

Fonte: Traduzido de Bhushan (2013)

De acordo com Vale (2014), um modo de quantificar a severidade da condição imposta a uma aplicação tribológica é através de análise das magnitudes da pressão de contato e da velocidade de deslizamento. É intuitivo concluir que quanto maior o valor destas variáveis, mais severo será a condição tribológica. Ainda de acordo com o autor de modo a facilitar esta análise, e permitir comparações entre sistemas de modo mais eficaz e franco, pode-se estabelecer a condição PV, que é, então, o produto entre a velocidade de deslizamento e a pressão de contato, cuja a unidade é MPa.m/s.

Segundo Ishida e Beê (2015), para análise da condição PV é necessário a classificação do termo PV limite e temperatura limite. Esses termos representam valores máximos ao qual determinado material suporta em uma aplicação tribológica, ou seja, se a aplicação apresentar uma condição PV muito elevada o desgaste imposto ao material será muito mais severo devido ao aumento de temperatura no contato levando o material a fusão ou queima.

Para Yamaguchi (1990 apud WANDEMBRUCK; BARIONI, 2015), o ensaio deve ser feito para cada condição PV com um tempo razoável, implicando assim em um aumento da temperatura até uma estabilização, sendo que a temperatura seja função da condição PV aplicada ao sistema tribológico, conforme Figura 40.

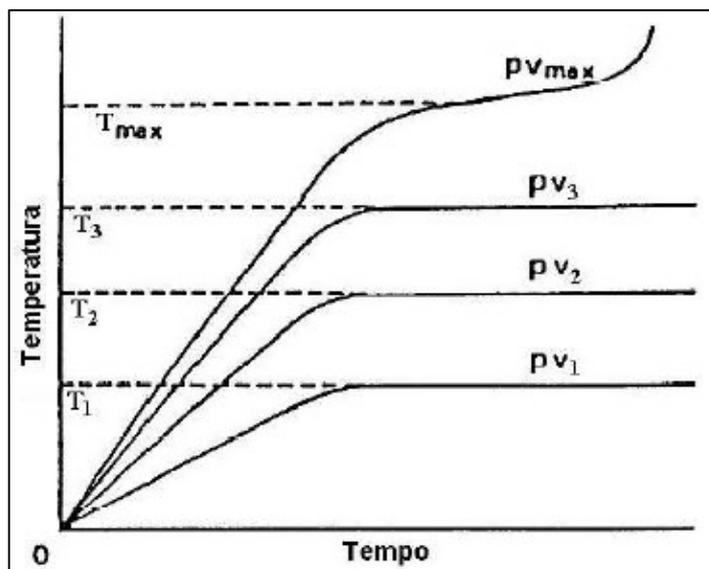


Figura 40 - Curvas de temperatura no contato em função do tempo para várias condições PV
Fonte: Vale (2014)

O comportamento da curva PV da poliamida deslizando contra si mesmo e contra aço é mostrado na Figura 41. Chama-se a atenção, que a condição PV limite para ambas as condições são distintos. A explicação reside na diferença entre dissipação térmica entre os dois sistemas tribológicos. Para o contato polímero-metal, o sistema apresenta um ganho significativo na dissipação da energia gerada no contato, o que mantém a temperatura no contato a níveis mais baixos em relação ao contato polímero-polímero, para a mesma condição imposta.

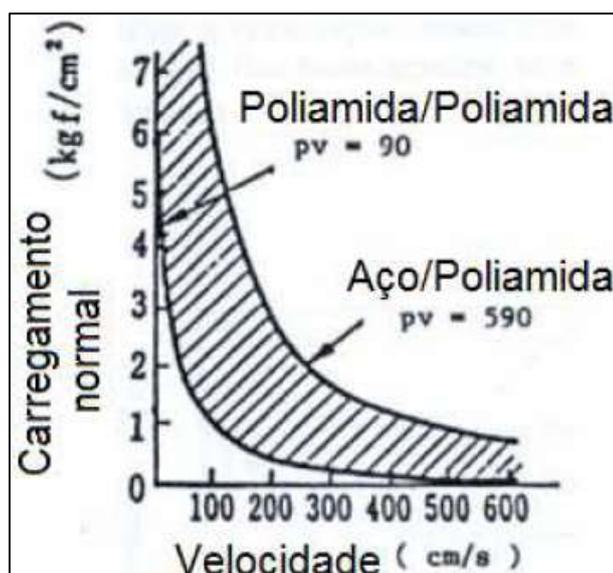


Figura 41 - Condição PV limite para a poliamida em função do carregamento normal e da velocidade de deslizamento para contato do tipo poliamida-poliamida e aço poliamida
Fonte: Vale (2014)

Segundo Bhushan (2002 apud WANDEMBRUCK; BARIONI, 2015), a condição PV está relacionada com os valores de velocidade e pressão. Equação (4) que está relacionada com a taxa de desgaste mássico e na Equação (5), tem relação com a energia dissipada em forma de calor devido ao atrito do contato.

Equação 4:

$$\dot{m} = \alpha APV_{média}$$

Equação 5:

$$\dot{Q} = \mu APV_{média}$$

Onde:

P = Pressão de contato (relacionada com a força normal);

V = Velocidade de deslocamento [m/s];

α = Fator de desgaste [g/Nm];

\dot{m} = Taxa de desgaste mássico [g/h];

\dot{Q} = Energia dissipada em forma de calor [J/s];

μ = Coeficiente de atrito do par tribológico [-];

A = Área [m²].

Budynas e Nisbett (2015) definem o cálculo do PV de uma bucha da seguinte maneira. Considere um pino de diâmetro D , rotacionando a uma velocidade N , em uma bucha de comprimento L , e suportando uma carga radial estacionário F . A Figura 42 apresenta a pressão nominal P é dada por:

Equação 6:

$$P = \frac{F}{DL}$$

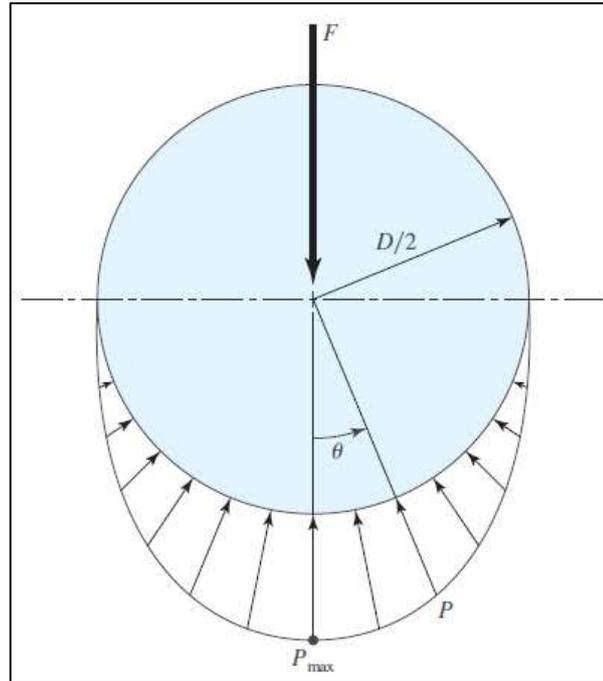


Figura 42 - Distribuição da pressão em uma bucha de contato lubrificada
 Fonte: Budynas e Nisbett (2015)

Se N está em rev/min e D está em polegadas, velocidade em pés/minuto é dado por (BUDYNAS e NISBETT, 2015):

Equação 7:

$$V = \frac{\pi DN}{12}$$

Portanto PV , em psi . pés/minuto, é:

Equação 8:

$$PV = \frac{F}{DL} \frac{\pi DN}{12} = \frac{\pi}{12} \frac{FN}{L}$$

Nota-se a independência do PV em relação ao diâmetro do pino D .

De acordo com Budynas e Nisbett (2015), é importante notar que na Equação 6, providencia o valor nominal de P . Figura 42 mostra uma representação mais acurada da distribuição da pressão, do qual pode ser escrito como:

Equação 9:

$$p = P_{max} \cos \theta \quad -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

O componente vertical de de $p dA$ é $p dA \cos \Theta = [pL(D/2) d\Theta] \cos \Theta = P_{max} (DL/2) \cos^2 \Theta d\Theta$. Integrando isto do $\Theta = -\pi/2$ para $\pi/2$ rendimentos F . Portanto (BUDYNAS e NISBETT, 2015),

Equação 10:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} P_{max} \left(\frac{DL}{2} \right) \cos^2 \Theta d\Theta = \frac{\pi}{4} P_{max} DL = F$$

Ou

Equação 11:

$$P_{max} = \frac{4}{\pi} \frac{F}{DL}$$

Substituindo V da equação 7 e P_{max} para P da equação 11 dentro da equação $\omega = f_1 f_2 K P V t$.

Equação 12:

$$\omega = f_1 f_2 K \frac{4}{\pi} \frac{F}{DL} \frac{\pi D N t}{12} = \frac{f_1 f_2 K F N t}{3L}$$

Onde:

f_1 = Fator dependente do tipo de movimento, carga, velocidade (anexo 1);

f_2 = Fator ambiente contribuído através da temperatura e condições de limpeza (anexo 2);

K = Fator de desgaste [$\text{in}^3 \cdot \text{min}/(\text{lbf} \cdot \text{ft} \cdot \text{h})$] (anexo 3).

Na concepção de uma bucha, por causa de várias trocas é recomendado que a relação comprimento/diâmetro tem que trabalhar na faixa de (BUDYNAS e NISBETT, 2015).

Equação 13:

$$0,5 \leq \frac{L}{D} \leq 2$$

2.2.5.5. Temperatura

A temperatura de fusão dos polímeros é baixa, quando comparada a metais e cerâmicas. Esta característica combinada à baixa condutividade térmica dos polímeros assegura que as temperaturas de contato geradas pelo atrito podem

alcançar o ponto de fusão de um polímero. Quando os polímeros fundem seus coeficientes de atrito e taxas de desgaste são alteradas (Silva, 2010).

Para Maio (2012), a influência da temperatura no comportamento tribológico dos polímeros ocorre essencialmente com a interação de dois aspectos; um é a resistência ao calor do material e o outro é o calor de atrito desenvolvido entre os pontos de contato. Ainda segundo o autor, como os polímeros são materiais semi-cristalinos ou cristalinos apresentam excelentes estruturas caracterizadas pela simetria, regularidade e flexibilidade das cadeias moleculares pelo que são produzidas menores quantidades de calor provocadas pelo atrito entre os pontos de contato. Portanto a resistência ao desgaste relaciona-se não só com a estrutura molecular dos polímeros como também com o ponto de fusão e a temperatura de transição vítrea (TAN et al, 2011 apud MAIO, 2012).

Segundo Stachowiak e Batchelor (2005 apud Maio, 2012), quando é atingida a temperatura de transição vítrea de um polímero, o seu comportamento ao atrito e ao desgaste sofre um grande alteração sendo que, com o aumento da temperatura, o coeficiente de atrito tende a diminuir e a taxa de desgaste tende a aumentar. Quaglini et al. (2009 apud MAIO, 2012), observou em seus testes que quando a temperatura de transição vítrea do polímero é atingida na interface, o atrito diminui.

A força de atrito é afetada de maneira significativa com a variação de temperatura no contato. A explicação está no fato de que a força de atrito está diretamente relacionada com a área real de contato e com a tensão de cisalhamento, as quais são dependentes da temperatura. Com o aumento desta, a área de contato real cresce devido à diminuição do módulo de elasticidade do material, e a tensão de cisalhamento diminui (VALE, 2014).

O comportamento é ilustrado na Figura 43, contudo o comportamento do módulo de elasticidade e da tensão de cisalhamento é complexo e apresenta descontinuidades para temperaturas da região de transição vítrea e próximo da temperatura de fusão do material (YAMAGUCHI, 1990 apud VALE, 2014).

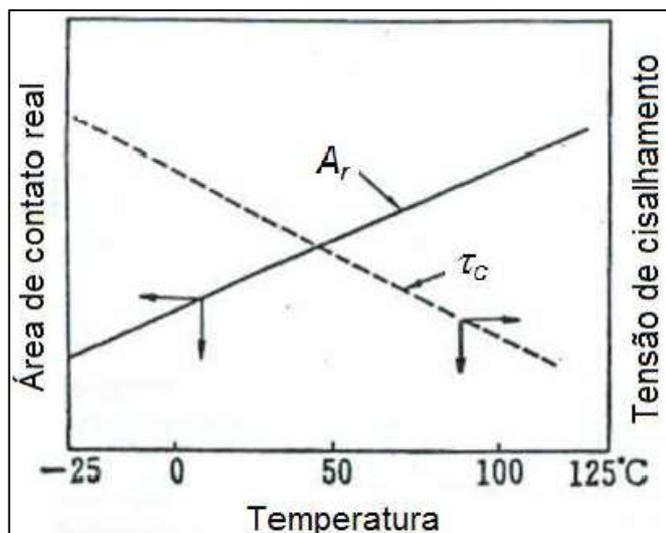


Figura 43 - Relação entre área real de contato, tensão de cisalhamento e temperatura
 Fonte: Vale (2014)

Para Ishida e Beê (2015), o estudo da relação entre o coeficiente de atrito dos materiais poliméricos com a temperatura é complexo e é uma combinação dos efeitos citados, uma relação entre o coeficiente de atrito e temperatura para vários materiais poliméricos em deslizamento contra aço é descrito na Figura 44.

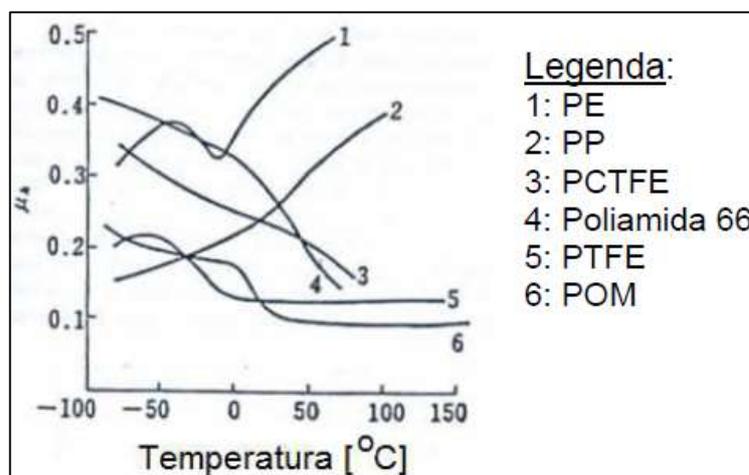


Figura 44 - Relação entre coeficiente de atrito e temperatura para vários polímeros, em ensaios de deslizamento contra esferas de aço a baixas velocidades.
 Fonte: Ishida e Beê (2015)

Zsidai et al. (2004 apud Silva, 2010) fazem uma correlação entre temperatura de contato e coeficiente de atrito para deslizamento a seco de diferentes plásticos de engenharia contra aço e superfície revestida com DLN (*Diamond like Nanocomposite*). Eles mencionaram que os mecanismos de atrito são processos de energia dissipativa de resultantes comportamento viscoelástico dos polímeros. Comentaram ainda, que a transição viscoelástica dos polímeros para o estado borrachoso devido ao aumento

de temperatura ter atingido a temperatura de transição vítrea levou as maiores forças de atrito.

2.2.5.6. Lubrificação

De acordo com Chauhan et al. (2010, apud Maio 2012), um lubrificante é um material utilizado para reduzir o atrito e o desgaste entre dois corpos em contacto deslizante. É conhecido que, o comportamento tribológico dos polímeros diverge bastante entre condições de deslizamento a seco e deslizamento em ambientes aquosos ou com outro tipo de fluídos. A lubrificação externa é um método muito útil para reduzir a adesão entre duas superfícies em contato deslizante diminuindo assim o coeficiente de atrito comparativamente a condições de deslizamento a seco (JIA et al., 2007). Ainda segundo os autores, a água é utilizada como lubrificante pois tem capacidade de refrigerar e limpar a superfície de contato entre polímero e aço.

De acordo com (COUTINHO et al., 2003 apud MAIO, 2012), as propriedades lubrificantes dos polietilenos são extremamente importantes pois evitam a necessidade de adição de algum tipo de lubrificante para reduzir o atrito entre dois corpos. Como os polietilenos são polímeros com taxa de absorção de água extremamente baixas a sua lubrificação externa não trará prejuízo a integridade do polímero. Liu et al. (2006 apud Maio, 2012) observam que o coeficiente de desgaste do polietileno de ultra alto peso molecular diminui nos testes realizados com lubrificante comparativamente com os testes realizados a seco para diferentes condições de ensaio.

Stachowiak (2005 apud Laranjeira, 2011), devido à polaridade da poliamida, os ácidos gordos, como o ácido caprílico, o palmítico e o esteracido, são bons lubrificantes, reduzindo seu coeficiente de atrito de 0.4 para 0.09. Para a autora, quando o lubrificante é água, a afinidade das moléculas do polímero e o aço são reduzidas, a água tem o poder de refrigerar e limpar a superfície de contato entre o polímero e o aço, por isso ao contrário do escorregamento a seco, não se consegue formar o filme e o escorregamento ocorre entre o polímero e o aço. Laranjeira (2011) afirma que, por outro lado, a água atua como lubrificante formando um filme hidrodinâmico na área de contato durante o escorregamento, o que faz com que o coeficiente de atrito seja inferior ao de um escorregamento a seco. Em meio aquoso, o fato de o polímero absorver água, provoca plastificação da superfície (SRINATH; GANNAMOORTHY, 2007 apud LARANJEIRA, 2011), consequentemente a

resistência e a dureza da poliamida ficam comprometidas (MENG et al., 2009 apud LARANJEIRA, 2011), o que penaliza o seu comportamento ao desgaste (YU et al., 2008 apud LARANJEIRA, 2011).

2.2.6 Atrito em Polímeros

Deus, é dito, criou sólidos, mas foi o demônio quem criou as superfícies – elas são a fonte de muitos problemas. Quando superfícies tocam e deslizam, há atrito e onde está o atrito, há desgaste. Tribologistas – o substantivo coletivo para aqueles que estudam atrito e desgaste – gostam de citar o enorme custo, através da perda de energia e desgaste do equipamento, para o qual esses dois fenômenos são responsáveis. É certamente correto que, se o atrito pudesse ser eliminado, a eficiência dos motores, caixas de engrenagem, trilhos de trem e similares aumentaria, e se desgaste pudesse ser erradicado, eles também durariam mais. Porém antes de aceitar essa imagem negativa, deve-se lembrar que, sem desgaste, lápis não escreveriam no papel ou giz nos quadros negros; e sem atrito, qualquer um deslizaria pelo menor declive (ASHBY, 2005)

Para Hutchings (1992 apud BOUTIN; ROCHA, 2015), pode-se definir como força de atrito a resistência encontrada por um corpo ao deslizar ou rolar sobre outro. Para que exista movimento, faz-se necessária a existência de uma força tangencial que retire o corpo superior do estado estacionário, conforme informado na Figura 45. Ainda para o autor a razão entre a força de atrito F e o carregamento normal W é conhecida como coeficiente de atrito, μ .

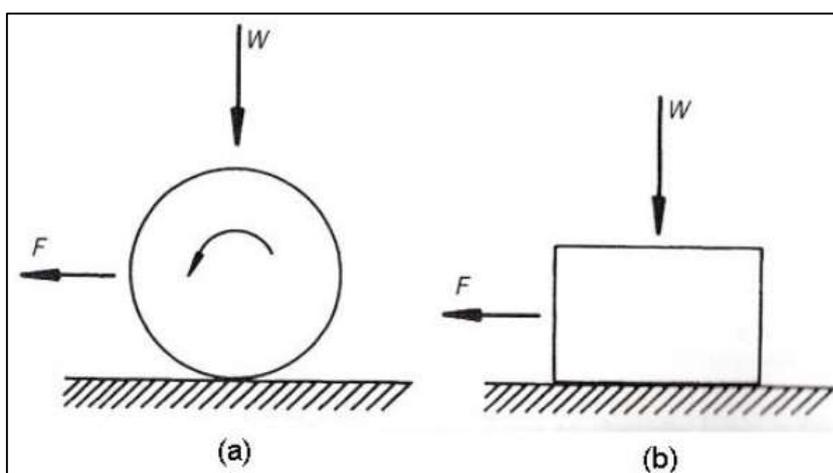


Figura 45 - Força de atrito F necessária para promover movimento por (a) rolagem e (b) deslizamento
Fonte: Boutin e Rocha (2015)

Para Wandembruck e Barioni (2015), sempre que existir um movimento, ou tendência de movimento, de uma superfície em relação à outra, haverá uma força contrária, essa força chama-se atrito. Em alguns casos, o atrito é necessário e útil, como exemplo nos sistemas de freios e em outros extremamente indesejados, pois dificulta o movimento e consome energia motriz, sem produzir trabalho (MOURA, 1987 apud WANDEMBRUCK; BARIONI, 2015). Ainda de acordo com o autor, mesmo que a superfície seja considerada polida, ela apresenta imperfeições, ainda que em escala microscópica. O contato se dá deste modo nos picos de duas superfícies, assim a área real de contato é uma pequena da área aparente. Verifica-se na Figura 46, que aumenta-se a área real de contato quando se aumenta a força normal praticada, fazendo com que os picos se deformem (WANDEMBRUCK; BARIONI, 2015).

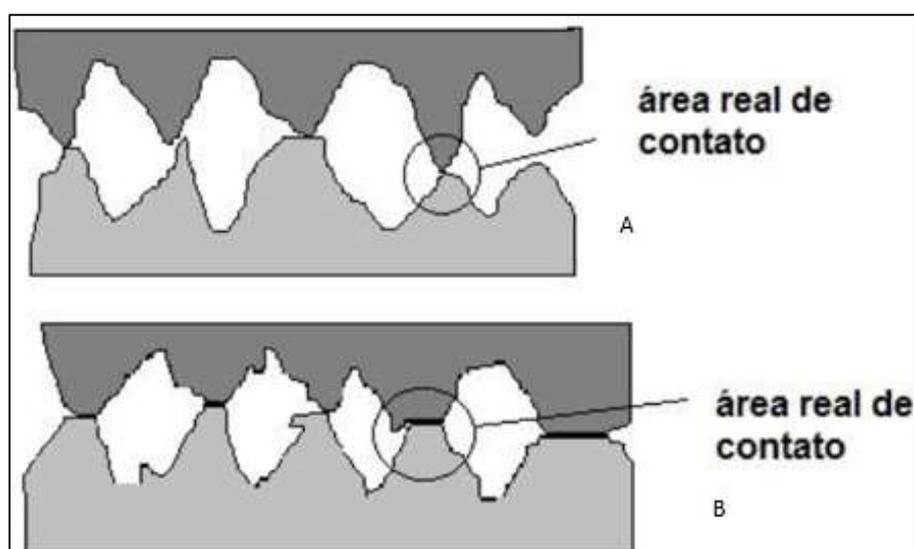


Figura 46 - (A) Representação da área real de contato; (B) Representação da área real de contato com o aumento da força normal
Fonte: Traduzido de Wandembruck e Barioni (2015)

Boutin e Rocha (2015) mencionam que vários modelos são úteis para o estudo da força de atrito. Os recentes associam o mecanismo de atrito a duas componentes: a deformação (asperezas de uma superfície mais dura arrastando sobre um material mais macio) e adesão (junções que ocorrem no contato entre as superfícies devido às ligações secundárias entre os átomos de cada corpo). As duas componentes não são de fatos independentes, mas, muitas vezes, são tratadas separadamente a fim de facilitar o entendimento dos fenômenos envolvidos (BOWDEN; TABOR, 1950 apud BOUTIN; ROCHA, 2015). Para os autores o coeficiente de atrito, então, é equivalente a soma das parcelas de adesão e de deformação mostrada na Equação 14 e representada na Figura 47.

Equação 14:

$$\mu = \mu_a + \mu_d$$

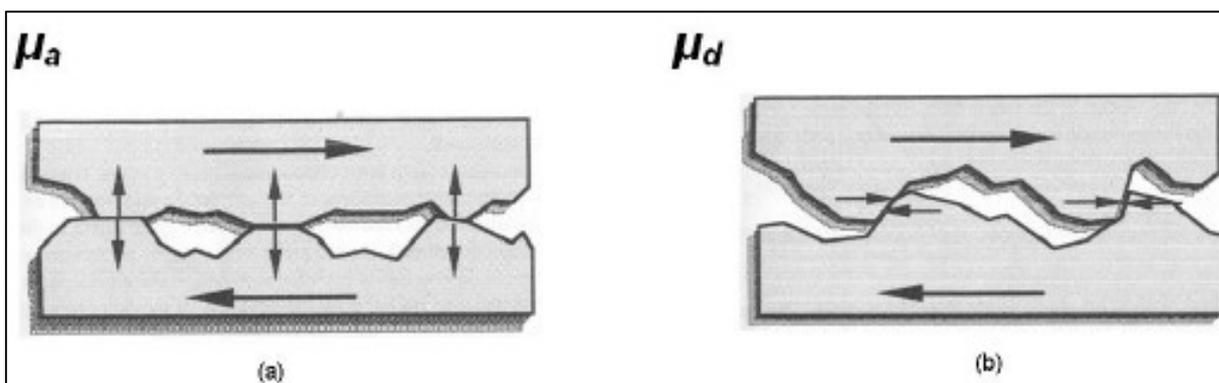


Figura 47 - Componentes do coeficiente de atrito conforme modelo de Bowden e Tabor: (a) adesão e (b) deformação

Fonte: Boutin e Rocha (2015)

A força de atrito necessária, para superfícies não excessivamente lisas ou rugosas, seria a força necessária para cisalhar as junções formadas devido ao carregamento normal. Assim, considerando a tensão cisalhante (t_c), e a área real de contato (A_r). A força de atrito é proporcional somente à área de contato real, pois para superfícies com distâncias acima de 1nm as forças adesivas são extremamente pequenas e não contribuem de modo significativo no atrito (PERSSON, 1999 apud VALE, 2014).

Segundo Vale (2014), em contraste com metais e cerâmicas, os polímeros de engenharia, os quais são comumente utilizados em aplicações tribológicas, exibem, comumente, baixo coeficiente de atrito, com valores típicos entre 0.1 e 0.5, tanto para deslizamento sobre materiais poliméricos quanto deslizando com outros tipos de materiais. Ainda Vale (2014) menciona que são muitas vezes aplicados em situações tribológicas sem lubrificação, deslizando contra superfícies relativamente mais duras. O autor ainda menciona que o contato entre polímeros, ou o contato entre polímeros e metais é predominantemente elástico, com exceção de superfícies com rugosidade elevada. Um segundo fator que diferencia o comportamento tribológico dos polímeros, é que os mesmos são visco elásticos (HUTCHINGS, 1992 apud VALE, 2014), e assim, suas propriedades mecânicas são fortemente dependentes do tempo, da temperatura e da taxa de deformação (NORTON, 2003 apud VALE, 2014). Com isso, o coeficiente de atrito se apresenta com comportamento complexo e varia com o carregamento normal, a velocidade de deslizamento e a temperatura no contato (HUTCHINGS, 1992 apud VALE, 2014).

2.2.6.1. Atrito por Adesão

Em deslizamento de polímeros de superfície polida em contra-corpo de superfície também polida, a força de atrito origina-se da adesão entre estas superfícies (zona interfacial), onde o contato das asperezas é predominantemente elástico (os valores da razão E/H que determina a extensão da plasticidade na região de contato para os polímeros são de 10% dos valores para os materiais metálicos, onde predomina o contato plástico. O componente adesivo resulta das forças de ligação fracas (forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio), as quais são responsáveis pela coesão entre as cadeias poliméricas e o material do contra-corpo. O mecanismo de adesão está relacionado ao cisalhamento das junções e à deposição de filmes poliméricos transferidos ao contra-corpo (HUTCHINGS, 1992; LUDEMA; TABOR, 1966 apud RODRIGUES, 2007).

Vale e Silva (2015) afirmam que a adesão em especial, exerce papel fundamental na força de atrito entre polímeros e está relacionado com a força necessária para quebrar as ligações entre átomos através de cisalhamento nas áreas de contato, contudo, deve-se atentar para os fenômenos que envolvem deslizamento com polímeros que apresentam estruturas lineares. Os autores apresentam a seguinte discussão como exemplo, o polietileno em contato com uma superfície de aço, condição apresentada esquematicamente na Figura 48. São representadas duas cadeias de material polimérico, A e B, sendo que a primeira está em contato com a superfície metálica.

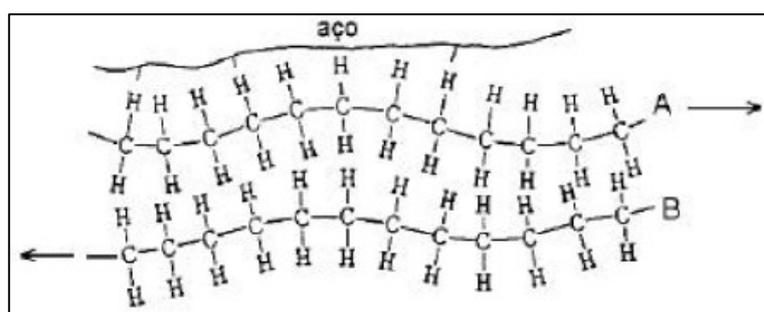


Figura 48 - Modelo esquemático para o PE, material polimérico que possui estrutura com cadeias lineares, deslizando sobre uma superfície de aço.

Fonte: Vale e Silva (2015)

O fator mais importante nesta estrutura lamelar é que as ligações dos átomos nas camadas são do tipo covalente, e conseqüentemente fortes contudo as ligações entre as cadeias, A e B no exemplo, são muito mais fracas e do tipo secundárias ou de Van Der Waals (VALE; SILVA, 2015). Os autores afirmam que, quando o contato

é estabelecido surgem forças de adesão entre a cadeia mais externa, A, e a superfície metálica cujas forças de adesão são, comumente maiores que entre as cadeias A e B. Diante destas circunstâncias, durante o deslizamento, e com a imposição de tensões cisalhantes, haverá movimento relativo entre as cadeias A e B (YAMAGUCHI, 1990 apud VALE; SILVA, 2015), pois a quebra destas ligações é mais fácil de acontecer do que a quebra das ligações entre a cadeia A e a superfície do contra-corpo (HUTCHINGS, 1992 apud VALE; SILVA, 2015). Com isso, há a formação de filmes transferidos, condição que influencia de maneira significativa a tribologia destes tipos de materiais (STACHOVIK; BATCHELOR, 2013, apud VALE; SILVA, 2015), os quais exibem baixos coeficientes de atrito, cuja característica os torna atrativos para aplicação como lubrificantes sólidos (YAMAGUCHI, 1990 apud VALE; SILVA, 2015).

2.2.6.2. Atrito por Deformação

Seabra (2000 apud BOUTIN; ROCHA, 2015) cita que, no momento em que uma aspereza dura desliza sobre um polímero existe dissipação energética na área de contato associada a um aumento de temperatura, de forma que se torna praticamente impossível a dissociação e a quantificação das parcelas da adesão e da deformação para o atrito. O autor menciona que a fim de minimizar a parcela associada à adesão, pode-se considerar um sistema com uma esfera rígida, em contato lubrificado, rolando sobre um polímero, conforme Figura 49.

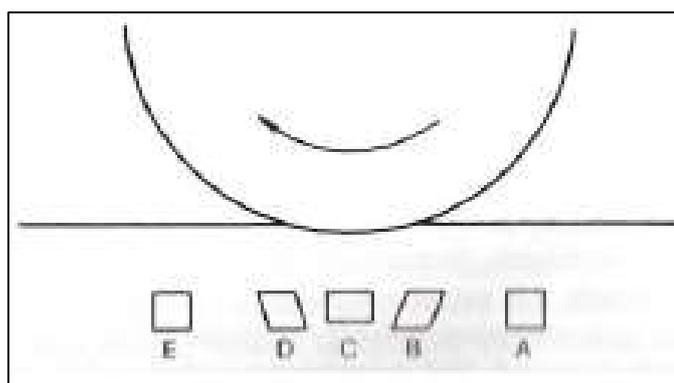


Figura 49 - Comportamento da superfície polimérica devido à passagem de uma esfera rígida rolante
Fonte: Boutin e Rocha (2015)

Na Figura 49, pode-se perceber a existência da deformação elástica na superfície de contato, sem deformação plástica do material (BOUTIN; ROCHA, 2015). Isso é possível pois o polímero consegue armazenar energia elástica que, após a passagem da esfera, é devolvida ao sistema, exceto por uma pequena parcela

correspondente à perda por histerese (SEBRA, 2000 apud BOUTIN; ROCHA, 2015). A deformação e a posterior recuperação sofrida pela superfície evidenciam as características visco elásticas do polímero.

2.2.6.3. Coeficiente de Atrito

Chen e Zhou (2001), em análises de coeficiente de atrito, afirmam que o atrito é um representativo principal de respostas de um tribo-sistema. Na Figura 50, mostra a variação do coeficiente de atrito em relação ao número de ciclos em um alcance de amplitudes de 20 para 1000 μm . Nos primeiros ciclos do processo de desgaste, coeficientes de atrito mostram uma flutuação maior de instabilidade. Isto significa que não tem uma tendência fixa para essa flutuação no desgaste inicial para as observações dos autores em muitos experimentos, as vezes isto é menor, e as vezes é maior.

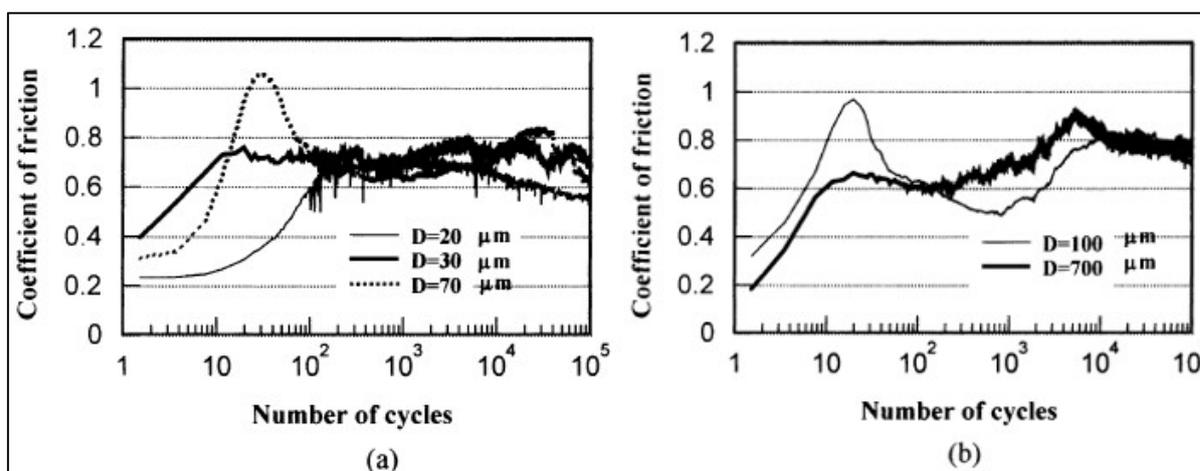


Figura 50 - Variação dos coeficientes de atrito com o número de ciclos
Fonte: Chen e Zhou (2001)

Segundo Ishida e Beê (2009), o coeficiente de atrito pode apresentar um comportamento instável em seus primeiros momentos de movimento até estabilização. A curva de coeficiente de atrito se molda ao conjunto de fatores de instabilidade, não se atendo a uma única causa. Superfícies contaminadas, diferenças de rugosidade, rebarbas, orientações de estrutura são possíveis causas citadas como relevantes neste comportamento que pode ser observado na Figura 51.

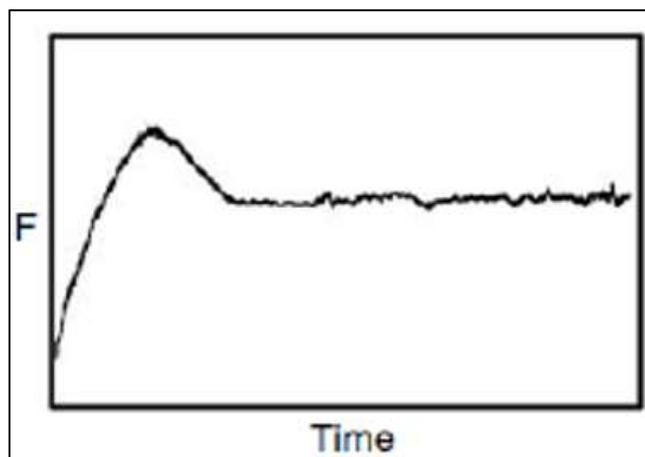


Figura 51 - Comportamento inicial do coeficiente de atrito de polímeros em deslizamento sobre metal afetado pela diferença de rugosidade

Fonte: Ishida e Beê (2015)

Blau (2009 apud ISHIDA; BEÊ, 2015), também observou que por um período caracterizado período de transição. Em sua teoria, este período está relacionado com o aumento tanto da temperatura, quanto da área nominal de contato, como pode ser observado na Figura 52.

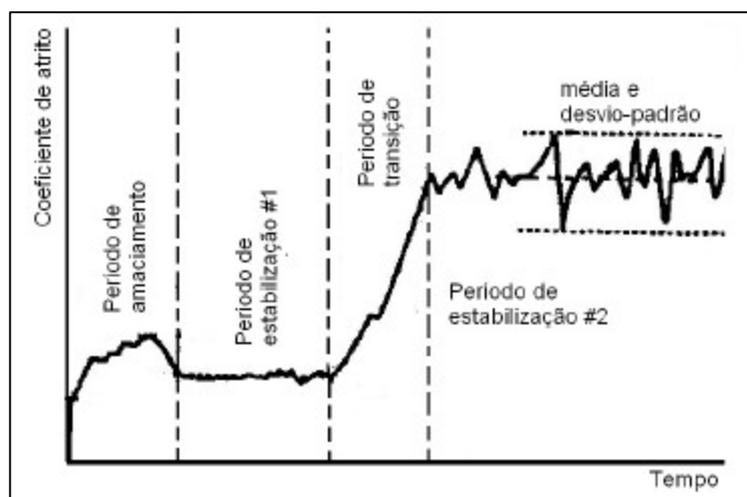


Figura 52 - Exemplo de curva de coeficiente de atrito cinético em função do tempo com a identificação de regiões de amaciamento, transição e estabilização com lubrificação

Fonte: Ishida e Beê (2015)

Ünlü et al. (2009 apud ISHIDA; BEÊ, 2015) fizeram análises de coeficientes de atrito do tipo pino sobre disco e publicaram resultados em condições de velocidade de 0,13m/s e 20N de força normal. Inicialmente o POM se demonstrou com um coeficiente de atrito maior (0.35) que PA 6.0 (0,33), posteriormente houve uma tendência aos materiais apresentarem coeficientes de atrito próximos (a partir dos sessenta minutos). Observam-se os resultados na Figura 53.

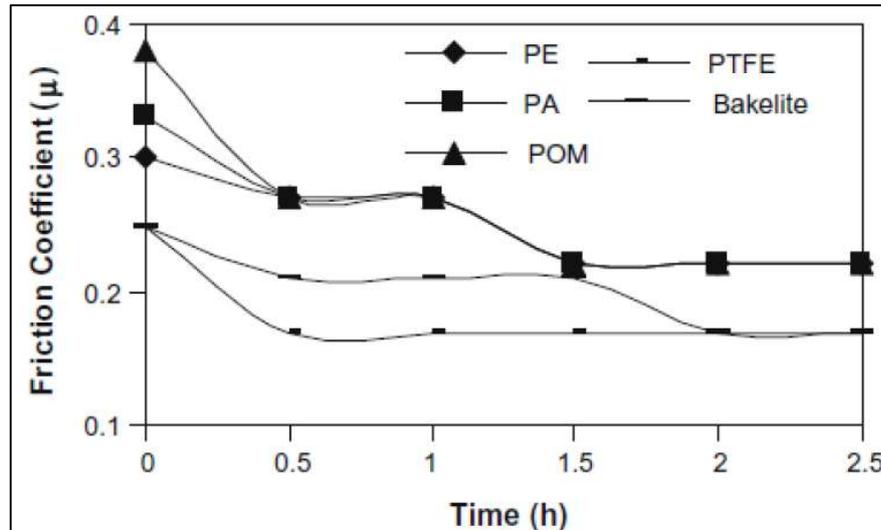


Figura 53 - Gráfico coeficiente de atrito pelo tempo
Fonte: Ishida e Beê (2015)

De acordo com Maio (2012), para o caracterizar o atrito entre dois corpos em movimento relativo é utilizado o coeficiente de atrito. Segundo a primeira lei do atrito, a força de atrito é dada pela seguinte equação:

Equação 15:

$$F_a = \mu \cdot F_N \quad [N]$$

Logo, coeficiente de atrito é:

Equação 16:

$$\mu = \frac{F_a}{F_N}$$

Sendo que: μ é o coeficiente de atrito, F_a é a força de atrito e F_N é a força normal.

O coeficiente de atrito não é uma propriedade do material. É uma constante adimensional, válida apenas para um determinado par de materiais e para um determinada conjunto de condições de contato (BHUSHAN, 1999; ZAMBELLO; VINCENT, 1998 apud MAIO, 2012).

2.3 Planejamento de Experimentos com Vários Fatores

Um experimento é somente um teste ou uma série de testes. Experimentos são feitos em todas as disciplinas científicas e de engenharia e são uma importante parte da maneira de aprendermos sobre como sistemas e processos funcionam. A validade das conclusões que são tiradas de um experimento depende, em grande extensão de como o experimento foi conduzido. Consequentemente, o planejamento do

experimento desenvolve o papel principal na solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Para Rodrigues e Lemma (2009 apud TOLEDO, 2015), experimentos delineados em esquemas fatoriais são aqueles que envolvem combinações entre os níveis de dois ou mais fatores. Para Montgomery (2013 apud TOLEDO, 2015), um experimento planejado é um teste ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, que permitem observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída.

Complementando com Barros Neto et al. (1995 apud RODRIGUES, 2007), no planejamento de experimentos deve-se determinar os fatores e as respostas de interesse para o sistema a ser estudado e posteriormente definir os objetivos que se deseja alcançar, pois isso determinará o tipo de técnica de planejamento de experimentos a ser empregada. Definidos os fatores significativos, deve-se avaliar a influência destes sobre as respostas de interesse, usando para isto um planejamento fatorial completo. Para obter uma descrição detalhada da variação da resposta de interesse, utiliza-se a modelagem por mínimos quadrados. A otimização das respostas de interesse pode ser obtida por meio da metodologia de superfície de resposta.

São apresentados neste item alguns conceitos fundamentais para aplicação das técnicas de planejamento estatístico de experimentos (MONTGOMERY, 1984 apud RODRIGUES, 2007).

- **Variáveis de entrada ou fatores:** também denominadas variáveis independentes; são os fatores alterados deliberadamente em um experimento.
- **Variáveis de saída ou resposta:** são as variáveis dependentes que sofrem alguns efeitos nos experimentos quando as variáveis de entrada são alteradas. Em um experimento podem existir uma ou várias variáveis de resposta.
- **Níveis:** são as diferentes categorias ou valores de um fator, os níveis são codificados como nível baixo (-1), geralmente associado ao menor valor do fator investigado, nível intermediário ou médio (0) e nível alto (+1).
- **Efeito:** variação da magnitude da resposta em função dos níveis superior e inferior do fator.

- **Efeito principal:** é a diferença média observada na variável de saída quando se muda o nível da variável de entrada.
- **Efeito da interação:** é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator no níveis de outro fator.
- **Tratamentos:** é a combinação dos níveis dos fatores, isto é, cada corrida do experimento representa um tratamento.

2.3.1 Planejamento Fatorial

Calado e Montgomery (2003 apud RODRIGUES, 2007) mencionam que o planejamento fatorial para avaliar dois ou mais fatores, com a combinação de todos os fatores em todos os níveis e a possibilidade de prever a interação entre os fatores investigados. Geralmente realiza-se o planejamento com dois níveis (2^k), ou no máximo três níveis (3^k), pois acima disso haveria um aumento do número dos pontos experimentais, fato que se deseja evitar quando o planejamento é proposto.

O tipo mais simples de um planejamento 2^k é o 2^2 , ou seja dois fatores A e B, cada um com dois níveis (NAVIDI, 2010 apud TOLEDO, 2015). Geralmente esses níveis são considerados com nível baixo e alto do fator. O planejamento 2^2 que pode ser geometricamente representado com um quadrado, com $2^2 = 4$ corridas, ou combinações de tratamentos, formando os vértices do quadrado, é apresentado na Figura 54.

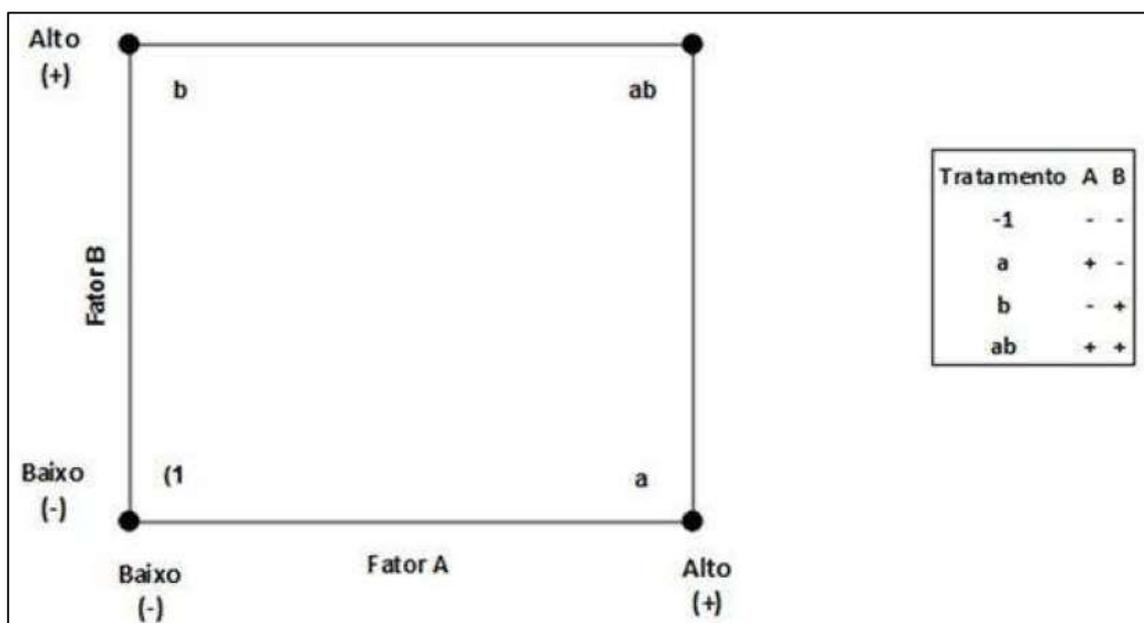


Figura 54 - Planejamento de experimento 2^2
Fonte: Toledo (2015)

Segundo Montgomery e Runger (2012), uma notação especial é usada para marcar as combinações dos tratamentos. Em geral, uma combinação de tratamentos é representada por uma série de letras minúsculas. Se uma letra estiver presente, o fator correspondente é corrido no nível alto naquela combinação de tratamento; se ela estiver ausente, o fator é corrido em seu nível baixo. Por exemplo, a combinação de tratamentos *a* indica que o fator *A*, está no nível alto e o fator *B* está no nível baixo. A combinação de tratamento com ambos os fatores no nível baixo é representado por (1). Essa notação será usada em toda a série de planejamentos 2^k . Por exemplo, a combinação de tratamentos em um 2^4 , com *A* e *C* no nível alto e *B* e *D* no nível baixo, é denotado por *ac*.

De acordo com Montgomery e Runger (2012), os efeitos de interesse no planejamento 2^2 são os efeitos principais *A* e *B* e o fator de interação de segunda ordem *AB*. Sejam as letras (1), *a*, *b* e *ab* os totais de todas as *n* observações tomadas nesses pontos dos planejamentos. É fácil estimar os efeitos desses fatores.

Carpinetti (2009), como exemplo em um experimento fatorial 2^3 temos três fatores de controle em dois níveis (codificados por +1 e -1), resultando em $2^3 = 8$ combinações. Uma forma sistemática de planejar o experimento é apresentada a seguir.

- 1) Para o fator de controle 1 (x_1), escreva uma coluna de (1) com sinal alternando seguidamente. Ou seja: -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1;
- 2) Para o fator de controle 2 (x_2), escreva uma coluna (1) com o sinal alternando em pares, ou seja: -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1;
- 3) Para o fator de controle 3 (x_3), escreva uma coluna de (1) com o sinal alternando em grupos de 4, ou seja: -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1,.

Escrevemos estas três colunas como uma matriz de planejamento, como segue na Figura 55:

Teste	Fator de Controle		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Figura 55 - Matriz de Planejamento para um experimento 2^3
 Fonte: Carpinetti (2009)

Para o caso geral, com k fatores, isto é, um experimento 2^k , o procedimento é o seguinte (CARPINETTI, 2009):

- 1) Para x_1 , o sinal da coluna de (1) alterna em grupos de $2^0 = 1$, ou seja, seguidamente.
- 2) Para x_2 , o sinal da coluna de (1) alterna em grupo de $2^1 = 2$, ou sejam em pares.
- 3) Para x_3 , o sinal da coluna (1) alterna em grupos de $2^2 = 4$, ou seja, em grupos de 4.
- 4) Para x_4 , o sinal alterna em grupos de $2^{(4-1)} = 8$.
- 5) Para X_k , o sinal alterna em grupos de $2^{(k-1)}$, ou seja, $2^{(k-1)}$ vezes (-1), seguido de $2^{(k-1)}$ vezes (+1).

Esta forma de organizar o experimento é chamada de “ordem padrão”. Tal arranjo garante que as colunas sejam ortogonais entre si. Essas condições de teste podem ser ilustradas geometricamente, conforme Figura 56.

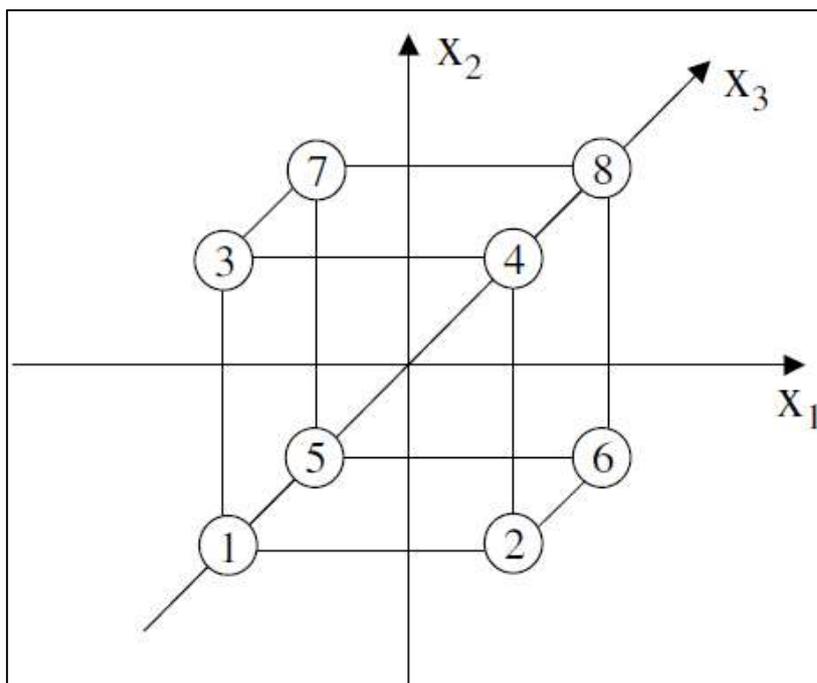


Figura 56 - Representação geométrica do experimento fatorial 2^3
 Fonte: Carpinetti (2009)

Montgomery e Runger (2012) comentam que:

À medida que o número de fatores cresce em um experimento fatorial, o número de efeitos que podem ser estimados também cresce. Por exemplo, um experimento 2^4 tem 4 efeitos principais, 6 interações de segunda ordem, 4 interações de terceira ordem e 1 uma interação de quarta ordem, enquanto um experimento 2^6 tem 6 efeitos principais, 15 interações de segunda ordem, 20 interações de terceira ordem, 15 interações de quarta ordem, 6 interações de quinta ordem e 1 interação de sexta ordem. Em muitas situações, o **princípio da esparsidade dos efeitos** se aplica; ou seja, o sistema é geralmente dominado pelos efeitos principais e interações de ordens baixas. As interações de terceira ordem e superiores são geralmente negligenciadas. Conseqüentemente, quando o número de fatores for moderadamente grande, $k \geq 4$ ou 5, uma prática comum é correr somente uma réplica do planejamento 2^k e então combinar as interações de ordens mais altas como uma estimativa do erro. Algumas vezes, uma única réplica de um planejamento 2^k é chamada de planejamento fatorial 2^k **sem réplicas**.

Quando se analisam dados provenientes de planejamentos fatoriais sem réplicas, interações reais de ordens altas existem ocasionalmente. O uso de uma média quadrática do erro, obtida pela combinação de interações de ordens altas, não é apropriado nesses casos. Um método simples de análise pode ser usado para superar esse problema. Construa um gráfico das estimativas dos efeitos em uma escala de probabilidade normal. Os efeitos que forem desprezíveis são normalmente distribuídos, com média zero e variância σ^2 , e tenderão a cair ao longo de uma linha reta nesse gráfico, enquanto efeitos significativos não terão média zero e não repousarão ao longo de uma linha reta.

2.3.2 Adição de Pontos Centrais a um Planejamento Fatorial

Uma preocupação potencial no uso de planejamento fatoriais com dois níveis é a suposição de linearidade nos efeitos dos fatores. Naturalmente, a linearidade perfeita é desnecessária e o sistema 2^k trabalhará bem, mesmo quando a suposição de linearidade se mantiver apenas aproximadamente. No entanto, há um método de replicar certos pontos fatoriais do 2^k que dará proteção contra curvatura, assim como permitirá uma estimativa independente do erro a ser obtido. O método consiste em adicionar pontos centrais ao planejamento 2^k . Esses consistem em n_c réplicas corridas no ponto $x_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$). Uma razão importante para adicionar as corridas replicadas no centro do planejamento é que pontos centrais não repercutem nas estimativas usuais dos efeitos em um planejamento 2^k . Consideramos que os k fatores são quantitativos (MONTGOMERY e RUNGER, 2012).

Para Montgomery e Runger (2012), ilustrar a abordagem, considere um planejamento 2^2 com uma observação em cada um dos pontos fatoriais (-, -), (+, -), (-, +), e (+, +) e n_c observações nos pontos centrais (0, 0). A figura 57 ilustra a situação. Seja \bar{y}_F a média das quatro corridas nos quatro pontos fatoriais e seja \bar{y}_C a média das n_c corridas no ponto central. Se a diferença $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ for pequena, os pontos centrais estarão no plano ou próximo do plano passando através dos pontos fatoriais, não havendo portanto curvatura. Por outro lado, se $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ for grande, então a curvatura estará presente.

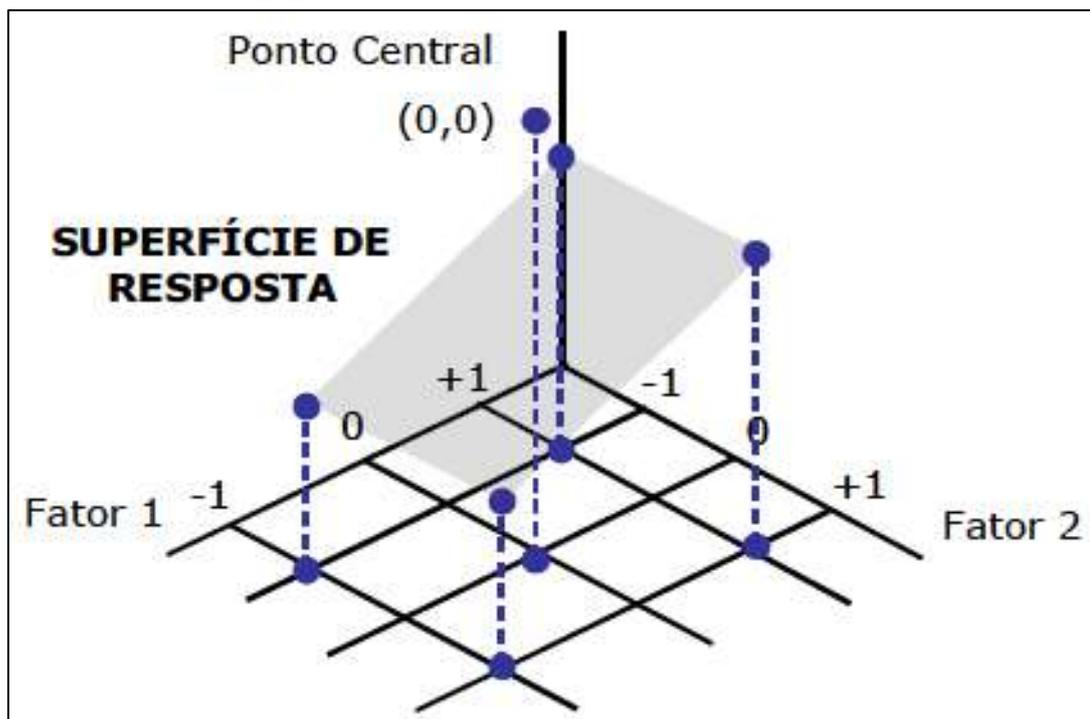


Figura 57 - Planejamento 2^2 com pontos centrais
 Fonte: Carpinetti (2009)

2.3.3 Planejamento de superfície de resposta

Segundo Montgomery e Runger (2012), a metodologia da superfície de resposta, ou MSR, é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse seja influenciada por muitas variáveis e o objetivo seja otimizar a resposta. Como exemplo os autores, supõem que um engenheiro químico deseje encontrar os níveis de temperatura (x_1) e concentração de alimentação (x_2) que maximizem o rendimento (y) de um processo. O rendimento de um processo é uma função dos níveis de temperatura e de concentração de alimentação como

Equação 17:

$$Y = f(x_1, x_2) + \epsilon$$

Em que ϵ representa o ruído ou erro observado na resposta Y . Se denotarmos a resposta esperada por $E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta$, então a superfície representada por:

Equação 18:

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

É chamada de uma superfície de resposta.

De acordo com Montgomery e Runger (2012), pode-se representar graficamente a superfície de resposta conforme mostrado na Figura 58, sendo η plotado contra os níveis de x_1 e x_2 . Note que a resposta é representada como um gráfico de superfície em um espaço tridimensional. Com o objetivo de visualizar a forma de uma superfície de resposta, frequentemente plotamos os contornos da superfície de resposta, como mostrado na Figura 59. Para os autores no gráfico dos contornos conhecido como gráfico das das curvas de nível, linhas de resposta constante são desenhadas no plano x_1, x_2 . Cada contorno corresponde a uma altura particular da superfície de resposta. O gráfico das curvas de nível é útil no estudo dos níveis x_1 e x_2 que resultam nas mudanças na forma ou na altura da superfície de resposta.

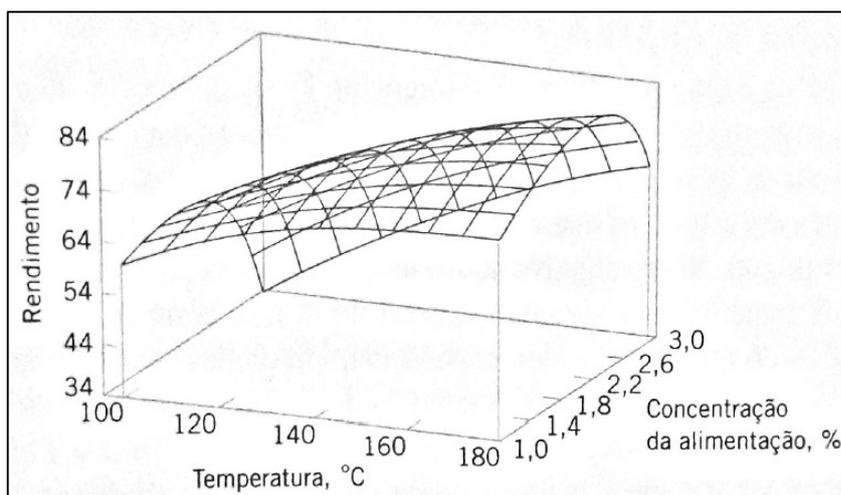


Figura 58 - Uma superfície tridimensional de resposta, mostrando o rendimento esperado, como uma função da temperatura e da concentração de alimentação
Fonte: Montgomery e Runger (2012)

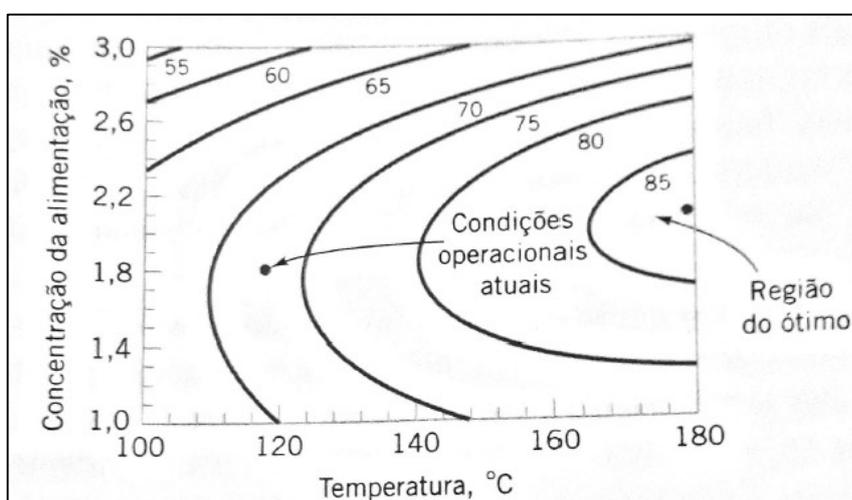


Figura 59 - Curvas de nível da superfície de resposta
Fonte: Montgomery e Runger (2012)

Para Rodrigues (2007), a modelagem é o ajuste de modelos, lineares ou quadráticos, a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos fatoriais, mediante o uso de testes de hipóteses. Portanto o primeiro passo é identificar a função matemática que modele a variação das respostas em função da variação dos fatores investigados; se a relação mostrar uma função linear entre os fatores e a resposta, ela será representada pelo modelo de primeira ordem (Equação 19):

Equação 19:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_K \cdot X_K + \varepsilon$$

Porém, se houver curvatura no sistema, a função será representada por um modelo de segunda ordem, ou modelo quadrático (Equação 20). Um planejamento para ajuste de um modelo quadrático deve possuir ao menos três níveis para cada fator (MONTGOMERY, 1984 apud RODRIGUES, 2007).

Equação 20:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \cdot X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{j=1}^k B_{jj} \cdot X_j^2 + \varepsilon$$

Nessas equações, y representa as variáveis de saída ou resposta; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_k$ representam os coeficientes do polinômio; X_i, X_j, X_k são os fatores experimentais, e ε representa o erro experimental (BARROS NETO; SCARMINO; BRUNS, 1995; CALADO; MONTGOMERY, 2003 apud RODRIGUES, 2007).

Para Rodrigues (2007), o deslocamento é a determinação do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, isto é, a trajetória em que os fatores experimentais produzem um valor máximo ou mínimo de resposta.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Montagem do Sistema de Testes

Foram realizados 11 corridas para avaliação do sistema. Para cada corrida foram testados 2 esticadores ao mesmo tempo, configurando para o planejamento de experimento como 2 repetições por corrida devido ao teste simultâneo das duas peças para o mesmo setup. Cada corrida desse teste foi executado em equipamento de teste específico em laboratório com a temperatura ambiente de 100°C por 144 horas e com os níveis de cada fator definido conforme corridas do planejamento de experimento. Na Figura 60, é possível verificar o esquema do equipamento de teste que é composto por um cabo de aço que será instalado no poste de montagem da polia e será carregado estaticamente até sua posição de trabalho igualmente a do automóvel. No extremo oposto do cabo de aço tem um eixo excêntrico acoplado a um motor elétrico, e esse eixo excêntrico através do cabo de aço conforme rotaciona aplica a amplitude desejada no esticador, além da frequência da amplitude.

Conforme Figura 1 e Figura 2 onde é mostrado o funcionamento do esticador automotivo, o propósito desse equipamento de teste é simular o esticador trabalhando em uma mesma situação, como se tivesse funcionado no motor de um automóvel.

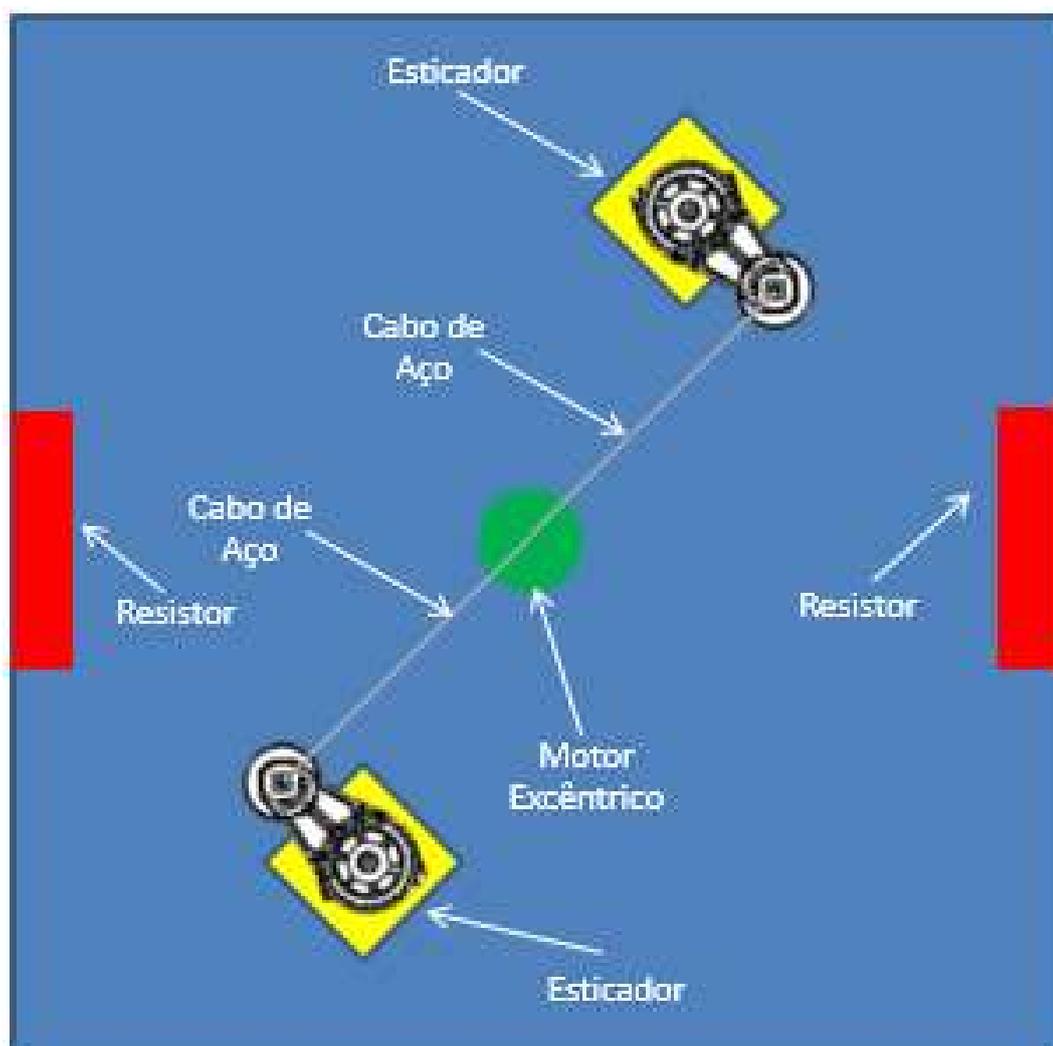


Figura 60 – Esquema do equipamento para simulação de teste para esticadores de correia
 Fonte: Autor (2018)

3.2 Equipamentos utilizados para analisar o desgaste da bucha

3.2.1 Medição do desgaste pela perda de massa

Antes da montagem da bucha foram feitas as medições da bucha com relação a massa total, espessura da flange da bucha e espessura do corpo da bucha.

Com relação a medição da massa da bucha foi usada a balança marca And, modelo HR-202, conforme Figura 61.



Figura 61 – Balança (Marca AND /
Modelo HR-200)
Fonte: Autor (2018)

Os valores para percentual de desgaste foram calculados com base nos valores de perda de massa (gramas) com a coleta de dados pré e pós teste.

Equação 21:

$$\% \text{ de Desgaste em relação ao Massa} = \frac{\text{Massa Pré teste} - \text{Massa Pós teste}}{\text{Massa Pós teste}}$$

3.2.2 Medição do desgaste pela espessura da parede

Para a verificação dimensional da espessura da flange e do corpo da bucha foi usado um equipamento de medição tridimensional da marca Mitutoyo, modelo Beyond 710, conforme Figura 62.



Figura 62 - Máquina Tridimensional
(Marca Mitutoyo / Modelo Beyond 710)
Fonte: Autor (2018)

Os valores para percentual de desgaste da espessura da flange foram calculados com base nos valores de perda da espessura da flange (milímetros) com a coleta de dados pré e pós teste.

Equação 22:

$$\% \text{ de Desgaste (Espessura da Flange)} = \frac{\text{Esp. Pré teste} - \text{Esp. Pós teste}}{\text{Esp. Pós teste}}$$

Os valores para percentual de desgaste foram calculados com base nos valores de espessura do corpo da bucha (milímetros) com a coleta de dados pré e pós teste.

Equação 23:

$$\% \text{ de Desgaste (Corpo da Bucha)} = \frac{\text{Esp. Pré teste} - \text{Esp. Pós teste}}{\text{Esp. Pós teste}}$$

3.2.3 Análise de Imagens

Para a coleta das imagens fotográficas foi usado o equipamento de medição por imagem da marca MicroVu, modelo Vertex 251UC, conforme Figura 63.



Figura 63 – Equipamento de medição por imagem e análise fotográficas (Marca MicroVu / Modelo Vertex 251UC)
Fonte: Autor (2018)

3.3 Planejamento Fatoriais de Experimentos

Foi realizado o planejamento de experimento 2³ com duas repetições e três pontos centrais usando o *software* Minitab® versão 2017, e as corridas foram executadas no equipamento de laboratório para posterior verificação do desgaste da bucha, a definição de quais fatores seriam usados e nível dos mesmos foi baseado nas características possíveis que influenciam no comportamento da bucha que é a altura da mola onde exerce uma pressão axial na flange da bucha, amplitude do esticador e frequência de trabalho. As duas repetições se devem a serem testados dois esticadores ao mesmo tempo no equipamento e estarem usando o mesmo set-up para a corrida. De acordo Antony (2003), muitos experimentadores usam o termo ‘repetição’ e ‘replicação’ indiferentemente. Tecnicamente falando, eles não são iguais. Na repetição, um experimentador pode repetir uma condição de tentativa experimental inúmeras vezes conforme planejado, antes de proceder para a próxima tentativa de layout experimental. Ainda para o autor repetição é um processo de rodar as tentativas de experimento sobre os mesmos parametros de set-up da máquina. Já com relação a replicação o autor informa que é um processo de rodar as tentativas de experimento de modo aleatorizado.

Conforme citado, segue fatores considerados no planejamento de experimentos:

- Altura da mola;
- Amplitude do esticador;
- Frequência de trabalho.

Na Tabela 2, é mostrado o planejamento de experimento.

Tabela 2 - Planejamento de experimentos 2^3 x 2 repetições e 3 pontos centrais

Planejamento Fatorial Completo

Fatores	3
Corridas	11
Blocos	1
Planejamento Base	3; 8
Réplicas	1
Repetições	2
Pontos Centrais	3

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 3 são mostrados os valores dos parâmetros para os níveis dos experimentos.

Tabela 3 - Níveis dos parâmetros do experimento 2^3 x 2 repetições e 3 pontos centrais

Fator	Nível baixo (-1)	Ponto Central (0)	Nível alto (+1)
Amplitude (mm)	3,5	5	6,5
Frequência (Hz)	21	22,5	24
Altura da Mola (mm)	34,12	36,12	38,12

Fonte: Autor (2018)

As corridas experimentais são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Corridas experimentais

Ordem Padrão	Ordem da corrida	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Altura da Mola (mm)
11	1	5	22,5	36,12
1	2	3,5	21	34,12
4	3	6,5	21	38,12
6	4	6,5	24	34,12
5	5	3,5	24	34,12
8	6	6,5	24	38,12
7	7	3,5	24	38,12
10	8	5	22,5	36,12
2	9	6,5	21	34,12
9	10	5	22,5	36,12
3	11	3,5	21	38,12

Fonte: Autor (2018)

Nas 11 corridas do experimento fatorial com 3 pontos centrais foi possível constatar a linearidade do desgaste e foi obtido um comportamento hierárquico, verificou-se quais fatores influem nas variáveis de saída propostas. Caso ocorresse um comportamento quadrático não seria possível a verificação do comportamento do desgaste, pois seria necessário a adição corridas nas faces centradas das vértices e novamente mais três pontos centrais para a análise de superfície de resposta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo para avaliação dos resultados, utilizou-se um planejamento 2³ com a verificação das variáveis dependentes Amplitude, Frequência e Altura da Mola. Foram apresentados os resultados encontrados pós teste e além da execução das análises fatoriais para a verificação de quais fatores e de qual ordem são influentes para as seguintes variáveis de saída abaixo:

- Percentual de desgaste da bucha em relação a massa;
- Percentual de desgaste da bucha em relação a espessura da flange;
- Percentual de desgaste da bucha em relação a espessura do corpo.

Em cada umas dessas análises foram verificados se os comportamentos são lineares através da análise da curvatura, e se são significativos, com isso podendo redesenhar a regressão para uma otimização do modelo. Após essas análises serão mostrado gráficos de representação geométrica do experimento fatorial com os respectivos resultados de desgaste vide figura 56, e gráficos de contorno conforme figura 59 para melhor entendimento do % do desgaste para cada nível dos efeitos dos fatores.

4.1 Percentual de Desgaste da Bucha em Relação a Massa

4.1.1 Análise dos efeitos dos fatores

Na Tabela 5, são apresentados os resultados provenientes da variável de saída % de desgaste da bucha em relação a massa, pode-se verificar a ordem das corridas, os níveis de cada fator usado em cada corrida, os valores do % de desgaste pela massa de cada repetição que seria cada esticador testado e a média das repetições da 1^a repetição e 2^a repetição de cada corrida.

Tabela 5 - Percentual de taxa de desgaste da bucha em relação a massa

Ordem Padrão	Ordem da corrida	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Altura da Mola (mm)	% de Desgaste por Massa 1° Repetição	% de Desgaste por Massa 2° Repetição	% de Desgaste por Massa (Média)
11	1	5	22,5	36,12	2,782	3,398	3,090
1	2	3,5	21	34,12	2,625	2,526	2,575
4	3	6,5	21	38,12	2,437	3,308	2,872
6	4	6,5	24	34,12	8,440	2,757	5,599
5	5	3,5	24	34,12	2,349	2,155	2,252
8	6	6,5	24	38,12	6,125	4,647	5,386
7	7	3,5	24	38,12	2,254	2,436	2,345
10	8	5	22,5	36,12	2,254	3,483	2,868
2	9	6,5	21	34,12	1,780	2,807	2,294
9	10	5	22,5	36,12	2,951	3,030	2,990
3	11	3,5	21	38,12	1,823	2,503	2,163

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da Tabela 5, na Tabela 6 foram avaliados quais fatores são significantes para a variável de resposta do % de desgaste através da massa da bucha.

Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento do % de desgaste da bucha por massa

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	5,8063	5,80626	74,17	0,003
Frequência	1	4,0286	4,02862	51,46	0,006
Alt. Mola	1	0,0003	0,00027	0	0,957
Amplitude*Frequência	1	4,4404	4,44036	56,72	0,005
Amplitude*Alt. Mola	1	0,0588	0,05882	0,75	0,450
Frequência*Alt. Mola	1	0,0103	0,01029	0,13	0,741
Curvatura	1	0,0897	0,08971	1,15	0,363
Falta de Ajuste	1	0,2102	0,21022	17,08	0,054
Erro Puro	2	0,0246	0,01231		
Total	10	14,6692			

Fonte: Autor (2018)

Baseado na Tabela 6 gerada pelo *software* Minitab®, os fatores amplitude e frequência juntamente com um fator de 2ª ordem entre os fatores entre si amplitude x frequência são significativos, pois os P-valores <0,05 confirmam a significância. A curvatura com P-valor >0,05 não se mostrou significativa para essa variável de saída, com isso pode-se concluir que esse tipo de desgaste é linear. Conforme Montgomery e Runger (2018, p. 93), sobre o princípio da esparsidade dos efeitos o fator de 3ª

ordem foi negligenciada e foi assumido como a falta de ajuste e o erro puro do modelo, sendo que o P-valor $>0,05$ para a falta de ajuste mostra que não é estatisticamente significativo, ou seja o fator de terceira ordem é dominado somente pelos efeitos principais. Para uma melhor entendimento dos resultados será mostrado o gráfico de normalidade para a verificação de quais fatores afetam a resposta, e após isso será mostrado o gráfico dos efeitos principais dos fatores e de interação entre eles, conforme Figuras 64, 65 e 66.

A Figura 64, representa o gráfico de normalidade para os efeitos dos fatores, os valores dos fatores significantes foram 0,003, 0,006 e 0,005 e os valores dos fatores insignificantes foram 0,957, 0,450 e 0,741 da Tabela 6.

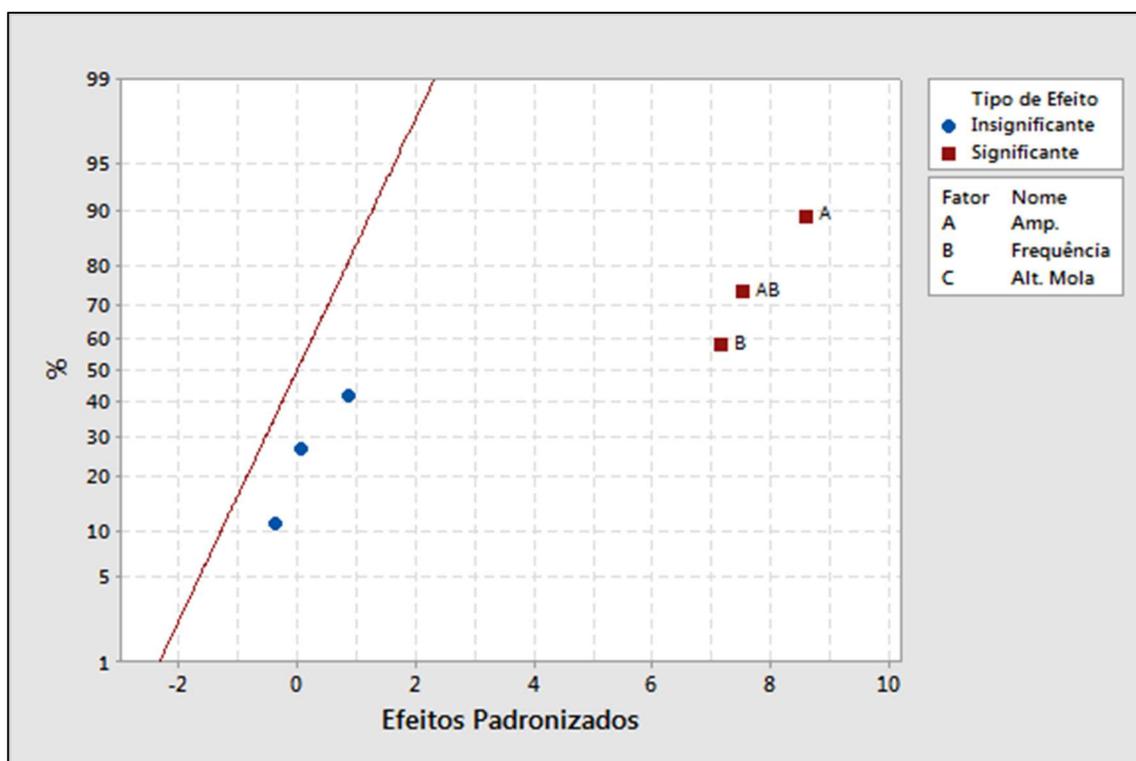


Figura 64 - Gráfico de Normalidade para os Efeitos dos Fatores
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 64, os fatores significantes encontram-se deslocados em relação a linha normal, portanto são os fatores influentes no desgaste.

Baseado nos resultados do % de desgaste por massa (média) da Tabela 5, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos efeitos principais, conforme Figura 65.

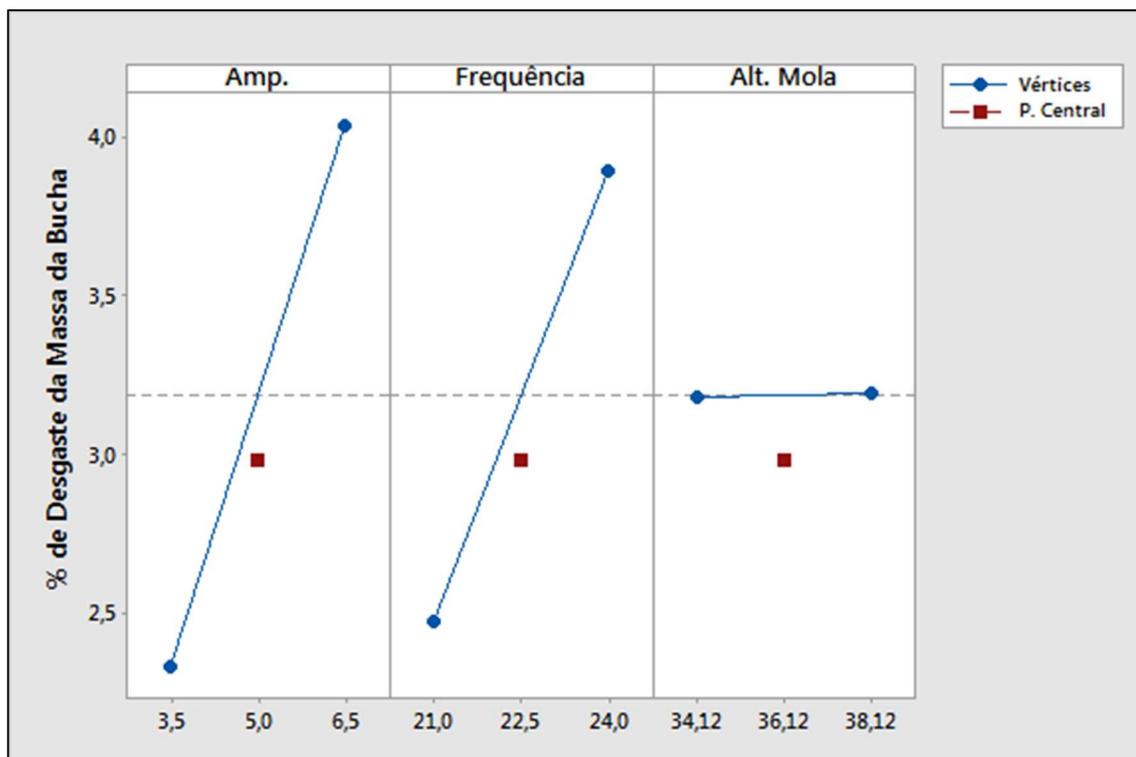


Figura 65 - Gráfico dos Efeitos Principais
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 65, percebe-se que quanto desloca-se para as vértices de máxima da amplitude e frequência de trabalho, respectivamente 6,5mm e 24Hz, maior é o percentual de desgaste da bucha, ocorrendo o oposto para as vértices de mínima, ou seja, minimização do desgaste. Em relação a altura da mola não verifica-se essa inclinação da curva, ou seja, mesmo quando as vértices foram alteradas não ocorre mudanças no desgaste.

Baseado nos resultados do % de desgaste por massa (média) da Tabela 5, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de interação entre os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figura 66.

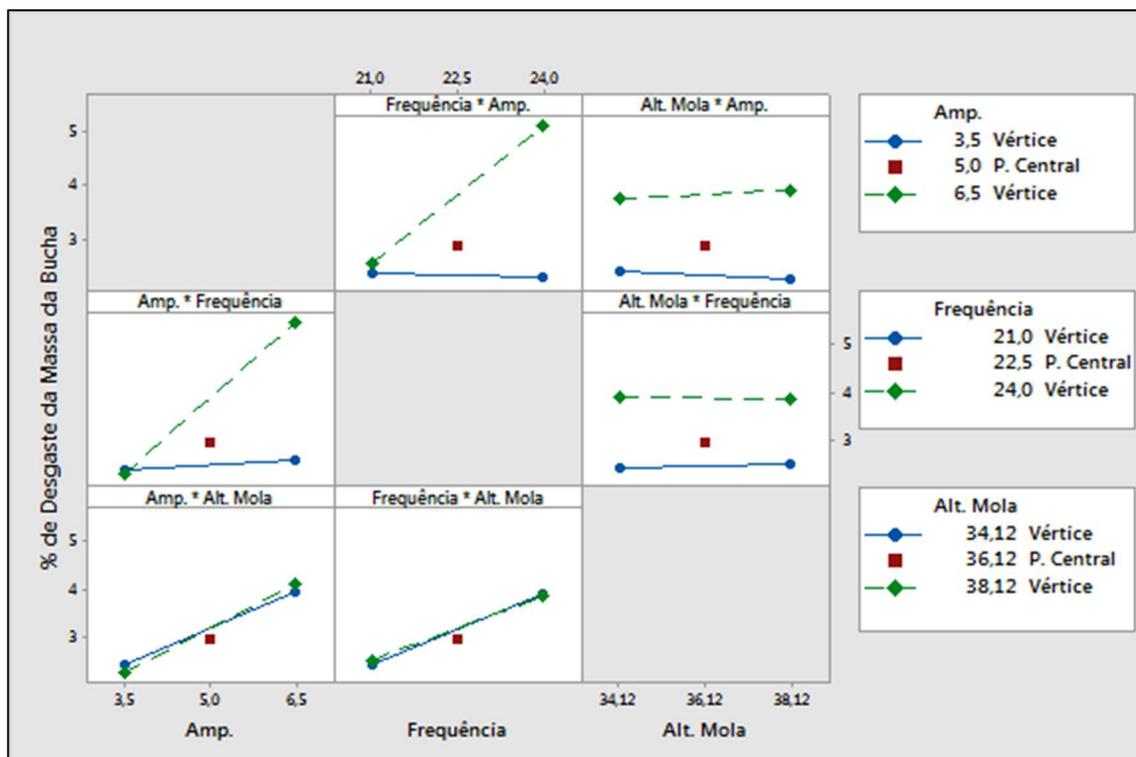


Figura 66 - Gráfico de interação entre os fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 66, é possível verificar que ocorre uma interação entre alguns fatores, porém o único fator significativo que interage é AB = Amplitude x Frequência na vértice de mínima da amplitude 3,5mm a frequência de 24 Hz atenua o desgaste, e fica similar com o desgaste na vértice de 21Hz, quando deslocado para o vértice de máxima da amplitude o desgaste é acentuado para ambas as frequências, porém com 6,5mm de amplitude a potencialidade é maior. Verifica-se que no fator frequência x altura da mola o desgaste é influenciado somente pelo fator frequência, ou seja, ocorre uma interação quando altera-se as vértices da frequência.

Baseado nos resultados de % desgaste por massa da 1ª repetição e 2ª repetição de cada corrida da Tabela 5, na Tabela 7 foram avaliados quais desvios padrão dos efeitos dos fatores são significantes e se apresentam com comportamento linear para a variável de resposta do % de desgaste por massa.

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) do desvio padrão o planejamento de experimento do % de desgaste da bucha por massa

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	6,5693	6,56932	5,83	0,095
Frequência	1	0,2551	0,2551	0,23	0,667
Alt. Mola	1	0,012	0,01196	0,01	0,924
Amplitude*Frequência	1	0,8458	0,84582	0,75	0,450
Amplitude*Alt. Mola	1	1,1488	1,14883	1,02	0,387
Frequência*Alt. Mola	1	1,0192	1,01916	0,9	0,412
Curvatura	1	0,3381	0,33813	0,3	0,622
Falta de Ajuste	1	0,0659	0,06585	0,04	0,860
Erro Puro	2	3,3131	1,65655		
Total	10	13,5673			

Fonte: Autor (2018)

Baseado na Tabela 7 gerada pelo *software* Minitab®, constatasse que não houveram fatores significativos com relação ao desvio padrão dos efeitos, ou seja, nenhum dos desvios padrão são significantes no modelo. Mas dentre esses fatores a amplitude obteve o desvio padrão mais significativo. Para um melhor entendimento dos resultados será mostrado o gráfico de normalidade para a verificação de quais fatores dos desvios padrão afetam a resposta, e após isso será mostrado o gráfico dos efeitos principais dos desvios padrão dos efeitos e de interação entre eles, conforme Figuras 67, 68 e 69.

A Figura 67, representa o gráfico de normalidade para os desvios padrão dos efeitos dos fatores, todos os valores insignificantes com P-valor >0,05 foram 0,095, 0,667, 0,924, 0,450, 0,387, 0,412 da Tabela 7.

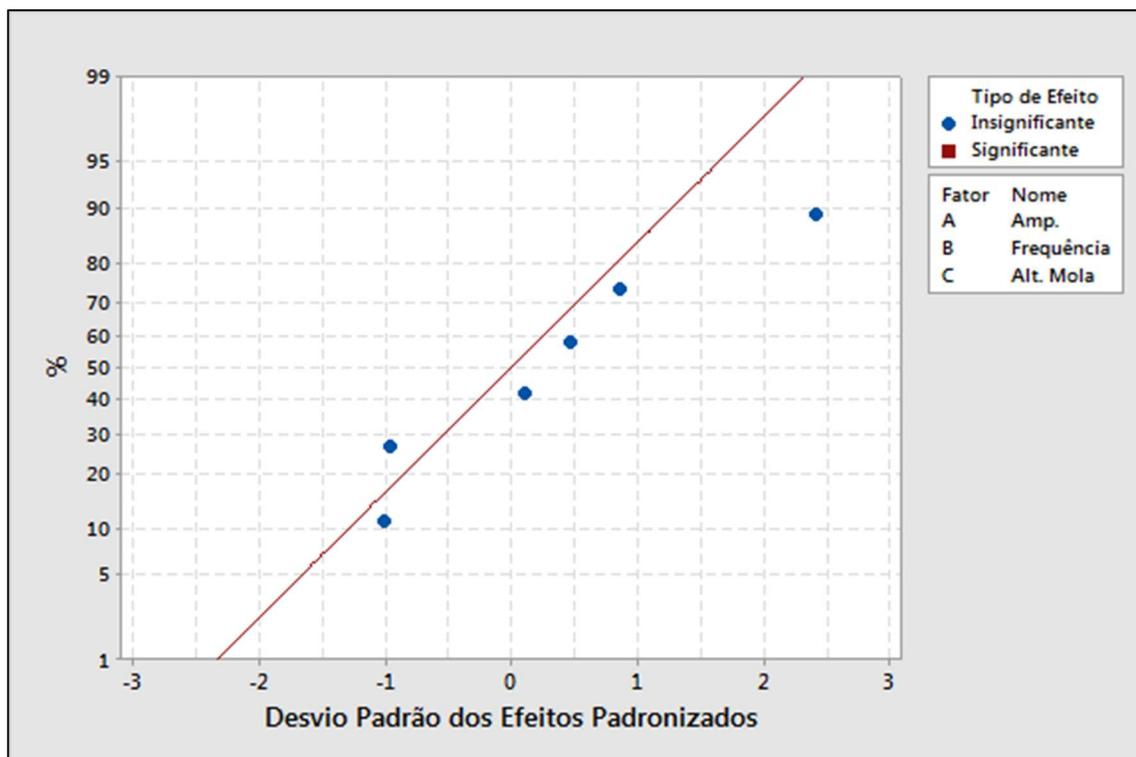


Figura 67 - Gráfico de Normalidade para o Desvio Padrão dos Efeitos
 Fonte: Autor (2018)

Na Figura 67, todos os fatores insignificantes encontram-se ao longo de uma linha reta, pode-se destacar a amplitude com resultado P-valor de 0,095 próximo de 0,05 como um ponto de verificação para futuros estudos.

Baseado nos resultados da 1ª repetição e 2ª repetição % de desgaste por massa da Tabela 5, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico do desvio padrão dos efeitos principais, conforme Figura 68.

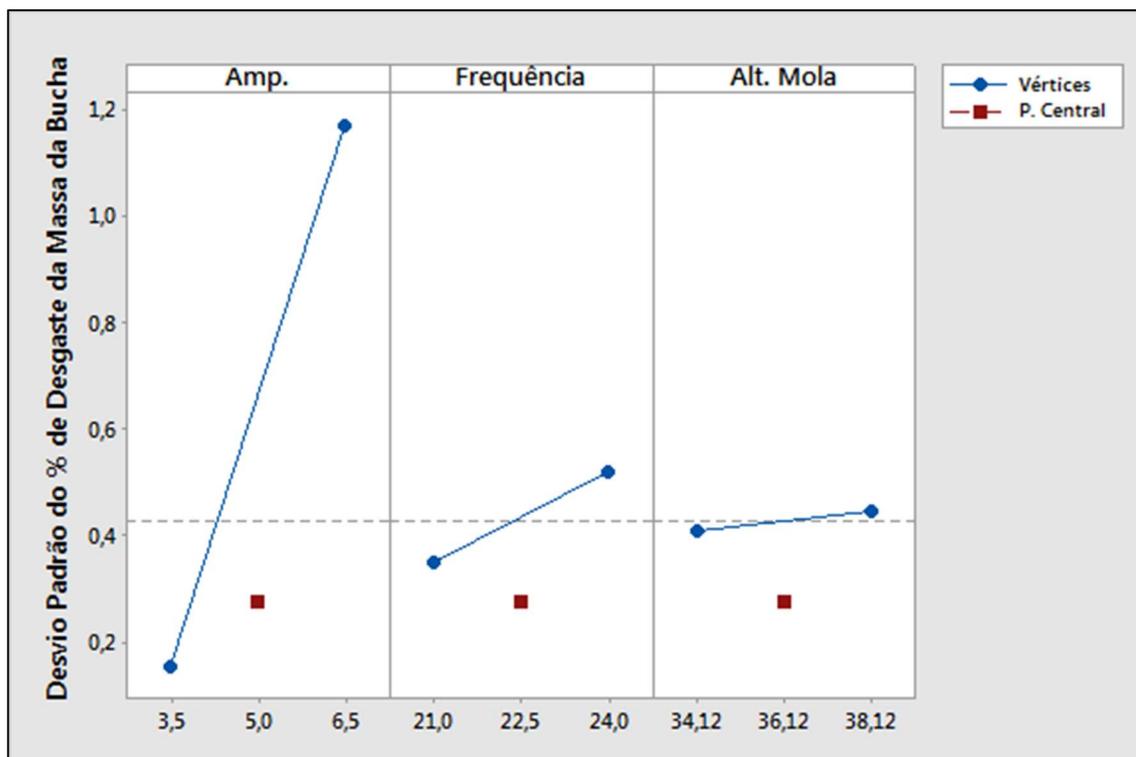


Figura 68 - Gráfico do Desvio Padrão dos Efeitos Principais
 Fonte: Autor (2018)

Na Figura 68, é possível verificar que dentre os desvios padrão dos fatores insignificantes a amplitude e a frequência possuem um desvio padrão conforme ocorre a mudança da vértice de mínima para a máxima e na altura da mola o desvio padrão não ocorre essa comportamento, ou seja, desvio padrão é o mesmo independente da mudança de vértice.

Baseado nos resultados da 1ª repetição e 2ª repetição % de desgaste por massa da Tabela 5, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de interação entre os desvios padrão dos efeitos dos fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figura 69.

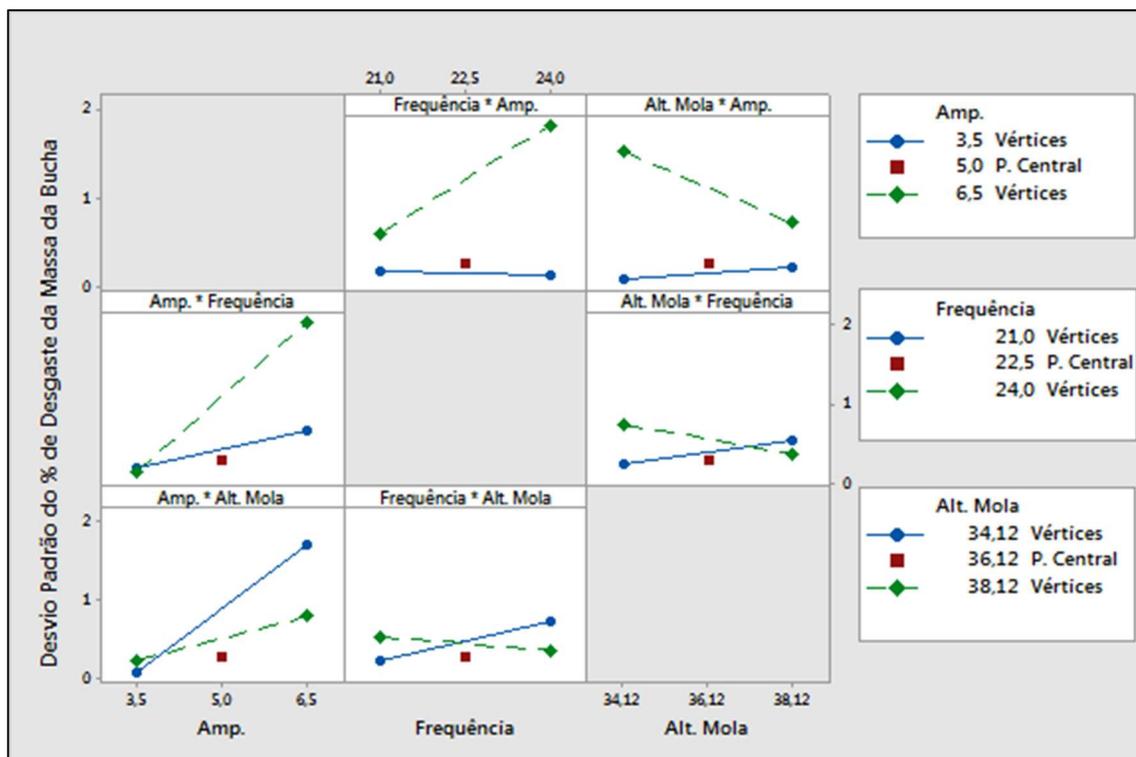


Figura 69 - Gráfico de Interação para os desvios padrão dos fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 69, constatasse algumas interações entre os desvios padrão dos fatores e sempre ocorrendo um aumento do desvio padrão conforme desloca-se para as vértices de máxima da amplitude e frequência. Nesse caso o fator altura da mola quando deslocado para o vértice de máxima 38,12mm ocorre um comportamento inverso onde o desvio padrão é atenuado.

Baseado nos resultados % de desgaste médio por massa da Tabela 5, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos efeitos fatoriais ponto central com seus respectivos resultados, conforme Figura 70. Com a proposição de verificar a linearidade da curva na resposta de saída dos fatores no planejamento fatorial com dois níveis. Os fatores Amplitude, Frequência e Altura da Mola foram aferidos com os pontos centrais 5mm, 22,5Hz, 36,12mm. De acordo com Montgomery e Runger (2012 apud Toledo, 2015), a linearidade perfeita é desnecessária e o sistema 2k trabalhará bem mesmo quando a suposição de linearidade se mantiver apenas aproximadamente. No entanto, os pontos centrais dão proteção contra a curvatura e permitem a estimativa independente do erro a ser obtido.

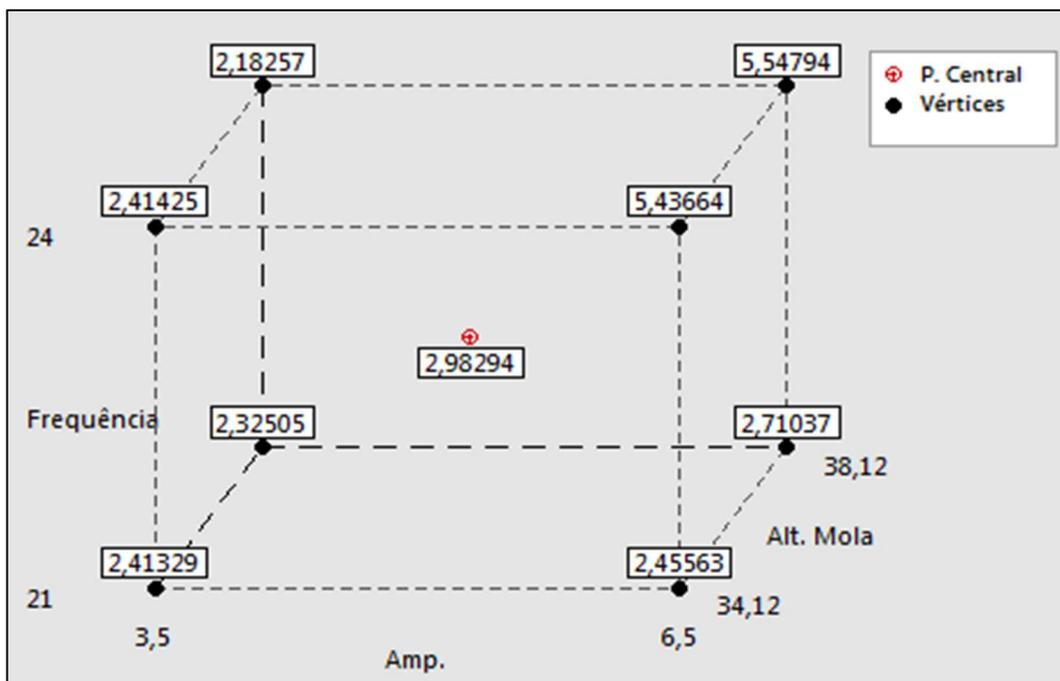


Figura 70 – Representação Gráfica dos Efeitos Fatoriais e Ponto Central com seus respectivos resultados
 Fonte: Autor (2018)

Na Figura 70, é possível verificar que obtem-se os resultados de % desgaste pelo massa dos vértices e ponto central de cada fator. Quando deslocados para as vértices máximas de 6,5mm para amplitude e 24Hz para a frequência potencializa-se o percentual desgaste. Observando esses mesmos ponto de máxima das vértices da amplitude e frequência, com o ponto de máxima e mínima da altura da mola verificamos que em relação ao fator altura da mola o desgaste é similar assim mostrando que esse fator não influenciou no resultado do desgaste.

Baseado nos resultados % de desgaste médio por massa da Tabela 5, foi gerado no *software* Minitab® os gráficos de curva de nível para os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figuras 71, 72 e 73.

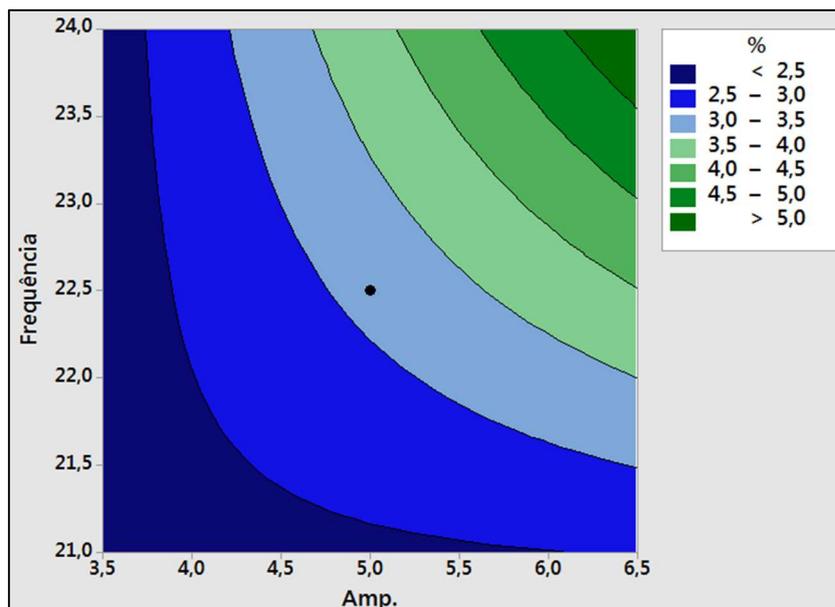


Figura 71 - Gráfico de Curvas de Nível para % de Desgaste da Massa em relação aos Fatores Frequência e Amplitude.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 71, pode-se verificar que o percentual de desgaste aumenta conforme desloca-se para os valores de máxima da amplitude e frequência.

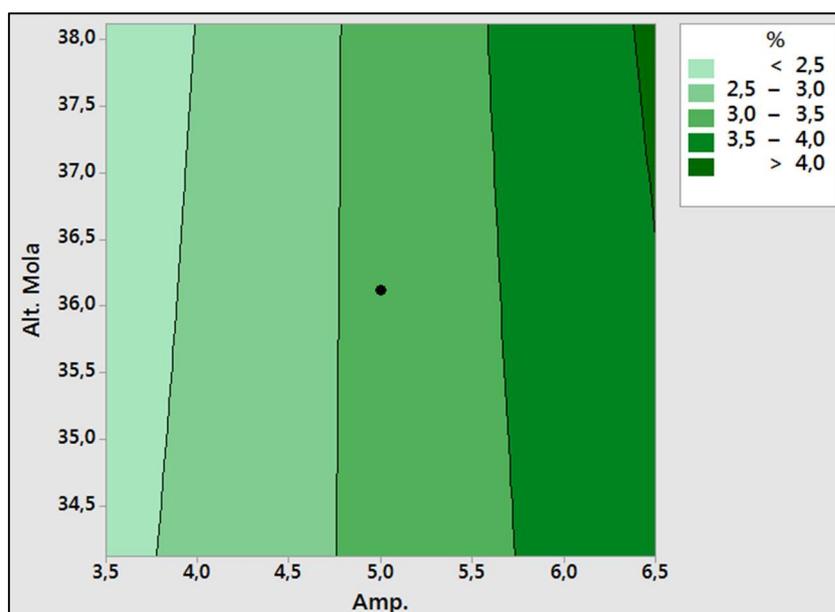


Figura 72 - Gráfico de Curvas de Nível para % de Desgaste da Massa em relação aos Fatores Altura da Mola e Amplitude
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 72, pode-se verificar que o percentual de desgaste acentua somente quando é mudado o valor da amplitude, independente da altura da mola que o percentual de desgaste por massa é similar.

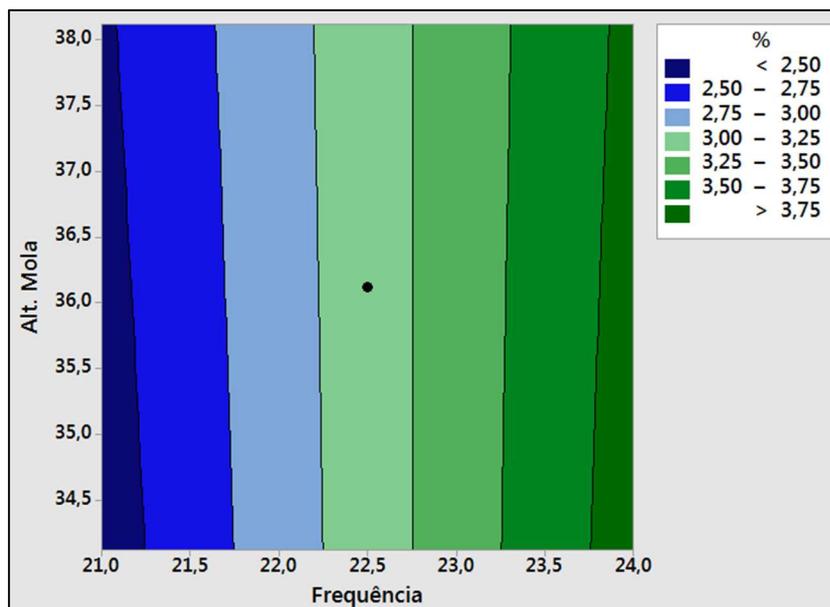


Figura 73 - Gráfico de Curvas de Nível para % de Desgaste da Massa em relação aos Fatores Altura da Mola e Frequência.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 73, é representado o mesmo comportamento da Figura 72, ou seja, apenas um dos fatores acentua o desgaste onde nesse caso específico é a frequência.

4.1.2 Modelo de regressão para % de desgaste da massa da bucha

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da Tabela 5, na Tabela 8 gerada pelo *software* Minitab® para fazer a validação do modelo de regressão avaliou-se quais os fatores são significativos e os que não são significativos podem ser negligenciados do modelo, assim possibilitando a proposta de um modelo de regressão simplificado.

Tabela 8 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão para o % de desgaste por perda de massa

Variável Independente	Estimativa do Efeito	Estimativa do Coeficiente	Erro Padrão do Coeficiente	t para Ho Coeficiente =0	P-valor
Constante		3,1857	0,0989	32,2	0
Amplitude	1,7039	0,8519	0,0989	8,61	0,003
Frequência	1,4193	0,7096	0,0989	7,17	0,006
Alt. Mola	0,0115	0,0058	0,0989	0,06	0,957
Amplitude*Frequência	1,49	0,745	0,0989	7,53	0,005
Amplitude*Alt. Mola	0,1715	0,0857	0,0989	0,87	0,450
Frequência*Alt. Mola	-0,0717	-0,0359	0,0989	-0,36	0,741
Ponto Central		-0,203	0,189	-1,07	0,363

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 8, pode-se observar que os fatores amplitude e frequência foram significativos e um fator de 2ª ordem entre os mesmos fatores amplitude x frequência.

Os fatores com P-valores <0,05 apresentam significância estatística os demais P-valores >0,05 não apresentam significância estatística.

Devido ao ponto central não apresentar significância estatística e a constantes apresentarem significância estatística pode-se apresentar o seguinte modelo de regressão (Equação 24):

Equação 24:

$$\% \text{ Massa} = 22,3 - 7,91 \cdot \text{Amp} - 0,75 \cdot \text{Frequência} + 0,129 \text{AltMola} + 0,3311 \text{ Amp} \cdot \text{Frequência} + 0,0286 \text{ Amp} \cdot \text{AltMola} - 0,0120 \text{ Frequência} \cdot \text{AltMola}$$

Como os fatores com os P-valores <0,05 são somente os significativos, e nenhum desses fatores na análise de variância foram significativos pode-se adotar um modelo de regressão simplificado somente com esses fatores. Conforme modelo de regressão abaixo (Equação 25):

Equação 25:

$$\% \text{ Massa} = 26,90 - 6,882 \cdot \text{Amp} - 1,182 \text{ Frequência} + 0,3311 \cdot \text{Amp} \cdot \text{Frequência}$$

Baseado nos resultados de P-valor da Tabela 8, a Tabela 9 gerado pelo *software* Minitab® avaliou-se a significância de cada fator após a simplificação do modelo de regressão.

Tabela 9 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão simplificado para o % de desgaste por perda de massa.

Fatores	Estimativa do Efeito	Estimativa do Coeficiente	Erro Padrão do Coeficiente	t para Ho Coeficiente =0	P-valor
Constante		3,1304	0,0715	43,77	0
Amplitude	1,7039	0,8519	0,0839	10,16	0,000
Frequência	1,4193	0,7096	0,0839	8,46	0,000
Amplitude*Frequência	1,49	0,745	0,0839	8,88	0,000

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 9, com o modelo de regressão simplificado da Equação 25, todos os efeitos dos fatores e constante proposto na regressão continuam apresentando significância estatística.

Na Tabela 10 gerado pelo *software* Minitab®, mostra o nível de confiabilidade do modelo de regressão. O modelo proposto é capaz de explicar 97,3% da variabilidade dos dados:

Tabela 10 - Estatística da Regressão

Estatística de Regressão	
R-Quadrado	97,31%
R-Quadrado ajustado	96,16%

Fonte: Autor (2018)

4.1.3 Análise Residual do Modelo

Na análise residual de um planejamento fatorial é importante verificar a normalidade dos resíduos e se estão distribuídos independentemente.

De acordo com Montgomery (2004), a análise de variância supõe que os erros do modelo (e , como resultado, as observações) são independentes e normalmente distribuídos com a mesma variância em cada nível do fator. Esses pressupostos podem ser verificados através de uma análise de resíduos.

Para Montgomery (2004), a hipótese de normalidade pode ser verificada com a construção de um gráfico da probabilidade normal para os resíduos. Para verificar a hipótese de igualdade das variâncias para os diferentes níveis do fator, grafie os resíduos versus os níveis do fator e compare a dispersão dos resíduos.

Baseado nos resultados da Tabela 5, % médio de desgaste por massa, foram gerados os resíduos para o modelo simplificado com os fatores Amplitude, Frequência e Amplitude x Frequência, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Resíduos do Modelo de % de Desgaste da Bucha para a massa

Amostra	Resíduos
1	-0,179
2	1,509
3	1,989
4	0,933
5	0,052
6	-0,295
7	0,586
8	-1,158
9	-1,351
10	-0,619
11	-0,871

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resíduos da Tabela 11, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, conforme Figura 74.

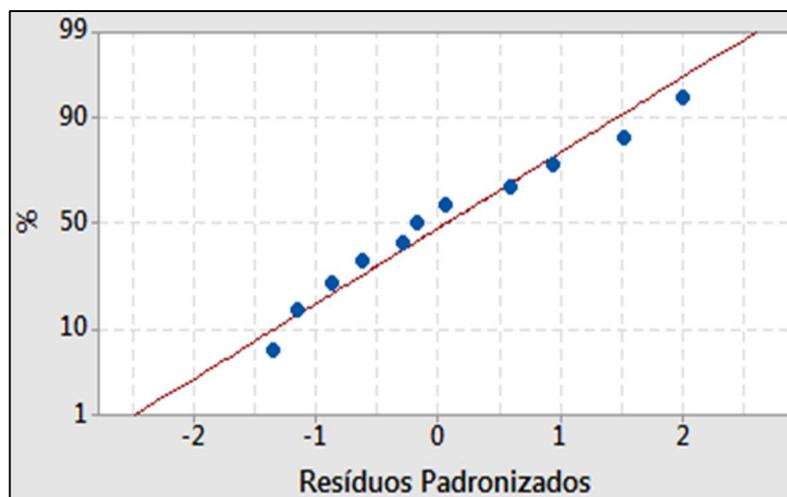


Figura 74 - Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 74, exibe-se um gráfico de probabilidade normal dos resíduos padronizados. Uma vez que os resíduos estão aproximadamente ao longo de uma linha reta os dados mostram um comportamento normal.

Baseado nos resíduos da Tabela 11, foram gerados no *software* Minitab® o gráfico dos resíduos padronizados e diagrama de caixa do teste de hipótese-T, conforme Figuras 75, 76 e 77.

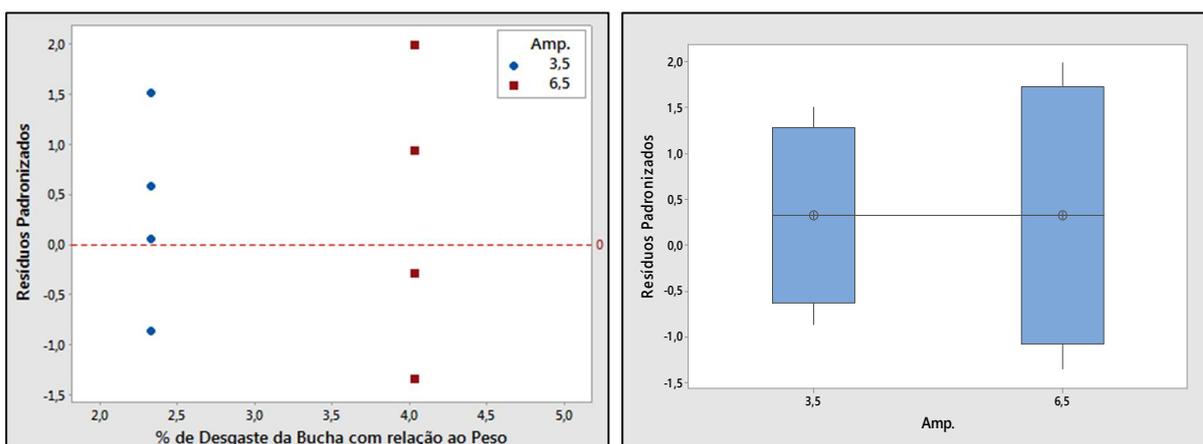


Figura 75 - Gráfico dos resíduos padronizados versus amplitude e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator amplitude
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 75, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator Amplitude para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de

diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 12, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 3,5mm e 6,5mm são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 3,5mm e 6,5mm são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as amplitudes 3.50mm e 6.50mm são estatisticamente iguais.

Tabela 12 - P-valor do teste de hipótese-F

Teste Estatístico - T	
P-valor	1,000
H_0	RES3,5 = RES6,5
H_1	RES3,5 \neq RES6,5

Fonte: Autor (2018)

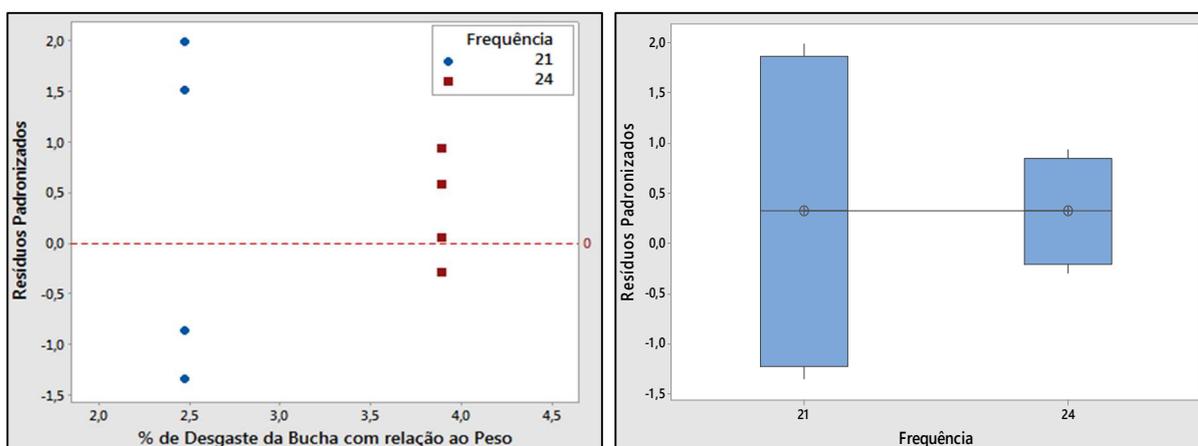


Figura 76 - Gráfico dos resíduos padronizados versus frequência e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator frequência.

Fonte: Autor (2018)

Na Figura 76, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator Frequência para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 13, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 21Hz e 24Hz são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 21Hz e 24Hz são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias

dos resíduos padronizados para as frequências 21Hz e 24Hz são estatisticamente iguais.

Tabela 13 - P-valor do teste de hipótese-T

Teste Estatístico - T	
P-valor	1,000
H ₀	RES21 = RES24
H ₁	RES21 ≠ RES24

Fonte: Autor (2018)

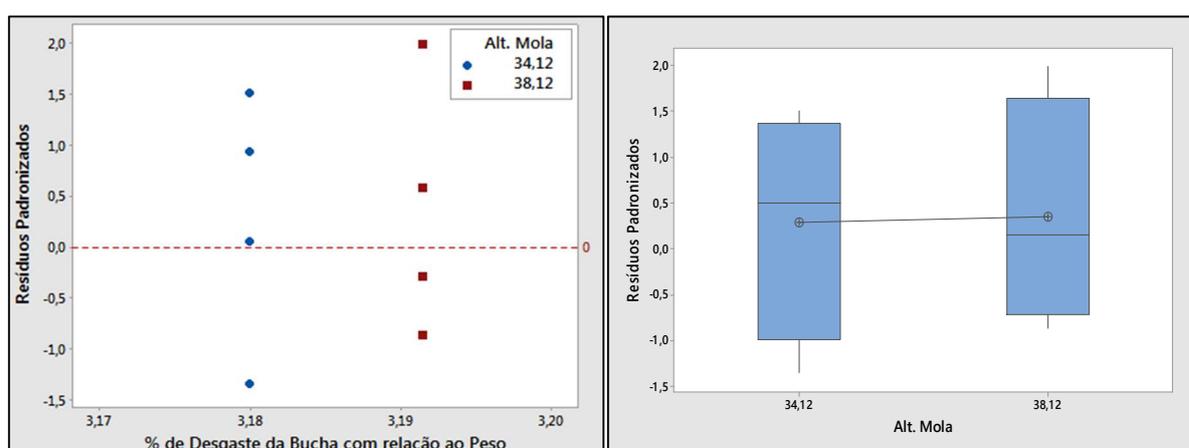


Figura 77 - Gráfico dos resíduos padronizados versus altura da mola e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator altura da mola.

Fonte: Autor (2018)

Na Figura 77, são mostrados os gráficos dos resíduos versus os níveis do fator Altura da Mola para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 14, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 34,12mm e 38,12 são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 34,12mm e 38,12mm são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as alturas de mola 34,12mm e 38,12mm são estatisticamente iguais.

Tabela 14 - P-valor do teste de hipótese-T

Teste Estatístico - T	
P-valor	0,942
H ₀	RES34,12 = RES38,12
H ₁	RES34,12 ≠ RES38,12

Fonte: Autor (2018)

4.1.4 Otimização da resposta

Segundo Candiotti (2014 apud HAN, 2015), a função de conveniência de Derringer permite que o analista encontrar as condições experimentais (níveis de fator) para alcançar, simultaneamente, o valor ideal para todas as variáveis avaliadas, incluindo as prioridades dos pesquisadores durante o processo de otimização. Ainda de acordo com o autor, o desejo da função é sempre tomar valores entre 0 e 1, onde $d_i(\hat{y}_i) = 0$ para uma resposta indesejável e $d_i(\hat{y}_i) = 1$ representa um valor completamente desejável, ou seja, e a resposta ideal. Valores intermediários de $d_i(\hat{y}_i)$ indicam respostas mais ou menos desejáveis.

Para otimização da resposta os dados gerados do *software* Minitab® na Tabela 15, foi utilizado a função de conveniência para encontrar o nível ideal dos fatores significantes, para minimização do % desgaste da bucha pela massa. As 3 soluções de resposta encontram-se com um valor de função da conveniência próximo a 1 sendo uma resposta desejável.

Tabela 15 - Níveis do fator para otimização da resposta com relação a minimização do desgaste

Otimização da Resposta					
Solução da Resposta	Níveis de cada fator			Função de Conveniência	% de Desgaste Previsto
	Amplitude	Frequência	Alt. Mola		
1	3,5	24	34,12	0,979138	2,2431
2	3,5	24	38,12	0,978021	2,2431
3	3,5	21	34,12	0,975973	2,3139

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resultados da Tabela 15, foi gerado no *software* Design Expert versão 6.0.6, o gráfico de superfície de resposta, conforme Figura 78.

DESIGN-EXPERT Plot

% Massa
X = A: A
Y = B: B

Actual Factor
C: C = 36.12

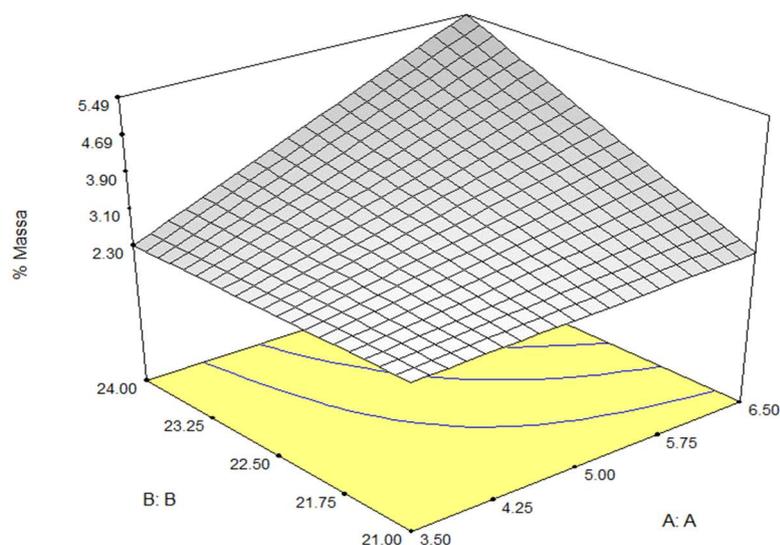


Figura 78 – Gráfico de superfície da otimização da resposta
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 78, definido a variável dependente A:A como a amplitude e a variável dependente B:B como frequência e fixando a altura da mola com o valor de ponto central 36,12mm. É possível verificar que o desgaste por % de massa é atenuado conforme deslocasse para os níveis de mínima dos fatores amplitude e frequência.

4.2 Percentual de Desgaste da Bucha em relação à Espessura da Flange

Na Tabela 16, são os resultados provenientes da variável de saída % de desgaste da bucha em relação a espessura da flange, são mostrados a ordem da corrida, os níveis de cada fator, os valores de cada repetição e a média das repetições de cada corrida.

Tabela 16 - Percentual de taxa de desgaste do flange da bucha.

Ordem Padrão	Ordem da corrida	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Altura da Mola (mm)	% de Desgaste Flange 1° Repetição	% de Desgaste Flange 2° Repetição	% de Desgaste Flange (Média)
11	1	5	22,5	36,12	1,619	1,016	1,318
1	2	3,5	21	34,12	0,506	0,912	0,709
4	3	6,5	21	38,12	2,817	2,947	2,882
6	4	6,5	24	34,12	4,154	1,114	2,634
5	5	3,5	24	34,12	0,202	0,811	0,507
8	6	6,5	24	38,12	7,374	2,637	5,005
7	7	3,5	24	38,12	3,448	3,239	3,344
10	8	5	22,5	36,12	2,227	1,871	2,049
2	9	6,5	21	34,12	2,323	3,232	2,778
9	10	5	22,5	36,12	2,834	2,323	2,579
3	11	3,5	21	38,12	2,535	3,052	2,794

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da espessura do flange da Tabela 16, na Tabela 17 foram avaliados quais fatores estão afetando a variável de resposta do percentual de desgaste através da flange da bucha.

Tabela 17 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento do % de desgaste da flange da bucha

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	4,4199	4,4199	12,18	0,040
Frequência	1	0,6771	0,6771	1,87	0,265
Alt. Mola	1	6,8392	6,8392	18,85	0,023
Amplitude*Frequência	1	0,333	0,333	0,92	0,409
Amplitude*Alt. Mola	1	0,748	0,748	2,06	0,247
Frequência*Alt. Mola	1	1,1392	1,1392	3,14	0,175
Curvatura	1	0,785	0,785	2,16	0,238
Falta de Ajuste	1	0,2868	0,2868	0,72	0,487
Erro Puro	2	0,8015	0,4007		
Total	10	16,0297			

Fonte: Autor (2018)

Baseado na Tabela 17 gerado pelo *software* Minitab® os fatores de primeira ordem Amplitude e Altura da Mola se mostraram significativos, pois, os p-valores encontram-se >0,05. A curvatura e a falta de ajuste não se mostraram significativas portanto o modelo linear é válido.

A Figura 79, representa o gráfico de normalidade para os efeitos dos fatores, os valores dos fatores significantes foram 0,040, 0,023 e os valores dos fatores insignificantes foram 0,265, 0,409, 0,247 e 0,175 da Tabela 17.

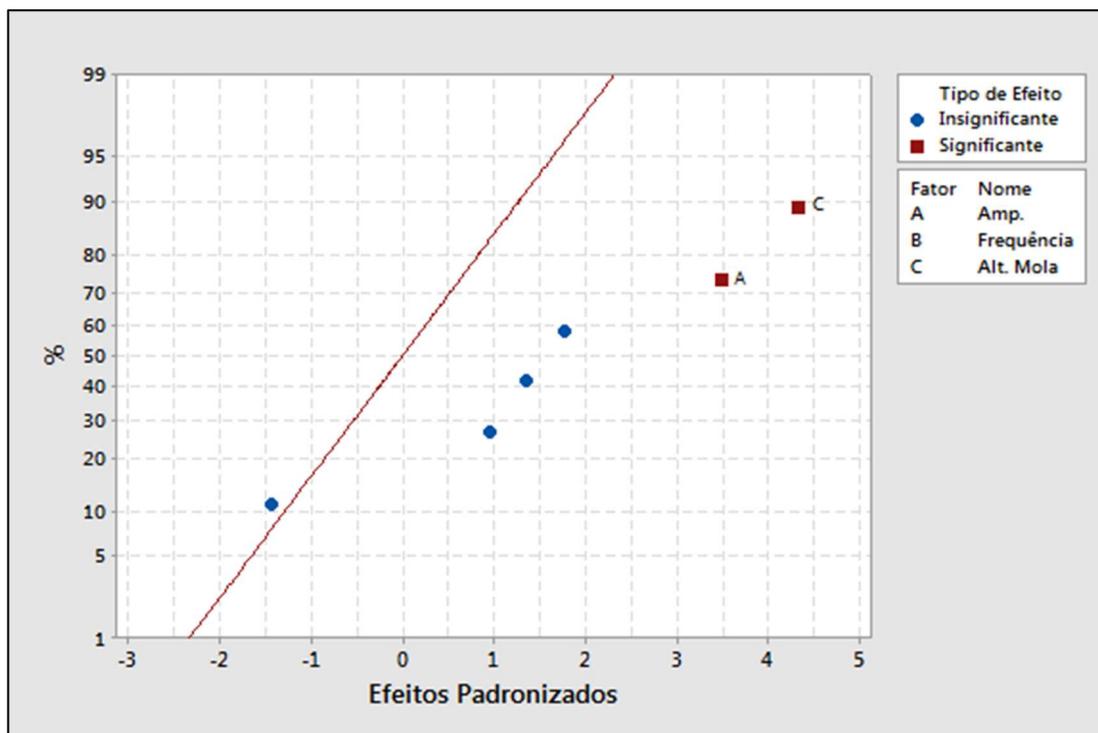


Figura 79 - Gráfico de Normalidade para os Efeitos.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 79, os fatores significantes encontram-se deslocados em relação a linha normal, portanto são os fatores influentes no desgaste e destacados com a legenda C e A.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do flange (média) da Tabela 16, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos efeitos principais, conforme Figura 80.

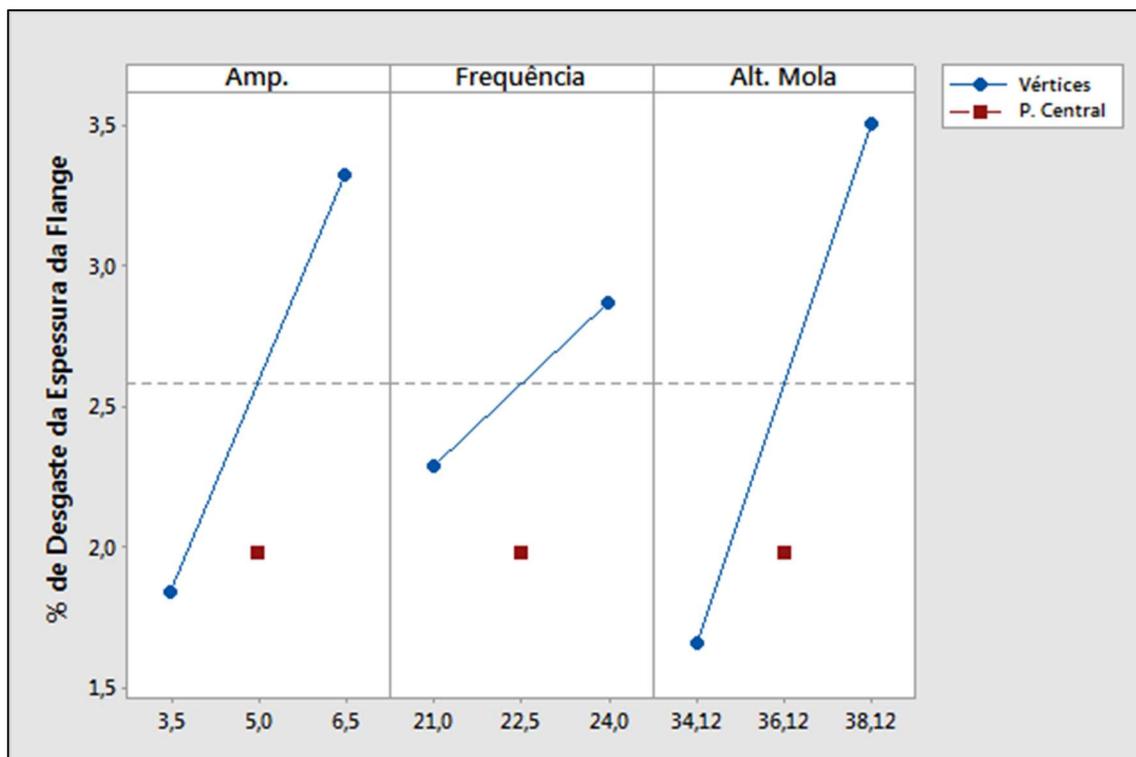


Figura 80 - Gráfico dos Efeitos Principais
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 80, percebe-se que os fatores principais Amplitude e Altura da Mola possui uma angularidade linear maior, assim potencializando ou acentuando o desgaste de acordo com os vértices de máxima e de mínima. Nessa variável de resposta de saída a frequência não foi determinante para o % de desgaste da flange e percebe-se uma angularidade menor da reta, assim mostrando menor influência no desgaste.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do flange (média) da Tabela 16, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de interação entre os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figura 81.

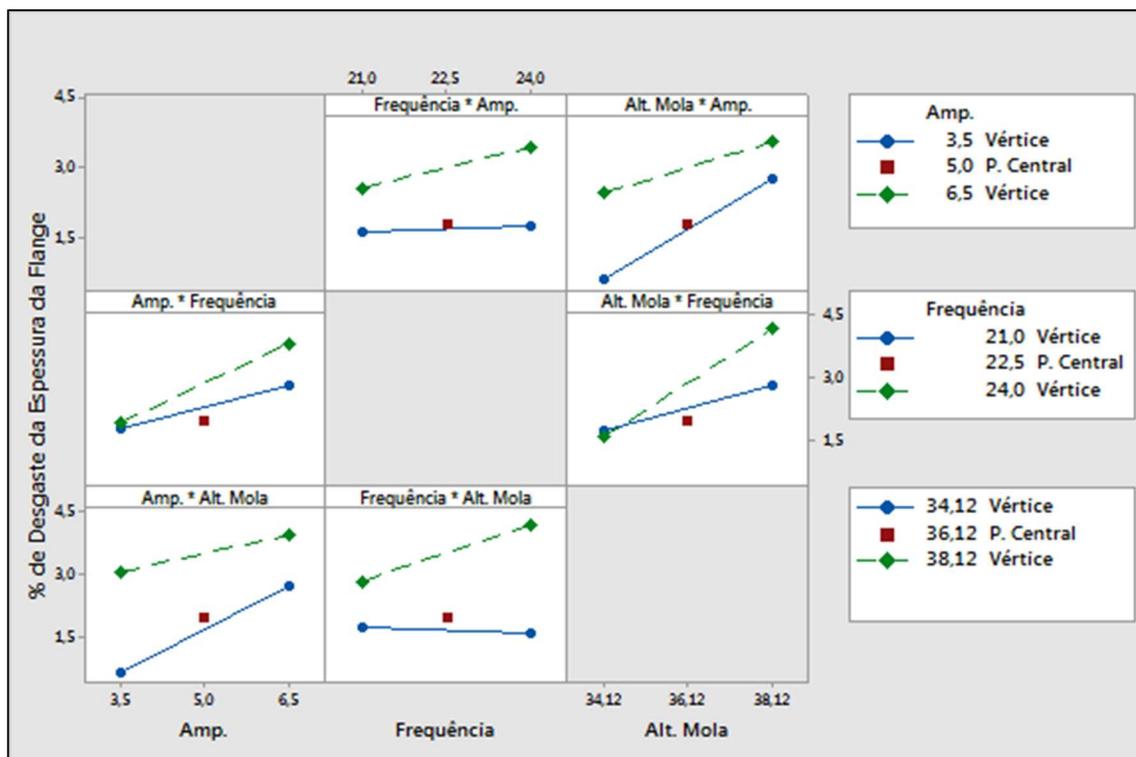


Figura 81 - Gráfico de interação entre os fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 81, tem-se uma interação entre os fatores Altura da Mola x Frequência, na vértice de mínima da mola percebe-se que a frequência de 21Hz e 24Hz interagem e o desgaste é atenuado em ambas as frequências, porém quando deslocado para a vértice de máxima da altura da mola, a frequência de 24Hz acentua o desgaste mostrando um comportamento diferente da vértice de 21Hz.

Baseado na 1ª repetição e 2ª repetição da Tabela 16, na Tabela 18 foram avaliados quais desvios padrão dos fatores são significantes para a variável de resposta do % de desgaste através da espessura do flange.

Tabela 18 - Análise de variância (ANOVA) do desvio padrão do planejamento de experimento do % de desgaste do flange

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	1,74963	1,74963	3,5	0,158
Frequência	1	1,87719	1,87719	3,75	0,148
Alt. Mola	1	0,54818	0,54818	1,1	0,372
Amplitude*Frequência	1	2,84288	2,84288	5,68	0,097
Amplitude*Alt. Mola	1	0,04584	0,04584	0,09	0,782
Frequência*Alt. Mola	1	0,11771	0,11771	0,24	0,661
Curvatura	1	0,2173	0,2173	0,43	0,557
Falta de Ajuste	1	1,38366	1,38366	23,53	0,040
Erro Puro	2	0,1176	0,0588		
Total	10	8,89999			

Fonte: Autor (2018)

Baseado na Tabela 18 gerado pelo *software* Minitab®, constatasse que nenhum dos fatores foram significativos, porém um ponto observado é que a falta de ajuste ficou com um P-valor um pouco <de 0,05, porém como um fator de 2º ordem encontra-se com o resultado próximo do P-valor, sugeriu-se uma simplificação do modelo para a correção da falta de ajuste, conforme Tabela 19 gerada pelo *software* Minitab®.

Tabela 19 - Análise de variância (ANOVA) do desvio padrão do planejamento de experimento do % de desgaste do flange após simplificação do modelo

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	1,7496	1,74963	5,04	0,060
Frequência	1	1,8772	1,87719	5,41	0,053
Amplitude*Frequência	1	2,8429	2,84288	8,19	0,024
Curvatura	1	0,2173	0,2173	0,59	0,472
Falta de Ajuste	4	2,0954	0,52385	8,91	0,103
Erro Puro	2	0,1176	0,0588		
Total	10	8,90000			

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 19, pode-se verificar que a falta de ajuste encontra-se com o P-valor >0,05, assim validando o ajuste do modelo, porém na simplificação do modelo de regressão dos efeitos dos fatores deve-se considerar os desvios padrão de cada fator proposto no modelo simplificado da tabela 19. Para uma melhor entendimento dos resultados será mostrado o gráfico de normalidade para a verificação de quais

fatores afetam a resposta, e após isso será mostrado o gráfico dos efeitos principais dos fatores e de interação entre eles, conforme Figuras 82, 83 e 84.

A Figura 82, representa o gráfico de normalidade para os desvios padrão dos efeitos dos fatores, todos os valores insignificantes com P-valor $>0,05$ foram 0,158, 0,148, 0,372, 0,097, 0,782, 0,661 da Tabela 18.

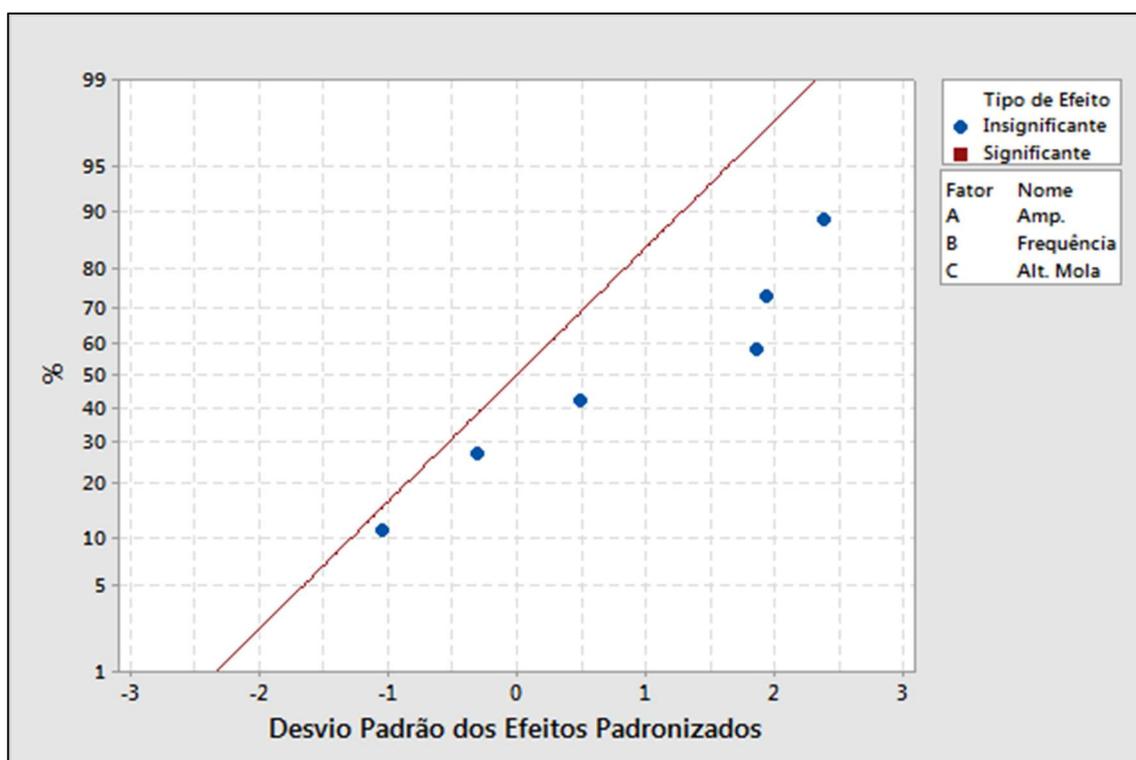


Figura 82 - Gráfico de Normalidade parao Desvio Padrão dos Efeitos.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 82, os desvios padrão dos efeitos dos fatores não foram significantes e encontram-se próximos a linha normal, porém conforme tabela 18, a falta de ajuste mostrou-se significativa portanto não podendo validar o modelo, para isso foi proposto a simplificação do modelo assim validando a falta de ajuste com o P-valor $>0,05$.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do flange 1ª repetição e 2ª repetição da Tabela 16 foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos desvios padrão dos efeitos principais, conforme Figura 83.

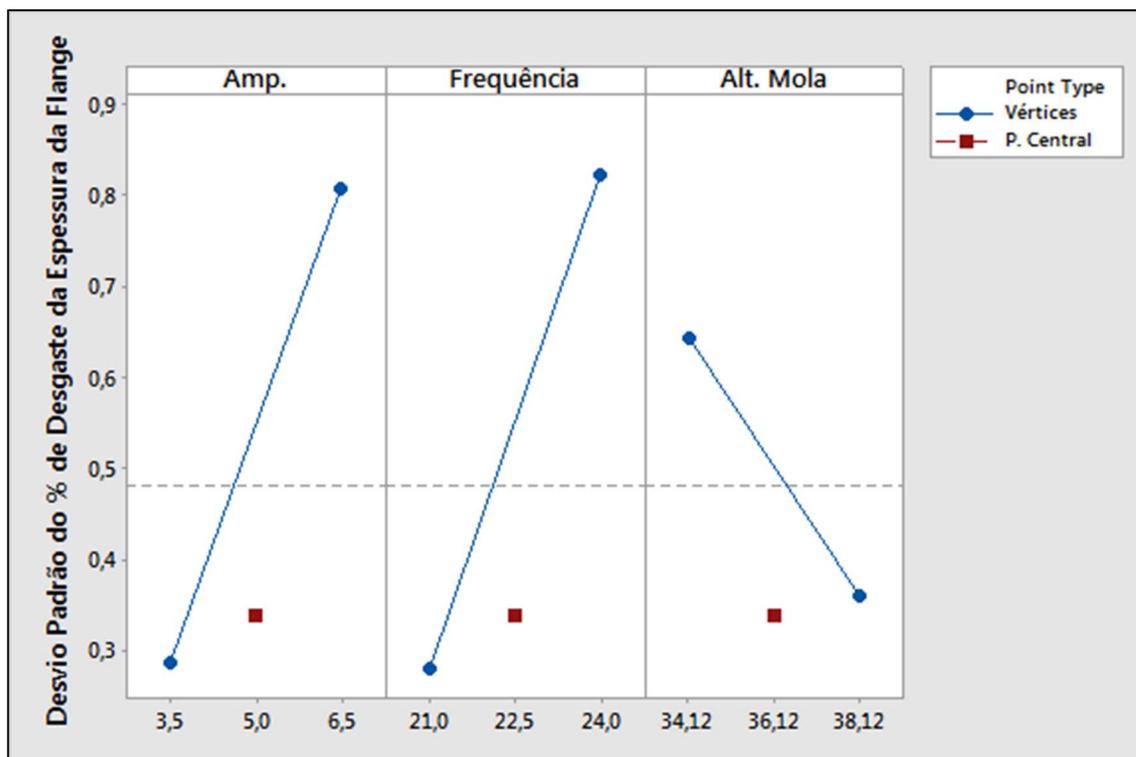


Figura 83 - Gráfico do Desvio Padrão dos Efeitos Principais
 Fonte: Autor (2018)

Na Figura 83, percebe-se que quanto desloca-se para as vértices de máxima da amplitude e frequência de trabalho, respectivamente 6,5mm e 24Hz, maior é o percentual do desvio padrão dos efeitos para espessura do flange da bucha, ocorrendo um comportamento oposto o fator altura da mola, onde, o desvio padrão diminui na vértice de máxima da altura da mola.

Baseado nos resultados da 1ª repetição e 2ª repetição % de desgaste da espessura do flange da bucha da Tabela 16, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de interação entre os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figura 84.

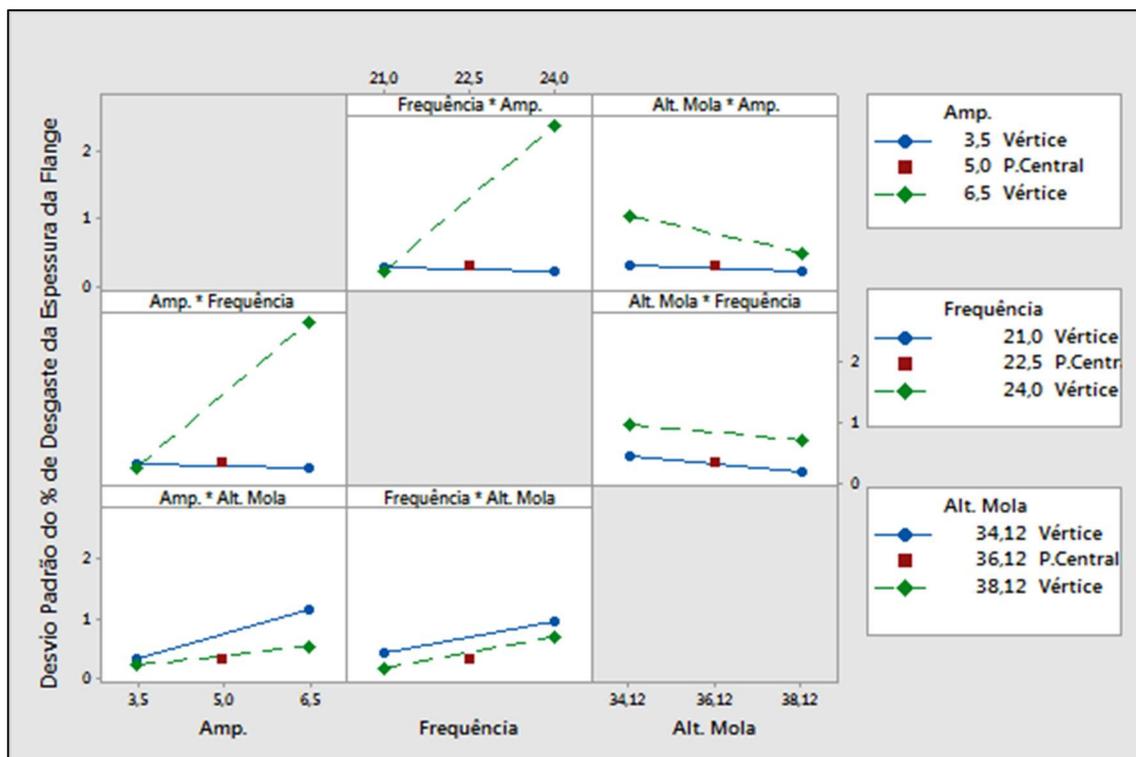


Figura 84 - Gráfico de Interação entre os desvios padrão do efeito dos fatores Amplitude, Frequência e Altura de Mola.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 84, pode-se observar que o desvios padrão para os fatores amplitude e frequência potencializam-se nas vértices de máxima 6,5mm e 24Hz respectivamente, já para o fator altura da mola em relação as vértices dos fatores amplitude e frequência quando deslocado para o vértice de máxima ocorre uma atenuação do desvio padrão.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do flange da bucha (média) da Tabela 16, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos efeitos fatoriais ponto central com seus respectivos resultados, conforme Figura 85.

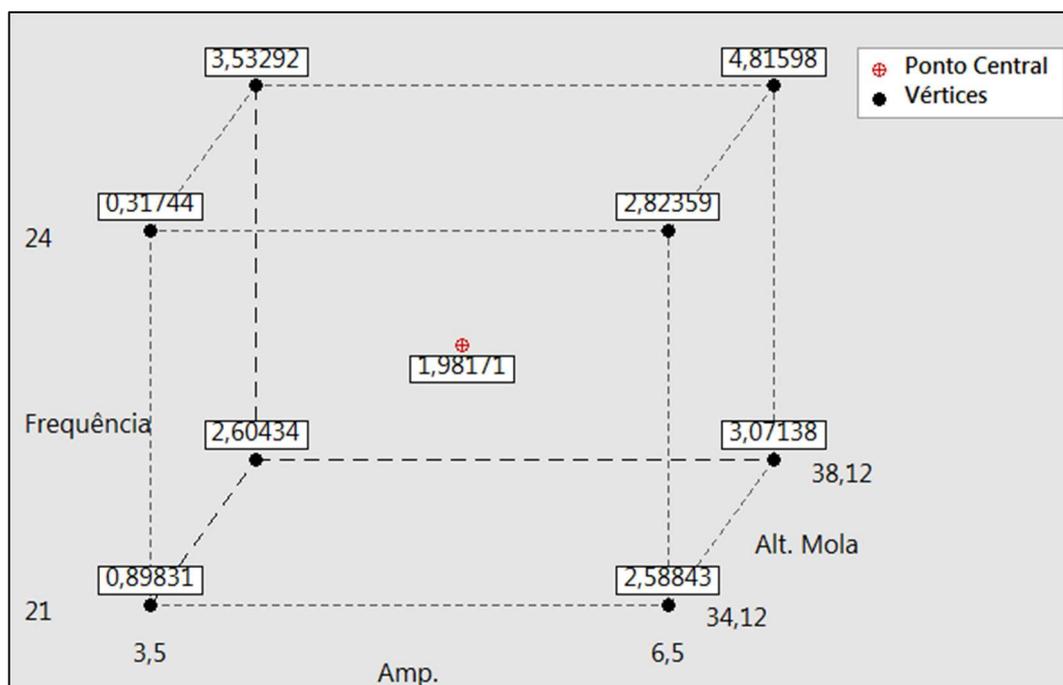


Figura 85 - Representação Gráfica dos Efeitos Fatoriais e Ponto Central com seus respectivos resultados.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 85, é possível verificar os resultados do % de desgaste médio da espessura do flange da bucha da Tabela 16 para todas as vértices e ponto central para cada fator. Percebe-se a potencialização do desgaste de 4,81% nas vértices de máxima de todos os fatores.

Baseado nos resultados % de desgaste médio da espessura do flange da bucha da Tabela 16, foi gerado no *software* Minitab® os gráficos de curva de nível para os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figuras 86, 87 e 88.

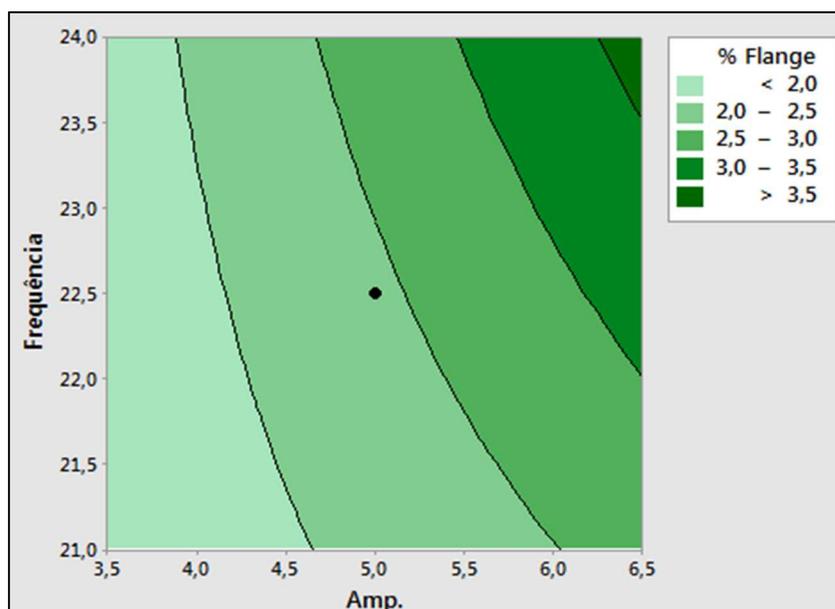


Figura 86 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste da espessura do flange em relação aos Fatores Frequência e Amplitude.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 86, pode-se verificar que o percentual de desgaste aumenta conforme desloca-se para os valores de máxima da amplitude e frequência.

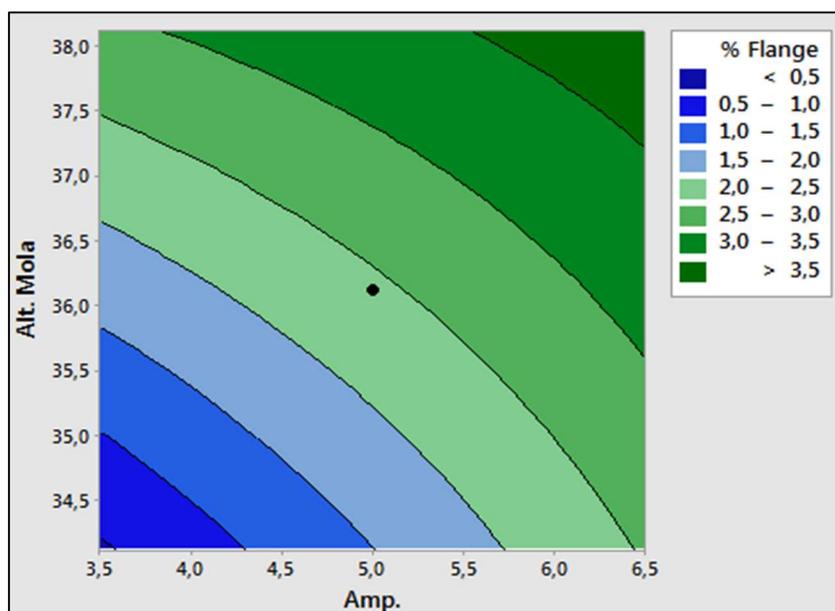


Figura 87 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste da espessura do flange em relação aos Fatores Altura da Mola e Amplitude.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 87, pode-se verificar que o percentual de desgaste acentua conforme desloca-se para os valores de máxima da vértice de cada fator.

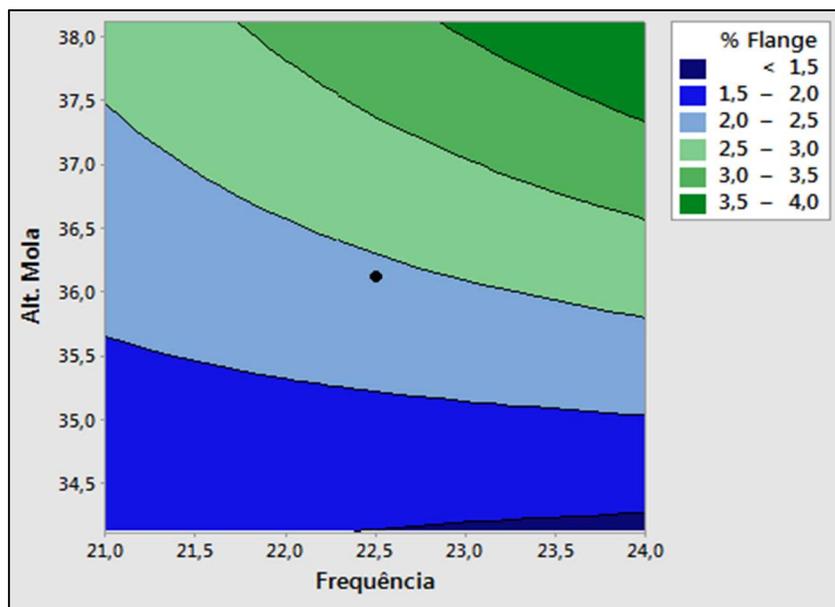


Figura 88 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste da espessura do flange em relação aos Fatores Altura da Mola e Frequência.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 88, quando o fator altura da mola interage com a frequência, o maior influência do desgaste ocorre devido a mudança de altura da mola e a frequência tem uma maior influência quando está interagindo com o vértice de máxima da altura da mola, como pode-se verificar ocorre uma mudança na inclinação da curva.

4.2.1 Modelo de Regressão para % de Desgaste do Flange da Bucha

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da espessura do flange da bucha da Tabela 16, na Tabela 20 gerada pelo *software* Minitab® foram avaliados quais fatores são significantes para o modelo de regressão.

Tabela 20 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão para o % de desgaste da espessura do flange da bucha.

Variável Independente	Estimativa do Efeito	Estimativa do Coeficiente	Erro Padrão do Coeficiente	t para Ho Coeficiente =0	P-valor
Constante		2,582	0,213	12,12	0,001
Amplitude	1,487	0,743	0,213	3,49	0,040
Frequência	0,582	0,291	0,213	1,37	0,265
Alt. Mola	1,849	0,925	0,213	4,34	0,023
Amplitude*Frequência	0,408	0,204	0,213	0,96	0,409
Amplitude*Alt. Mola	-0,612	-0,306	0,213	-1,44	0,247
Frequência*Alt. Mola	0,755	0,377	0,213	1,77	0,175
Ponto Central		-0,6	0,408	-1,47	0,238

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 20, devido ao ponto central não apresentar significância estatística e a constante apresentar-se significante pode-se apresentar a seguinte equação.

Equação 26:

$$\% \text{ Flange} = 72,9 + 2,14 \cdot \text{Amp} - 4,80 \cdot \text{Frequência} - 1,86 \cdot \text{AltMola} + 0,091 \cdot \text{Amp} \cdot \text{Frequência} - 0,1019 \cdot \text{Amp} \cdot \text{AltMola} + 0,1258 \cdot \text{Frequência} \cdot \text{AltMola}$$

Os fatores com os P-valores <0,05 somente significativos são Amplitude e Altura da Mola, porém conforme explicitado na Tabela 19 Anova para o desvios padrão dos efeitos dos fatores, o modelo somente ofereceu ajuste quando adicionado dois fatores, um fator de 1ª ordem frequência e outro de 2ª ordem amplitude x frequência, portanto pode-se propor um modelo de regressão mais simplificado abaixo (Equação 27):

Equação 27:

$$\% \text{ Flange} = -10,9 - 1,54 \cdot \text{Amp} - 0,259 \cdot \text{Frequência} + 0,462 \cdot \text{AltMola} + 0,091 \cdot \text{Amp} \cdot \text{Frequência}$$

Baseado nos resultados de P-valor da Tabela 20, na Tabela 21 gerado pelo *software* Minitab® avaliou-se a significância de cada fator após a simplificação do modelo de regressão.

Tabela 21 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão simplificado para o % de desgaste da espessura do flange

Fatores	Estimativa do Efeito	Estimativa do Coeficiente	Erro Padrão do Coeficiente	t para Ho Coeficiente =0	P-valor
Constante		2,418	0,239	10,13	0
Amplitude	1,487	0,743	0,28	2,66	0,038
Frequência	0,582	0,291	0,28	1,04	0,339
Altura da Mola	1,849	0,925	0,28	3,3	0,016
Amplitude*Frequência	0,408	0,204	0,28	0,73	0,494

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 21, os valores significantes continuaram sendo a amplitude e a altura da mola, porém o desvio padrão do fator de segunda ordem amplitude x frequência é significativo para o modelo. Devido a isso, manteve-se esses fatores no modelo de regressão simplificado conforme proposto na Equação 27.

Na Tabela 22 gerado pelo *software* Minitab®, mostra o nível de confiabilidade do modelo de regressão. O modelo proposto é capaz de explicar 76,5% da variabilidade dos dados:

Tabela 22 - Estatística da Regressão

Estatística de Regressão	
R-Quadrado	76,54%
R-Quadrado ajustado	60,90%

Fonte: Autor (2018)

4.2.2 Análise residual do modelo

Baseado nos resultados da Tabela 16 % médio de desgaste da espessura do flange da bucha, foram gerados os resíduos para o modelo simplificado com os fatores Amplitude, Frequência, Altura da Mola e Amplitude x Frequência, conforme Tabela 23.

Tabela 23 - Resíduos do Modelo do % de Desgaste da Espessura do Flange

Amostra	Resíduos
1	-1,457
2	0,091
3	-1,400
4	-0,192
5	-0,652
6	0,838
7	1,298
8	-0,489
9	2,046
10	0,213
11	0,556

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resíduos da Tabela 23, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, conforme Figura 89.

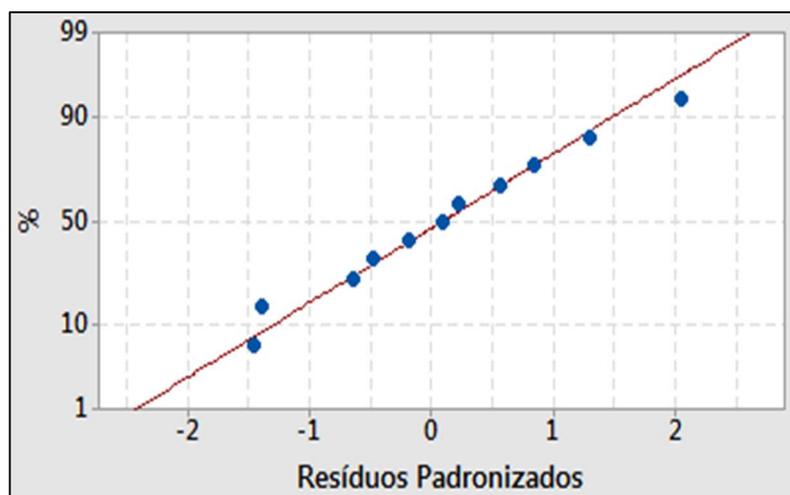


Figura 89 - Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 89, exibe-se um gráfico de probabilidade normal dos resíduos padronizados. Uma vez que os resíduos estão aproximadamente ao longo de uma linha reta os dados mostram um comportamento normal.

Baseado nos resíduos da Tabela 23 foram gerados no *software* Minitab® o gráfico dos resíduos padronizados e diagrama de caixa do teste de hipótese-T, conforme Figuras 90, 91 e 92.

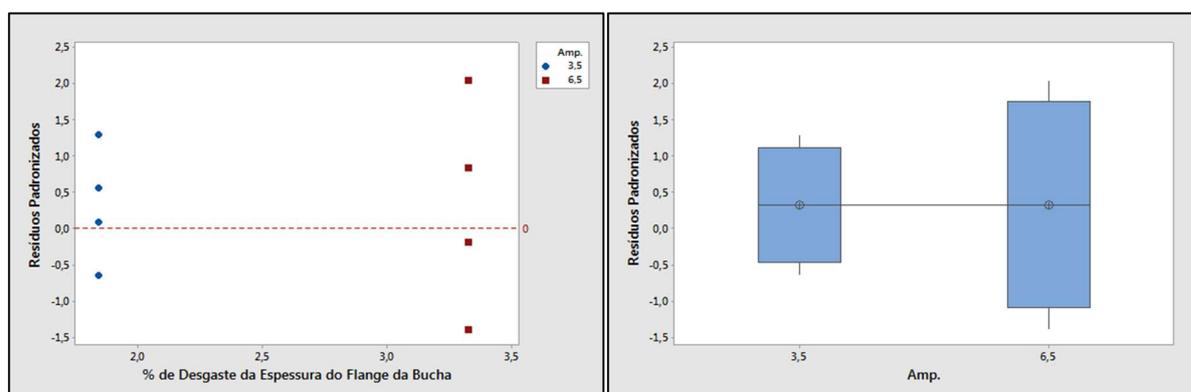


Figura 90 - Gráfico dos resíduos padronizados versus amplitude e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator amplitude.
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 90, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator Amplitude para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 24 pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 3,5mm e 6,5mm são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 3,5mm e 6,5mm são diferentes. Nesse caso

validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as amplitudes 3.50mm e 6.50mm são estatisticamente iguais.

Tabela 24 - P-valor do teste de hipótese - T

Teste Estatístico - T	
P-valor	1,000
H_0	$RES_{3,5} = RES_{6,5}$
H_1	$RES_{3,5} \neq RES_{6,5}$

Fonte: Autor (2018)

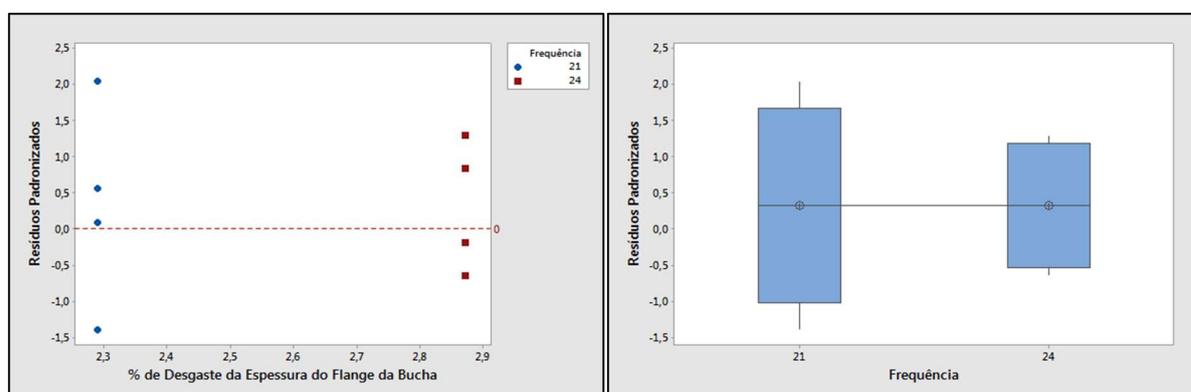


Figura 91 - Gráfico dos resíduos padronizados versus frequência e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator frequência
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 91, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator frequência para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 25, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 21Hz e 24Hz são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 21Hz e 24Hz são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as frequências 21Hz e 24Hz são estatisticamente iguais.

Tabela 25 - P-valor do teste de hipótese – T

 Teste Estatístico - T

P-valor	1,000
---------	-------

H_0	RES21 = RES24
-------	---------------

H_1	RES21 \neq RES24
-------	--------------------

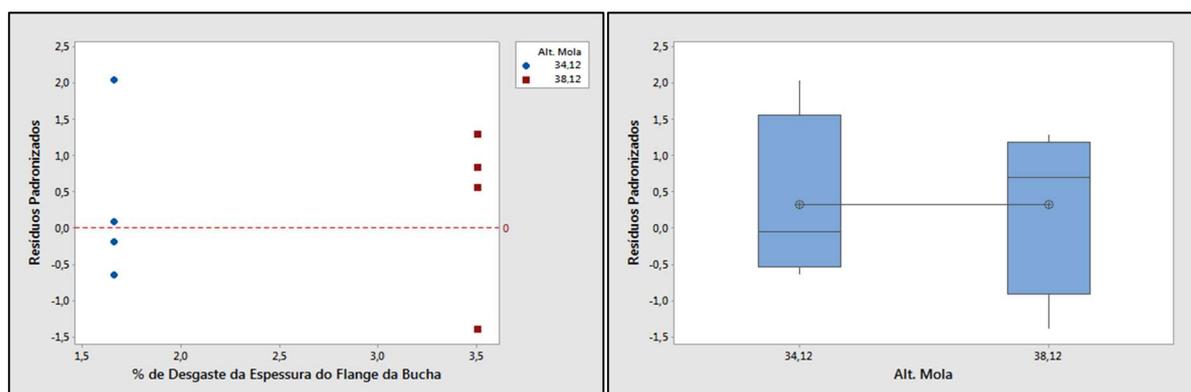
 Fonte: Autor (2018)


Figura 92 - Gráfico dos resíduos padronizados versus altura da mola e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator altura da mola.

Fonte: Autor, 2018

Na Figura 92, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator Altura da Mola para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 26, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 34,12mm e 38,12 são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 34,12mm e 38,12mm são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as alturas de mola 34,12mm e 38,12mm são estatisticamente iguais.

Tabela 26 - P-valor do teste de hipótese – T

 Teste Estatístico - T

P-valor	1,000
---------	-------

H_0	RES34,12 = RES38,12
-------	---------------------

H_1	RES34,12 \neq RES38,12
-------	--------------------------

 Fonte: Autor, 2018

4.2.3 Otimização da Resposta

Para otimização da resposta os dados gerados no *software* Minitab® na Tabela 27, foi utilizado a função de conveniência para encontrar o nível ideal dos fatores significantes, para minimização do % desgaste da espessura da flange da bucha e minimização do desvio padrão. As 3 soluções com um valor próximo de 1, ou seja, essas soluções apresentam atenuação do desgaste.

Tabela 27 - Níveis do fator para otimização da resposta com relação à minimização do desgaste da bucha pela espessura do flange

Otimização da Resposta					
Solução da Resposta	Níveis de cada fator			Função de Conveniência	% de Desgaste Previsto
	Amplitude	Frequência	Alt. Mola		
1	3,5	21	34,12	0,951508	0,6631
2	3,5	24	34,12	0,942077	0,8370
3	3,5	24	34,15	0,940365	0,8521

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resultados da Tabela 27, foi gerado no *software* Design Expert versão 6.0.6, o gráfico de superfície de resposta, conforme Figura 93.

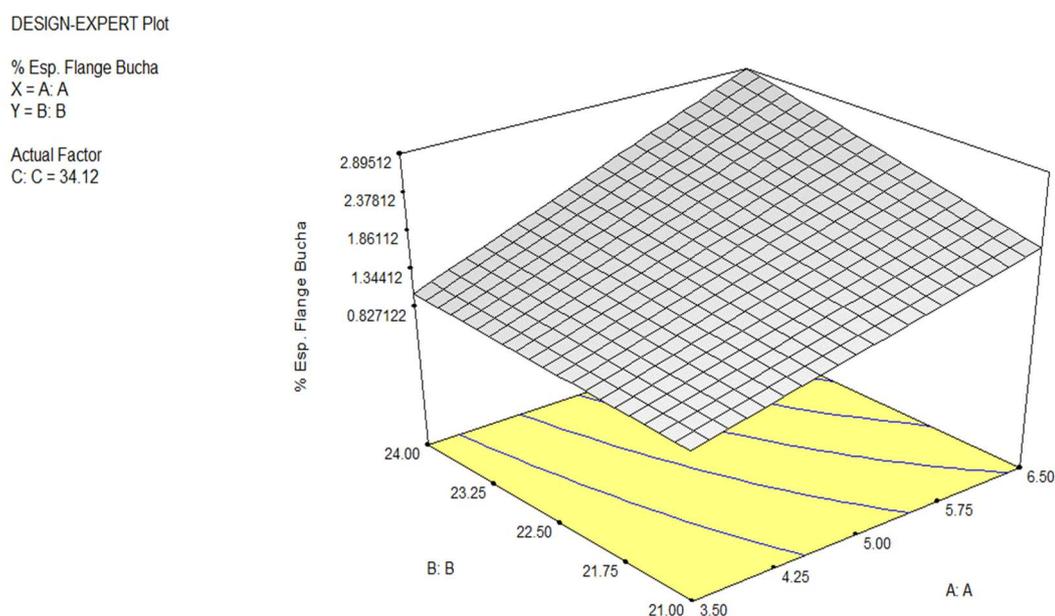


Figura 93 – Gráfico de superfície da otimização da resposta

Fonte: Autor (2018)

Na Figura 93, definido a variável dependente A:A como a amplitude e a variável dependente B:B como frequência e fixando a altura da mola com o valor de ponto

central 34,12mm. É possível verificar que o desgaste por % de espessura da flange é atenuado conforme deslocasse para os níveis de mínima dos fatores amplitude e frequência.

4.3 Percentual de Desgaste da Bucha em Relação ao Corpo

4.3.1 Análise dos efeitos dos fatores

Na Tabela 28, são os resultados provenientes da variável de saída % de desgaste da bucha em relação a espessura do corpo, são mostrados a ordem da corrida, os níveis de cada fator, os valores de cada repetição e a média das repetições de cada corrida.

Tabela 28 - Percentual da taxa desgaste da bucha em relação à espessura do corpo da bucha

Ordem Padrão	Ordem da corrida	Amplitude (mm)	Frequência (Hz)	Altura da Mola (mm)	% de Desgaste Corpo 1° Repetição	% de Desgaste Corpo 2° Repetição	% de Desgaste Corpo (Média)
11	1	5	22,5	36,12	0,812	3,144	1,978
1	2	3,5	21	34,12	0,909	0,811	0,860
4	3	6,5	21	38,12	1,923	1,731	1,827
6	4	6,5	24	34,12	2,132	4,141	3,137
5	5	3,5	24	34,12	0,405	0,910	0,657
8	6	6,5	24	38,12	1,816	6,904	4,360
7	7	3,5	24	38,12	0,813	1,118	0,965
10	8	5	22,5	36,12	2,282	2,174	2,228
2	9	6,5	21	34,12	0,404	4,960	2,682
9	10	5	22,5	36,12	3,553	0,810	2,182
3	11	3,5	21	38,12	0,304	0,914	0,609

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da espessura do corpo da Tabela 28, na Tabela 29 foram avaliados quais fatores estão afetando a variável de resposta do percentual de desgaste através da corpo da bucha.

Tabela 29 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento do % de desgaste do corpo da bucha

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	9,9326	9,93258	92,01	0,002
Frequência	1	1,2337	1,23373	11,43	0,043
Alt. Mola	1	0,0226	0,02264	0,21	0,678
Amplitude*Frequência	1	1,0036	1,00356	9,3	0,055
Amplitude*Alt. Mola	1	0,0121	0,01211	0,11	0,760
Frequência*Alt. Mola	1	0,8692	0,86919	8,05	0,066
Curvatura	1	0,1278	0,12778	1,18	0,356
Falta de Ajuste	1	0,2885	0,28852	16,34	0,056
Erro Puro	2	0,0353	0,01766		
Total	10	13,5254			

Fonte: Autor (2018)

Baseado na Tabela 29, gerado pela *software* Minitab®, os fatores de 1ª ordem amplitude e frequência se mostraram significativos para o modelo. A curvatura e a falta de ajuste não se mostraram significativos nesse caso validando o modelo.

A Figura 94, representa o gráfico de normalidade para os efeitos dos fatores, os valores dos fatores significantes foram 0,002, 0,043 e os valores dos fatores insignificantes foram 0,678, 0,055, 0,760 e 0,066 da Tabela 29.

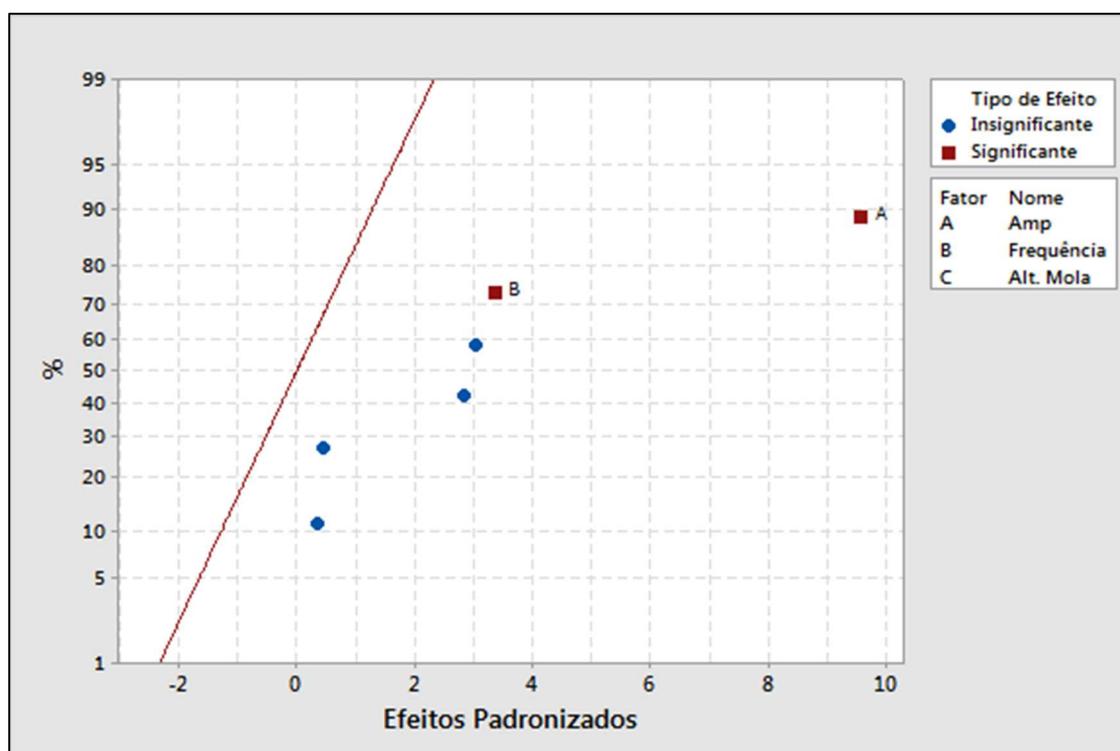


Figura 94 - Gráfico de Normalidade para os efeitos
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 94, os fatores significantes encontram-se deslocados em relação a linha normal, portanto são os fatores influentes no desgaste e destacados com a legenda A e B.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do corpo (média) da Tabela 28, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos efeitos principais, conforme Figura 95.

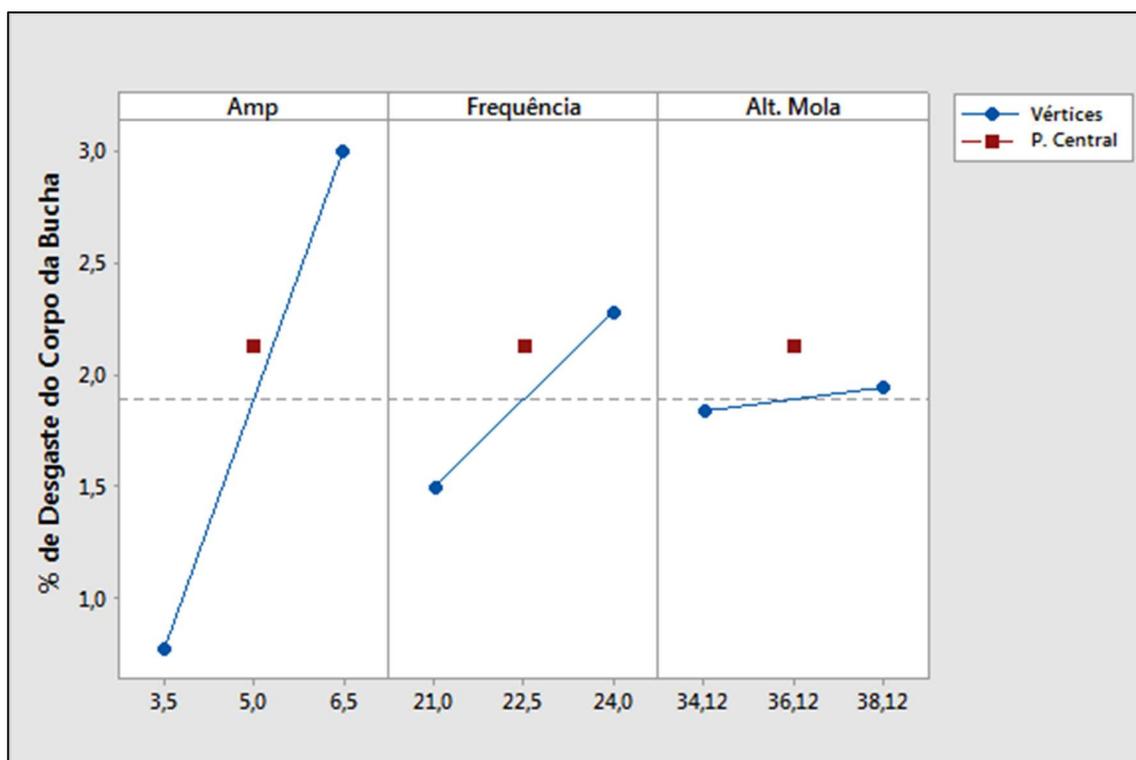


Figura 95 - Gráfico dos Efeitos Principais
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 95, percebe-se que os fatores principais Amplitude e Frequência possui uma angularidade linear maior, assim potencializando ou acentuando o desgaste de acordo com os vértices de máxima e de mínima. O fator altura da mola nessa variável de resposta de saída não foi determinante para o % de desgaste da corpo e percebe-se uma angularidade menor da reta, assim mostrando menor influência no desgaste.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do corpo (média) da Tabela 28, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de interação entre os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figura 96.

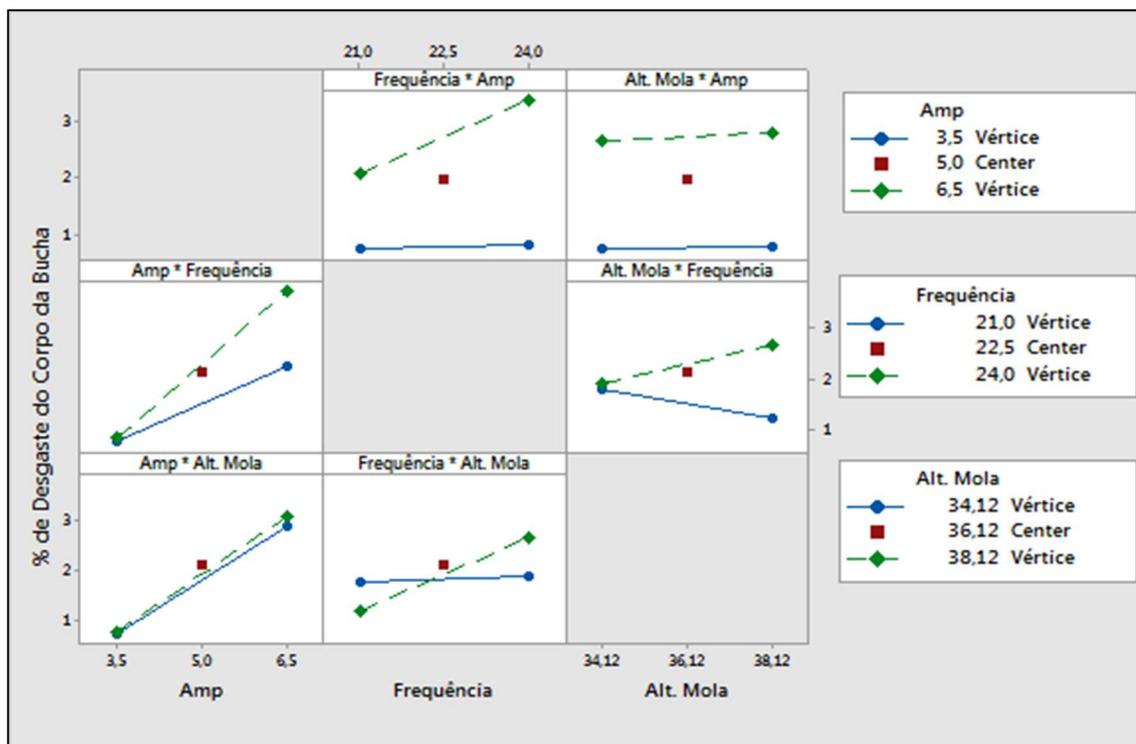


Figura 96 - Gráfico de Interação entre os fatores Amplitude, Frequência e Altura da Mola
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 96, percebe-se que no fator amplitude e frequência potencializam o regime do desgaste no corpo da bucha, ocorreu uma interação com relação ao fator de 2ª ordem frequência x altura da mola onde a frequência na vértice de mínima 21Hz com a vértice de máxima da altura da mola minimiza-se o desgaste.

Baseado na 1ª repetição e 2ª repetição da Tabela 28, na Tabela 30 foram avaliados quais desvios padrão dos fatores são significantes para a variável de resposta do % de desgaste através da espessura do corpo da bucha.

Tabela 30 - Análise de variância (ANOVA) para o desvio padrão do planejamento de experimento do % de desgaste do corpo da bucha

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	4,7865	4,78653	1,5	0,308
Frequência	1	1,1717	1,17173	0,37	0,587
Alt. Mola	1	0,086	0,08596	0,03	0,880
Amplitude*Frequência	1	0,2333	0,2333	0,07	0,804
Amplitude*Alt. Mola	1	1,2805	1,28054	0,4	0,571
Frequência*Alt. Mola	1	0,317	0,31704	0,1	0,773
Curvatura	1	0,0628	0,06283	0,02	0,897
Falta de Ajuste	1	4,1796	4,17962	1,55	0,339
Resíduo	2	5,3838	2,69188		
Total	10	17,5012			

Fonte: Autor, 2018

Baseado na Tabela 30, gerado pelo *software* Minitab®, pode-se constatar que não houveram fatores significativos com relação ao desvio padrão dos efeitos.

A Figura 97, gerado pelo *software* Minitab®, representa o gráfico de normalidade para os desvios padrão dos efeitos dos fatores, todos os valores insignificantes com P-valor $>0,05$ foram 0,308, 0,587, 0,880, 0,804, 0,571, 0,773 da Tabela 30.

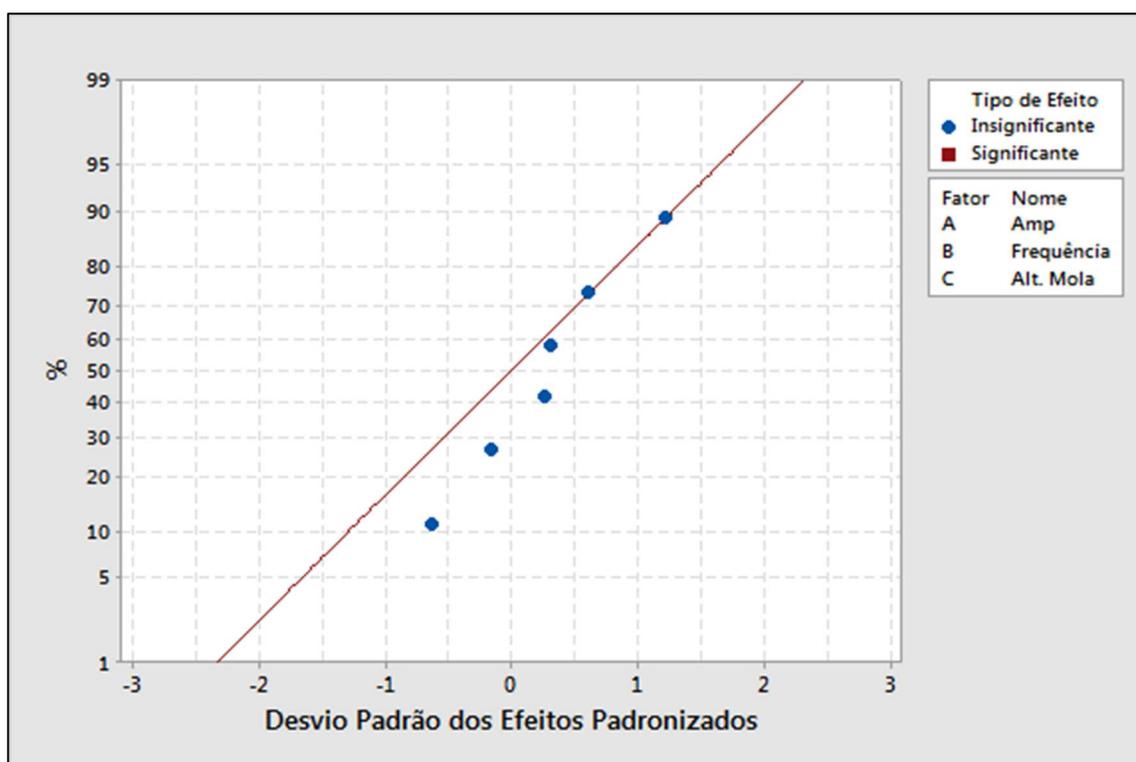


Figura 97 - Gráfico de Normalidade para os Desvios Padrão dos efeitos
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 97, os desvios padrão dos efeitos dos fatores não foram significantes e encontram-se próximos a linha normal.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do corpo da 1ª repetição e 2ª repetição da Tabela 28 foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos desvios padrão dos efeitos principais, conforme Figura 98.

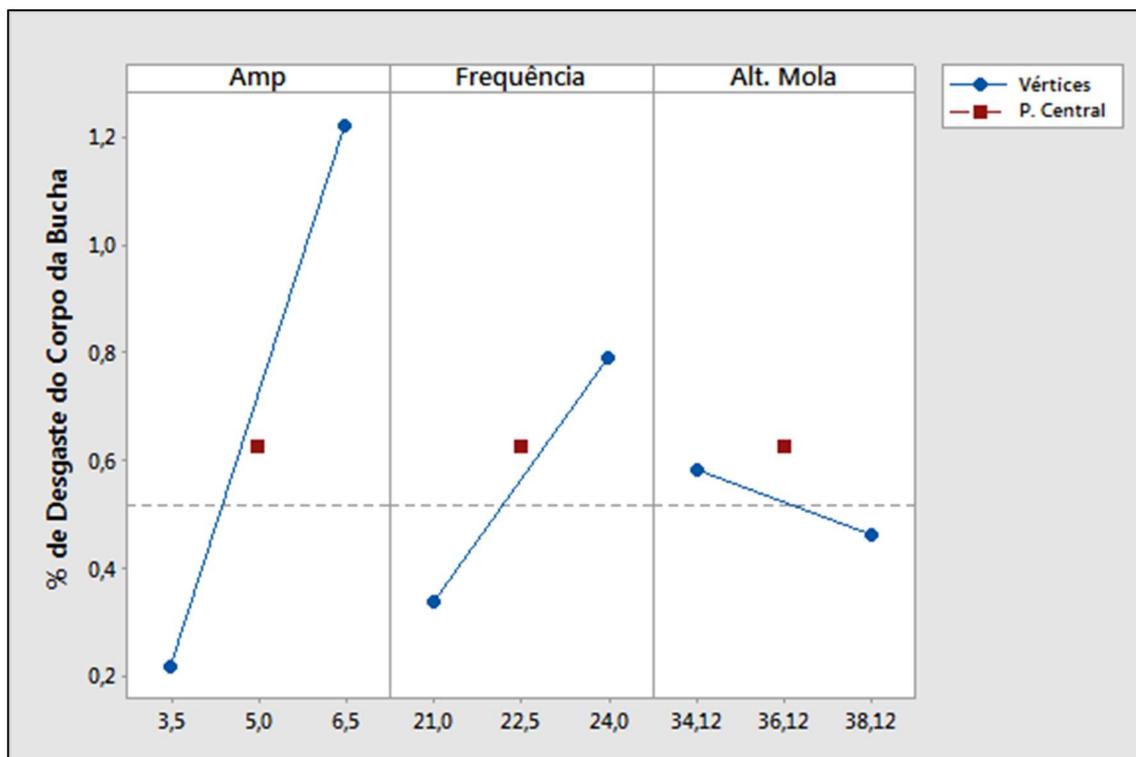


Figura 98 - Gráfico do Desvio Padrão dos Efeitos Principais
 Fonte: Autor (2018)

Na Figura 98, percebe-se que quanto desloca-se para as vértices de máxima da amplitude e freqüência de trabalho, respectivamente 6,5mm e 24Hz, maior é o percentual do desvio padrão dos efeitos para espessura do corpo da bucha, ocorrendo um comportamento oposto o fator altura da mola, onde, o desvio padrão diminui na vértice de máxima da altura da mola, mas não sendo significativo.

Baseado nos resultados da 1ª repetição e 2ª repetição % de desgaste do corpo da bucha da Tabela 28, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de interação entre os desvios padrão dos efeitos dos fatores amplitude, freqüência e altura da mola, conforme Figura 99.

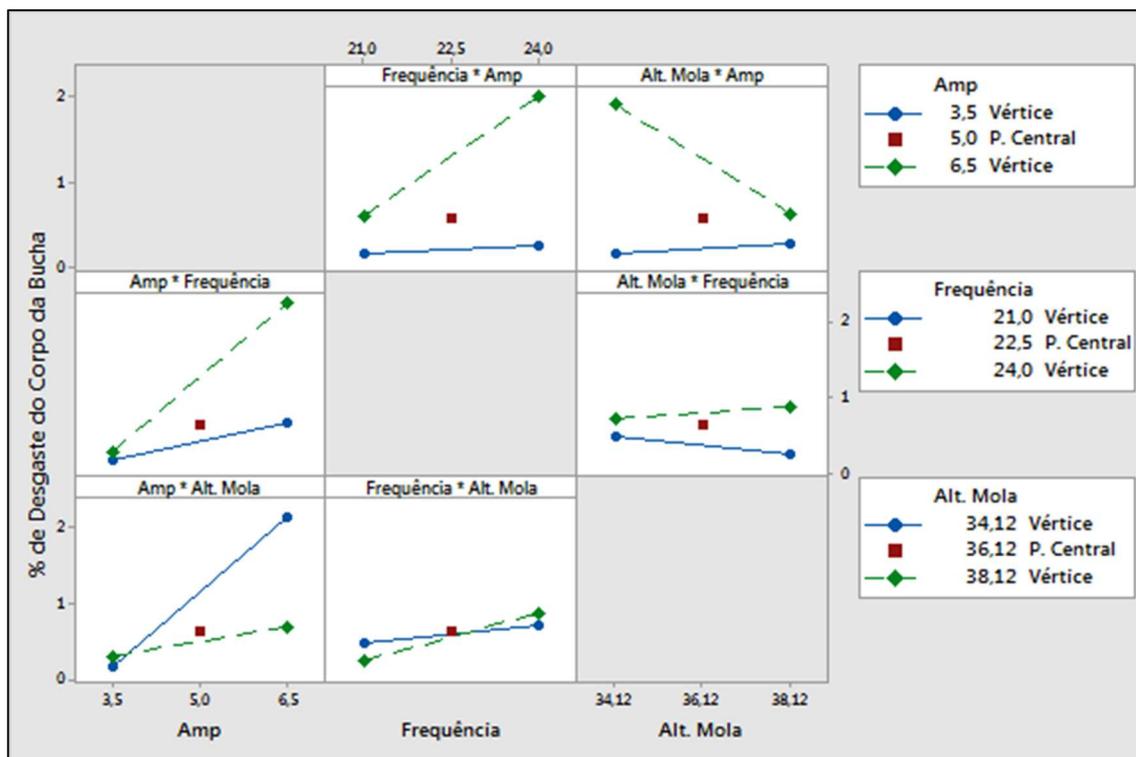


Figura 99 - Gráfico de Interação do efeito dos desvios padrão para os fatores Amplitude, Frequência e Altura da Mola
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 99, pode-se observar que os fatores amplitude e frequência são potencializados no vértice de máxima quando trabalham entre si. Quando verifica-se o fator altura da mola interagindo com amplitude o desgaste é potencializado no vértice de mínima da altura da mola com a vértice da amplitude na máxima.

Baseado nos resultados do % de desgaste da espessura do corpo da bucha (média) da Tabela 28, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico dos efeitos fatoriais ponto central com seus respectivos resultados, conforme Figura 100.

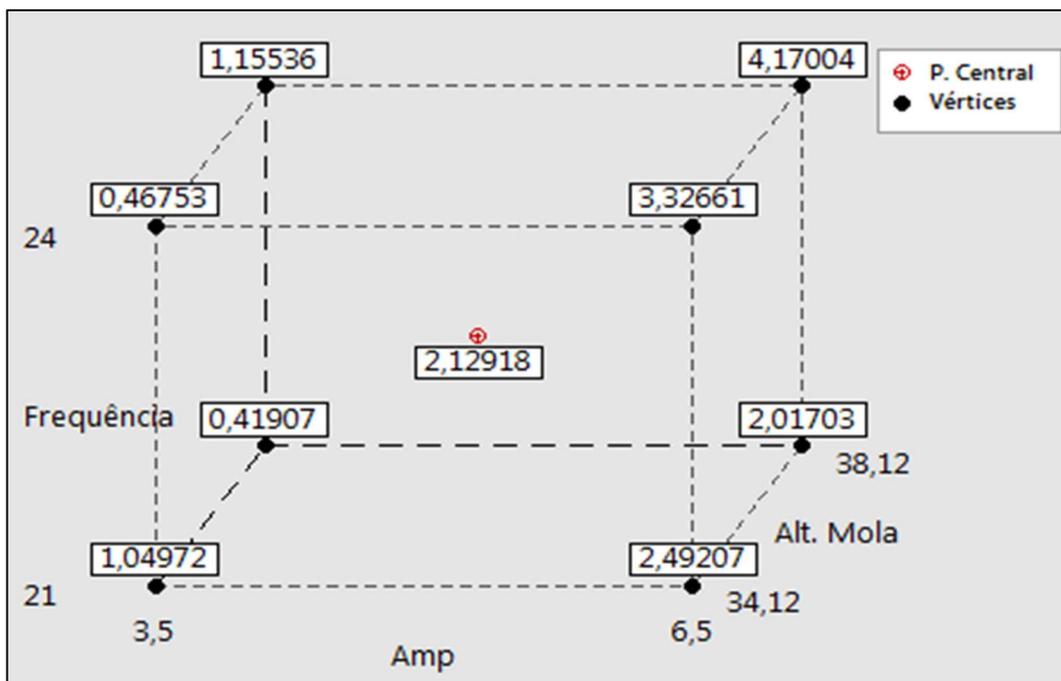


Figura 100 - Representação gráfica dos efeitos fatoriais e ponto central com seus respectivos resultados
 Fonte: Autor (2018)

Na Figura 100, é possível verificar os resultados do % de desgaste médio da espessura do corpo da bucha da Tabela 28 para todas as vértices e ponto central para cada fator. Percebe-se a potencialização do desgaste de 4,17% nas vértices de máxima de todos os fatores, porém como o fator altura da mola não é significativa quando deslocado para o vértice de mínima da altura da mola o resultado de desgaste encontra-se próximo do vértice de máxima da altura da mola.

Baseado nos resultados % de desgaste médio da espessura do corpo da bucha da Tabela 28, foi gerado no *software* Minitab® os gráficos de curva de nível para os fatores amplitude, frequência e altura da mola, conforme Figuras 101, 102 e 103.

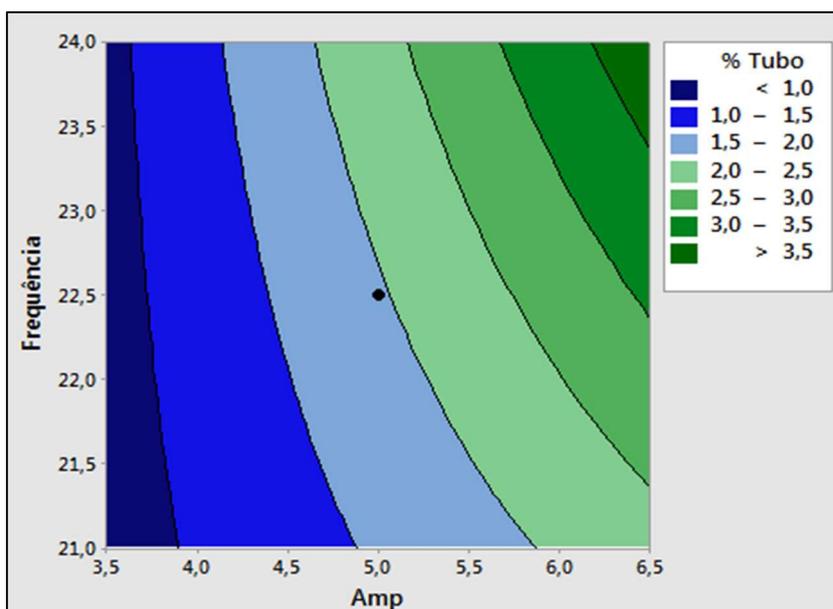


Figura 101 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste espessura do corpo da bucha em relação aos fatores Frequência e Amplitude
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 101, pode-se verificar que o percentual de desgaste aumenta conforme desloca-se para os valores de máxima da amplitude e frequência.

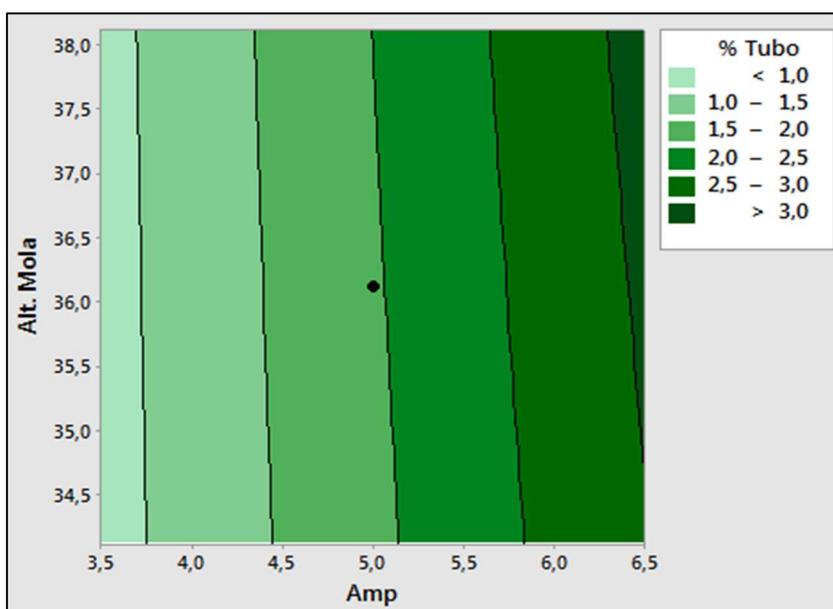


Figura 102 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste espessura do corpo da bucha em relação aos fatores Altura da Mola e Amplitude
Fonte: Autor, 2018

Na Figura 102, quando o fator altura da mola interage com a amplitude, o maior influência do desgaste ocorre devido a mudança de amplitude, o fato de alterar a altura da mola não ocorre alteração no percentual de desgaste.

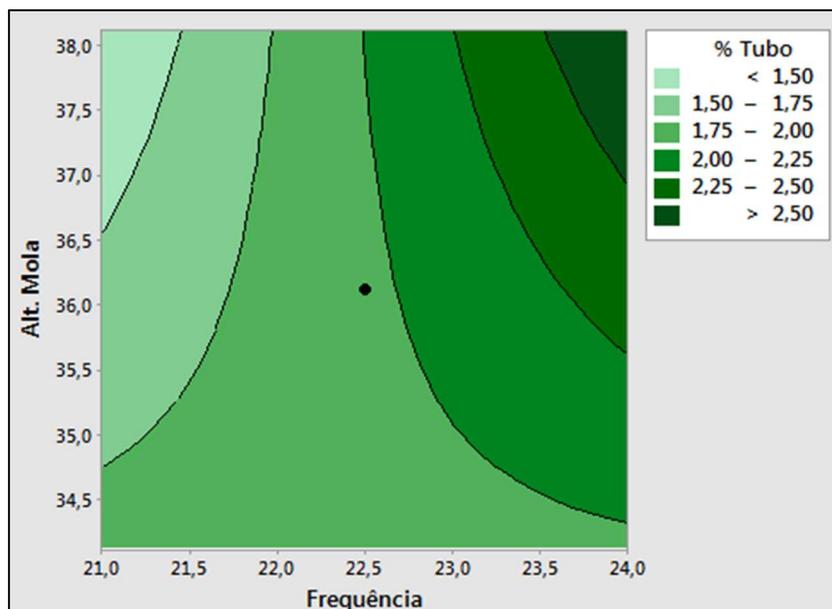


Figura 103 - Gráfico de Curvas de Nível para % de desgaste espessura do corpo da bucha em relação aos fatores Altura da Mola e Frequência
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 103, verifica-se que o fator que mais influenciável para o desgaste é a frequência, porém conforme desloca-se para o vértice de máxima da altura da mola dependendo do valor de frequência pode-se acentuar ou atenuar o desgaste.

4.3.2 Modelo de Regressão para % de desgaste do corpo da bucha

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da espessura do corpo da bucha da Tabela 28, na Tabela 31 gerada pelo *software* Minitab® foram avaliados quais fatores são significantes para o modelo de regressão.

Tabela 31 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão para o % de desgaste da espessura do corpo da bucha

Variável Independente	Estimativa do Efeito	Estimativa do Coeficiente	Erro Padrão do Coeficiente	t para Ho Coeficiente =0	P-valor
Constante		1,887	0,116	16,25	0,001
Amplitude	2,229	1,114	0,116	9,59	0,002
Frequência	0,785	0,393	0,116	3,38	0,043
Alt. Mola	0,106	0,053	0,116	0,46	0,678
Amplitude*Frequência	0,708	0,354	0,116	3,05	0,055
Amplitude*Alt. Mola	0,078	0,039	0,116	0,33	0,760
Frequência*Alt. Mola	0,659	0,33	0,116	2,84	0,066
Ponto Central		0,242	0,222	1,09	0,356

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 31, pode-se observar os fatores significativos foram os fatores principais amplitude e frequência. Segue modelo de regressão com o ponto central

(Equação 28). Devido ao ponto central não apresentar significância estatística pode-se apresentar o modelo de regressão (Equação 29):

Equação 28:

$$\% \text{ corpo} = 100,7 - 3,27 \cdot \text{Amp} - 4,49 \cdot \text{Frequência} - 2,51 \cdot \text{AltMola} + 0,1574 \cdot \text{Amp} \cdot \text{Frequência} + 0,0130 \cdot \text{Amp} \cdot \text{AltMola} + 0,1099 \cdot \text{Frequência} \cdot \text{AltMola} + 0,242 \cdot \text{PCentral}$$

Na simplificação da regressão quando retirado o ponto central percebe-se que um fator de segunda ordem amplitude*frequência torna-se significativo, e a falta de ajuste juntamente da curvatura com o P-valor >0,05 mostra que o modelo é viável (Equação 29):

Equação 29:

$$\% \text{ corpo} = 100,7 - 3,27 \cdot \text{Amp} - 4,49 \cdot \text{Frequência} - 2,51 \cdot \text{AltMola} + 0,1574 \cdot \text{Amp} \cdot \text{Frequência} + 0,0130 \cdot \text{Amp} \cdot \text{AltMola} + 0,1099 \cdot \text{Frequência} \cdot \text{AltMola}$$

Baseado nos resultados do % de desgaste médio da espessura do corpo da bucha da Tabela 28, na Tabela 32 gerada pelo *software* Minitab® foram avaliados quais fatores são significantes para o modelo de regressão sem considerar o ponto central.

Tabela 32 - Análise de variância (ANOVA) para o planejamento de experimento sem ponto central do % de desgaste da espessura do corpo da bucha

Fatores	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média quadrática	F ₀	P-valor
Amplitude	1	9,9326	9,93258	87,97	0,001
Frequência	1	1,2337	1,23373	10,93	0,030
Alt. Mola	1	0,0226	0,02264	0,2	0,677
Amplitude*Frequência	1	1,0036	1,00356	8,89	0,041
Amplitude*Alt. Mola	1	0,0121	0,01211	0,11	0,760
Frequência*Alt. Mola	1	0,8692	0,86919	7,7	0,050
Curvatura	1	0,1278	0,12778	1,18	0,356
Falta de Ajuste	1	0,2885	0,28852	16,34	0,056
Erro Puro	2	0,0353	0,01766		
Total	10	13,5254			

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 32, após essa constatação, o modelo simplificado que melhor se encaixou mostrou-se três fatores significantes, dois fatores principais e uma interação de 2ª ordem amplitude x frequência, percebe-se quando negligenciado o ponto central do modelo um fator signigicante de 2ª ordem foi adicionado.

Baseado nos resultados de P-valor da Tabela 32, na Tabela 33 gerado pelo *software* Minitab® avaliou-se a significância de cada fator após a simplificação do modelo de regressão.

Tabela 33 - Estimativas dos efeitos e dos coeficientes do modelo de regressão simplificado para % de desgaste da espessura do corpo da bucha

Fatores	Estimativa do Efeito	Estimativa do Coeficiente	Erro Padrão do Coeficiente	t para Ho Coeficiente =0	P-valor
Constante		1,953	0,133	14,72	0
Amplitude	2,229	1,114	0,156	7,16	0,000
Frequência	0,785	0,393	0,156	2,52	0,040
Amplitude*Frequência	0,708	0,354	0,156	2,28	0,057

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 33, percebe-se que após a simplificação do modelo o fator de 2ª ordem não se apresenta mais significativa, porém é o melhor modelo que se encaixou na análise residual; Segue modelo proposto conforme Equação 30:

Equação 30:

$$\% \text{ corpo} = 10,06 - 2,80 \cdot \text{Amp} - 0,525 \cdot \text{Frequência} + 0,1574 \cdot \text{Amp} \cdot \text{Frequência}$$

Na Tabela 34 gerado pelo *software* Minitab®, mostra o nível de confiabilidade do modelo de regressão. O modelo proposto é capaz de explicar 90% da variabilidade dos dados:

Tabela 34 - Estatística da regressão

Estatística de Regressão	
R-Quadrado	89,98%
R-Quadrado ajustado	85,68%

Fonte: Autor (2018)

4.3.3 Análise residual do modelo

Baseado nos resultados da Tabela 28 % médio de desgaste da espessura do corpo da bucha, foram gerados os resíduos para o modelo simplificado com os fatores Amplitude, Frequência, Altura da Mola e Amplitude x Frequência, conforme Tabela 35.

Tabela 35 - Resíduos do modelo do % de desgaste da espessura do corpo da bucha

Amostra	Resíduos
1	0,059
2	0,185
3	-1,534
4	-2,107
5	-0,684
6	1,697
7	0,274
8	0,655
9	1,124
10	0,544
11	-0,595

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resíduos da Tabela 35, foi gerado no *software* Minitab® o gráfico de probabilidade normal para os resíduos, conforme Figura 104.

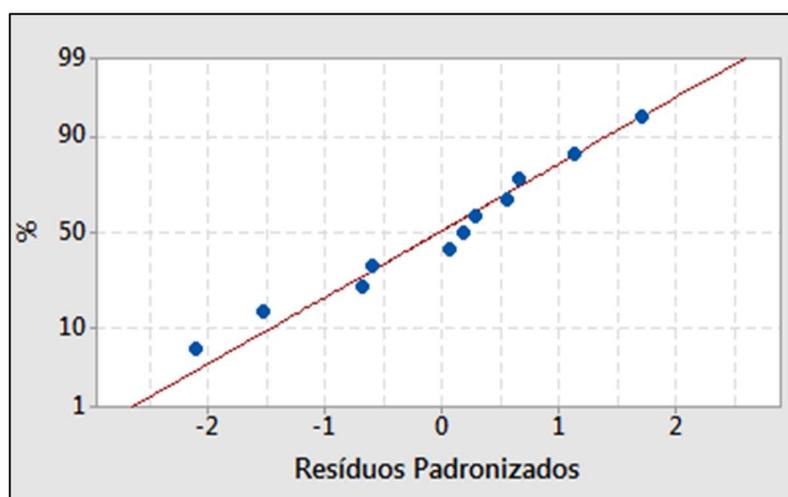


Figura 104 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos
Fonte: Autor (2018)

A Figura 104, mostra um gráfico de probabilidade normal dos resíduos padronizados. Todos os resíduos estão aproximadamente ao longo de uma linha reta, portanto os dados mostram um comportamento normal.

Baseado nos resíduos da Tabela 35, foram gerados no *software* Minitab® o gráfico dos resíduos padronizados e diagrama de caixa do teste de hipótese-T, conforme Figuras 105, 106 e 107.

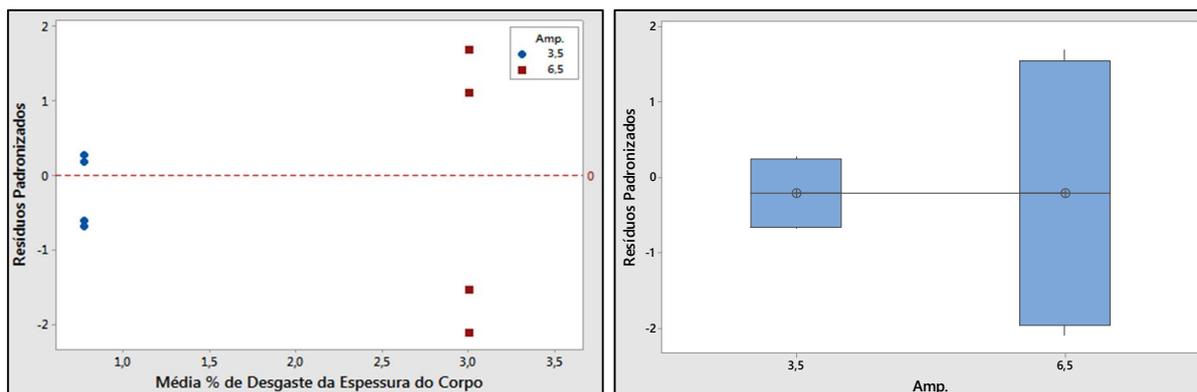


Figura 105 - Gráfico dos resíduos padronizados versus amplitude e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator amplitude
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 105, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator Amplitude para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 36, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 3,5mm e 6,5mm são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 3,5mm e 6,5mm são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as amplitudes 3.50mm e 6.50mm são estatisticamente iguais.

Tabela 36 - P-valor do teste estatístico-T

Teste Estatístico - T	
P-valor	1,000
H_0	$RES_{3,5} = RES_{6,5}$
H_1	$RES_{3,5} \neq RES_{6,5}$

Fonte: Autor (2018)

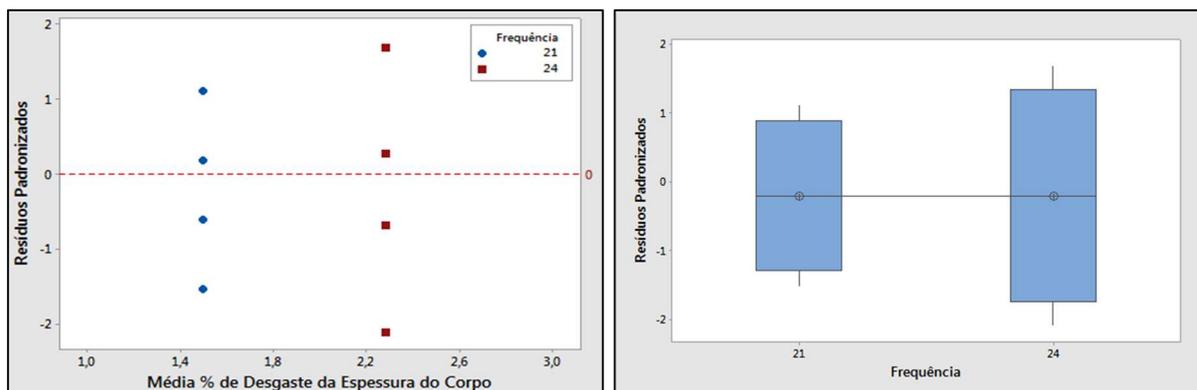


Figura 106 - Gráfico dos resíduos padronizados versus frequência e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator frequência
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 106, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator frequência para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 37, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 21Hz e 24Hz são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 21Hz e 24Hz são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as frequências 21Hz e 24Hz são estatisticamente iguais.

Tabela 37 - P-valor do teste estatístico-T

Teste Estatístico - T	
P-valor	1,000
H_0	RES21 = RES24
H_1	RES21 \neq RES24

Fonte: Autor (2018)

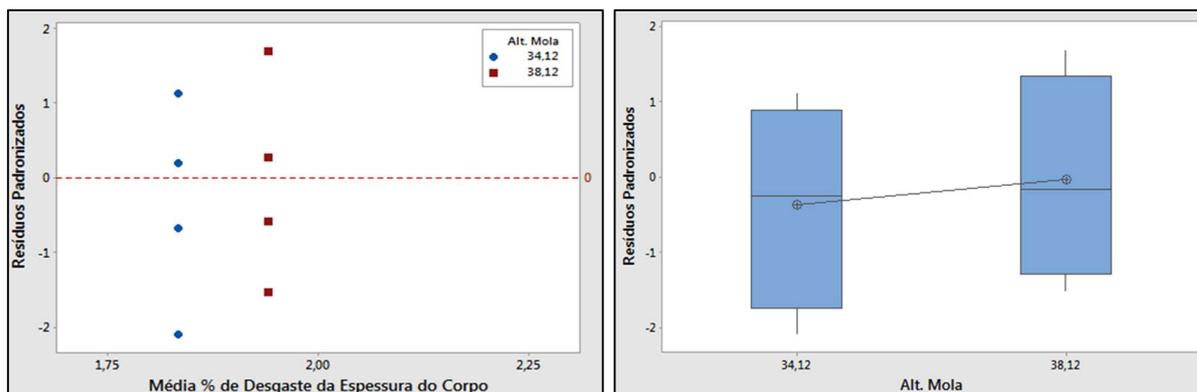


Figura 107 - Gráfico dos resíduos padronizados versus altura da mola e diagrama de caixa do teste de hipótese-T dos resíduos padronizados para o fator altura da mola
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 107, são mostrados o gráfico dos resíduos versus os níveis do fator altura da mola para verificação da hipótese de igualdade das variâncias, e caixa de diagrama do teste de hipótese usando estatística T para validação da hipótese nula onde verificou-se que ambos as variâncias dos resíduos são equivalentes.

Na Tabela 38, pode-se verificar a estatística do teste de hipótese onde a hipótese nula os resultados dos resíduos de 34,12mm e 38,12 são iguais e a hipótese alternativa os resultados dos resíduos de 34,12mm e 38,12mm são diferentes. Nesse caso validou-se a hipótese nula o P-valor encontra-se $>0,05$, ou seja, ambas as variâncias dos resíduos padronizados para as alturas de mola 34,12mm e 38,12mm são estatisticamente iguais.

Tabela 38 - P-valor do teste estatístico-T

Teste Estatístico - T	
P-valor	0,745
H_0	$RES_{34,12} = RES_{38,12}$
H_1	$RES_{34,12} \neq RES_{38,12}$

Fonte: Autor (2018)

4.3.4 Otimização da resposta

Para otimização da resposta os dados gerados no *software* Minitab® da Tabela 28, foi utilizado à função de conveniência para encontrar o nível ideal dos fatores significantes, para minimização do % desgaste da espessura do corpo da bucha e minimização do desvio padrão. As três soluções encontram-se com um valor próximo de um, ou seja, as três soluções apresentam uma atenuação para o desgaste.

Tabela 39 - Níveis do fator para otimização da resposta com relação a minimização do desgaste da bucha pela espessura do corpo da bucha

Otimização da Resposta					
Solução da Resposta	Níveis de cada fator			Função de Conveniência	% de Desgaste Previsto
	Amplitude	Frequência	Alt. Mola		
1	3,5	21	34,12	0,962224	0,8004
2	3,5	21	38,12	0,95696	0,8004
3	3,5	24	34,12	0,951130	0,8774

Fonte: Autor (2018)

Baseado nos resultados da Tabela 39, foi gerado no *software* Design Expert versão 6.0.6, o gráfico de superfície de resposta, conforme Figura 108.

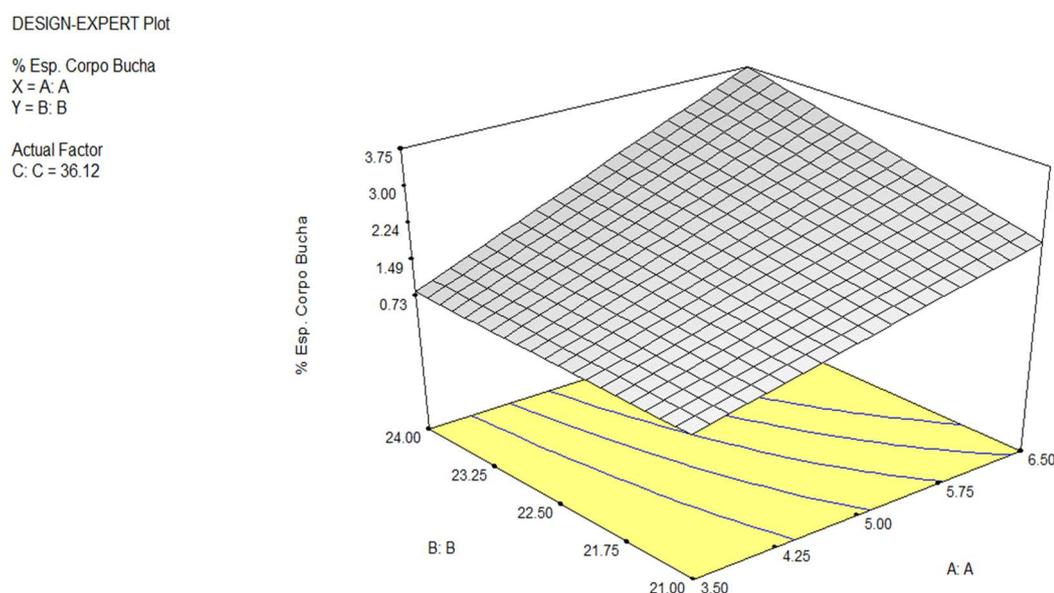


Figura 108 – Gráfico de superfície da otimização da resposta
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 108, definido a variável dependente A:A como a amplitude e a variável dependente B:B como frequência e fixando a altura da mola com o valor de ponto central 36,12mm. É possível verificar que o desgaste por % de espessura do corpo é atenuado conforme deslocasse para os níveis de mínima dos fatores amplitude e frequência.

4.4 Análise fotográfica das amostras

Baseado nas amostras usadas para a verificação do desgaste, na Figura 109, é mostrado fotografias dos eixos que trabalharam juntamente com a bucha polimérica. Foram separados a amostra 5 como A e 16 como B onde essas duas amostras

representam os extremos do desgaste no teste, a amostra 5 como o menor percentual de desgaste e a amostra 16 como o maior % de desgaste, baseado no % de desgaste pelo corpo da bucha que faz interface com o corpo do eixo.

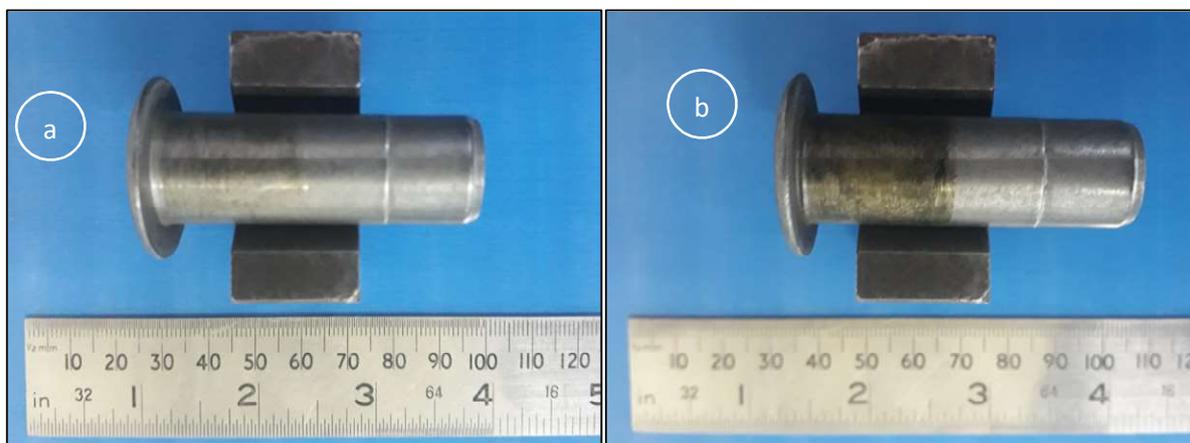


Figura 109 – Imagem fotográfica do eixo que trabalho em conjunto com a bucha. a) amostra 5 b) amostra 16
Fonte: Autor (2018)

Pode-se verificar na Figura 109, a amostra 5 foi um dos conjuntos eixo-bucha que sofreram um menor desgaste, enquanto que a amostra 16 é o oposto sendo um dos conjuntos eixo-bucha que mais sofreram desgaste. Observa-se que na amostra 16 a peça apresenta um filme polimérico mais denso do que na amostra 5, evidenciando que realmente esse conjunto obteve o maior desgaste.

Baseado na Figura 109 foi feito uma ampliação da imagem fotográfica de 15x no eixo para uma melhor constatação do filme polimérico na Figura 110.

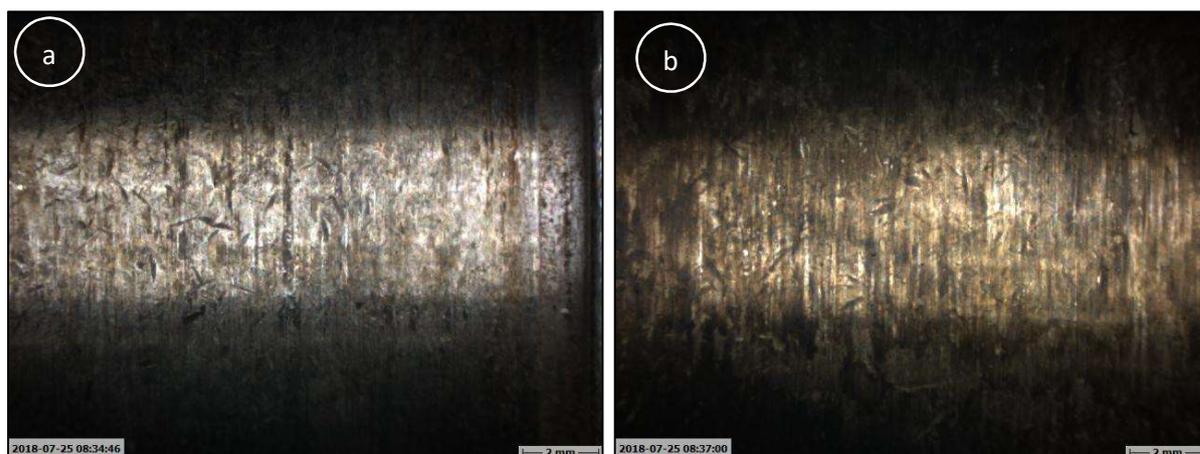


Figura 110 – Fotomicrografia. Aumento 15X. Observa-se a aderência do filme polimérico das amostras. a) amostra 5 b) amostra 16
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 110, é possível verificar que o filme polimérico na amostra 5 mostra uma menor aderência do filme onde essa amostra trabalhou com os fatores nos

seguintes níveis Amplitude 3,5mm, Frequência 21Hz e Altura da Mola 38,12mm. Na amostra 16, onde a aderência do filme foi mais severa a amostra trabalhou com os fatores nos seguintes níveis Amplitude 6,5mm, Frequência 24Hz e Altura da Mola 38,12mm.

Baseado na Figura 109 foi feito uma ampliação da imagem fotográfica de 29x no eixo para uma melhor constatação do filme polimérico na Figura 111.

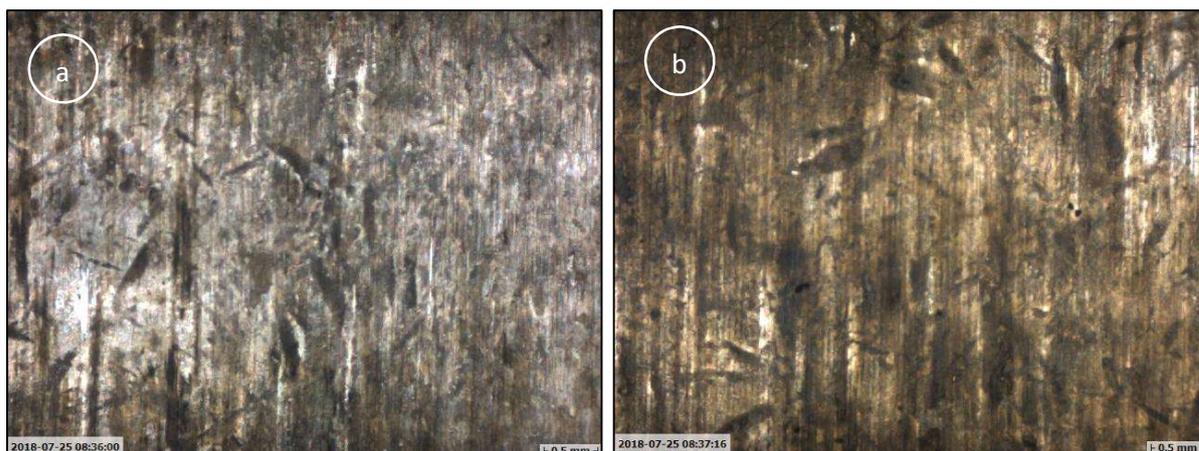


Figura 111 – Fotomacrografia. Aumento 29X. Observa-se a zona de aderência do filme polimérico das amostras. a) amostra 5 b) amostra 16
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 111, fica clara a maior aderência do filme polimérico na peça 16. Marcas de batida são inerentes do processo de forja, não tem nenhuma relação com o teste.

Das mesmas amostras de eixo, coletamos as amostras de buchas polimérica que trabalharam como amostras 5 e 16 conforme identificações dos eixos. Segue imagem fotográfica da bucha na Figura 112.

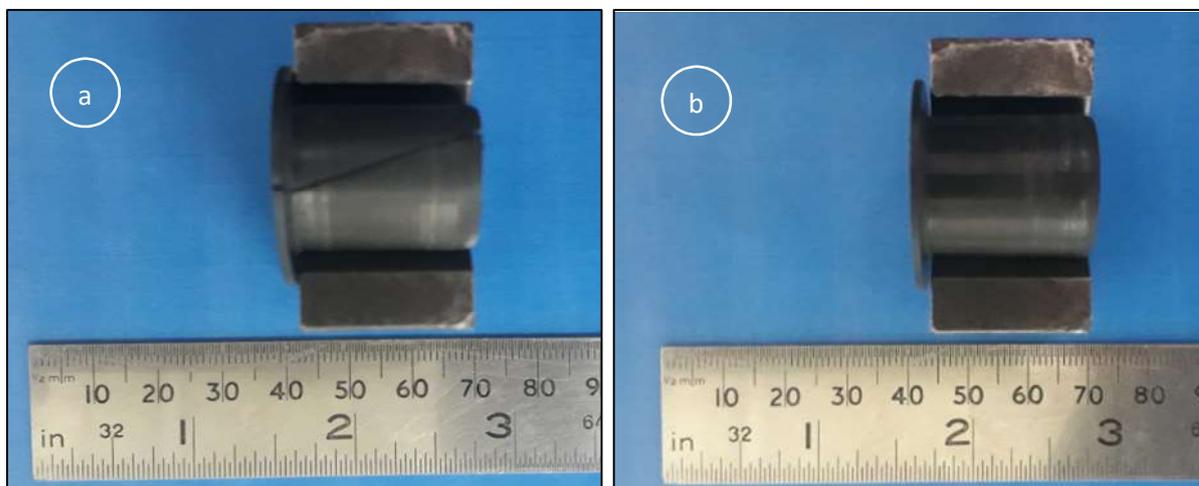


Figura 112 – Imagem fotográfica das buchas. a) amostra 5 b) amostra 16
Fonte: Autor (2018)

Baseado na Figura 112 foi feita uma ampliação da imagem fotográfica de 20x para a verificação da superfície do furo da bucha que interagiu com o eixo, conforme Figura 113.



Figura 113 – Fotomacrografia. Aumento 20X. Observa-se a região de contato da bucha com o eixo. a) amostra 5 b) amostra 16
Fonte: Autor (2018)

Na Figura 113, pode-se observar que a amostra 16 demonstrou um maior desgaste possui uma área mais ampla de contato, pois trabalhou com uma amplitude maior e a frequência mais intensa também. Já para a amostra 5 o ponto de contato ficou mais localizado assim demonstrando o motivo dessa amostra apresentar um menor desgaste.

5 CONCLUSÕES

De acordo com a análise dos resultados pode-se verificar que para a avaliação do desgaste os três fatores principais influenciam no desgaste entre si para as diferentes variáveis de saída propostas e foi possível propor um modelo matemático para a predição dessas falhas.

Com relação à definição dos fatores a serem testados e seus níveis, foram feitas 11 corridas de 144 horas com todos os níveis de fatores propostos no teste para a coleta de dados das variáveis de saída massa da bucha pré e pós-teste, espessura do flange da bucha pré e pós-teste e espessura do corpo da bucha pré e pós-teste.

Na resposta massa da bucha foi possível verificar que somente os fatores principais amplitude e frequência influenciam no desgaste juntamente com um fator de 2ª ordem amplitude x frequência. Na resposta espessura do flange os fatores amplitude e altura da mola foram significantes, porém como não houve ajuste dos desvios padrão dos efeitos dos fatores foi proposto uma simplificação do modelo com a adição de um fator principal frequência e um fator de 2ª ordem amplitude x frequência com isso o modelo obtendo um ajuste linear. E na saída espessura do corpo da bucha novamente repetiu-se dois fatores principais amplitude e frequência juntamente com um fator de 2ª ordem amplitude x frequência. Com isso é comprovado a importância do controle desses fatores e ainda mais verificou-se que o fator amplitude foi significativo em todas as variáveis de resposta. Em todas as variáveis de resposta, às curvaturas foram insignificantes, assim obtendo um modelo linear.

Em todas as saídas do planejamento de experimento, foi possível apresentar um modelo de regressão simplificado, onde os resíduos apresentaram-se com um comportamento normal e com a variância iguais, assim validando os modelos propostos. Na análise fotográfica percebeu-se que o filme polimérico teve uma maior aderência quando no corpo do eixo quando o esticador trabalhou com os vértices amplitude e frequência na máxima, e mostrando muito do que ocorre quando há desgaste interfacial conforme capítulo 2.3.5.1.2 que cita o desgaste interfacial como a remoção do material devido a dissipação de atrito interfacial entre as asperezas resultando em amolecimento do material por aquecimento, desgaste adesivo ou desgaste químico.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. F. DE. **Propriedades Tribológicas do PEEK em ambiente lubrificado com óleo**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2017.
- ANTONY, J. **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. [s.l.] Elsevier Science & Technology Books, 2003.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Third Edit ed. Burlington, MA: [s.n.].
- BAYER, R. G. Fundamentals of wear failures. **Tribology International**, v. 22, n. 4, p. 301–302, 2013.
- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology, Second Edition**. 2ª ed. New York: John Wiley& Sons, 2013.
- BORTOLETO, E. M. **Comportamento tribomecânico e desgaste adesivo de materiais em nanoescala: análises por dinâmica molecular e mecânica do contínuo**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.
- BOTH, G. B. **Caracterização e Avaliação Tribológica De Superfícies Resistentes Ao Desgaste Para Aplicação Em Ferramentas De Conformação a Frio**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- BOUTIN, F. F.; ROCHA, L. P. C. **Avaliação do Comportamento Tribológico do Politetrafluoretileno contra aço inoxidável sem lubrificação em ensaio pino sobre disco**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- BRISCOE, B. J.; SINHA, S. K. Wear of polymers. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 216, n. 6, p. 401–413, 2002.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. Décima Edi ed. New York: [s.n.].
- CALLISTER, W. D. J.; RETHSWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. Third edit ed. [s.l.: s.n.].
- CANDIAN, L. M. **Estudo do Polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.
- CANEVAROLO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2002.
- CARPINETTI, L. C. R. **Planejamento e Análise de Experimentos**. São Carlos: [s.n.].
- CHEN, G. X.; ZHOU, Z. R. Study on transition between fretting and reciprocating sliding wear. **Wear**, v. 250–251, n. PART 1, p. 665–672, 2001.
- DALFRÉ, G. M. **Cruzetas De Polímeros Reciclados: Caracterização Dos Materiais, Análise Numerica E Ensaio De Modelos Reduzidos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.
- DASARI, A.; YU, Z. Z.; MAI, Y. W. Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites. **Materials Science and Engineering R: Reports**, v. 63, n. 2, p. 31–80, 2009.
- DILLENBURG, M. R. **Estimativas de confiabilidade de produto a partir das contagens mensais de vendas e falhas ao longo do periodo de garantia**. [s.l.]

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

EBEWELE, R. O. **Polymer Science and Technology**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

FERREIRA, M. S. C.; MEDEIROS, J. T. N. DE; CATARINA, R. Estudo do comportamento tribológico do PTFE contra aço AISI4140 em ensaios de deslizamento a seco variando-se a vibração do sistema. **Publica V**, 2009.

FORTES, R. R.; GRANDINETTI, J. F.; CAMARGO, J. R. DE. AVALIAR A IMPORTÂNCIA DA RUGOSIDADE NO DESGASTE DE BUCHAS COM TEFLON EM SISTEMAS ROTATIVOS AUTOMOTIVO. **CICTED - Congresso Internacional de Ciência Tecnologia e Desenvolvimento**, 2017.

FRANKLIN, S. E.; KRAKER, A. DE. Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behaviour of a POM-20% PTFE composite. **Wear**, v. 255, n. 1–6, p. 766–773FRANKLIN, S. E.; KRAKER, A. DE. Investigati, 2003.

FREITAS, A. J. C. DE. **Comportamento de Desgaste de Pares Metal-Compósito de Grau Aeronáutico**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2009.

GAHR, Z. Microstructure and wear of materials. *In*: New York: Elsevier, 1987. p. 560.

GERDEEN, J. C.; RORRER, R. A. L. **Engineering Design with Polymers and Composites, Second Edition**. 2ª ed. Boca Raton: [s.n.].

GNECCO, E.; MEYER, E. **Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale**. [s.l.] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

GRECO, P. **Dinâmica de um Autotensionador Mecânico Sujeito ao Atrito Seco**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2015.

HAN, H. H. **Utilização da Função Desirability na Otimização do Processo de Usinagem da Superliga Nimonic80A**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2015.

HEMAIS, C. A. Polímeros e a indústria automobilística. **Polímeros**, v. 13, 2003.

ISHIDA, M. B.; BEÊ, M. T. **Estudo do comportamento tribológico dos polímeros de engenharia em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável**CuritibaUniversidade Tecnológica Federal do Paraná, , 2015.

ISIDORO, C. C. **Fermentação acidogénica para produção de substratos de biopolímeros**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2009.

JIA, B. BIN *et al.* **Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions**. [s.l: s.n.].

JOSHI, P. H. **Machine Tools Handbook - Design and Operation**. [s.l: s.n.].

KAWAKAME, M. S.; BRESSAN, J. D. Atrito e desgaste em polímeros. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 14, 2000.

KLAAS, L. S. **Estudo da viabilidade de obtenção do metal patente por metalurgia do pó e comparação do desgaste com liga fundida e bronze sinterizado**. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2013.

KUMAR, A.; GUPTA, R. K. **Fundamentals of Polymer Engineering**. 2ª ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003.

LARANJEIRA, S. M. **Estudo do Comportamento ao Atrito e Desgate de Poliamidas**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2011.

- LIMA, A. B. T. **Aplicação de Cargas Minerai s Em Polímeros**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.
- MAIO, J. A. M. **Comportamento tribológico de polietilenos**. [s.l.] Universidade de Aveiro, 2012.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4ª Edição ed. Rio de Janeiro: [s.n.].
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5ª Edição ed. Rio de Janeiro: [s.n.].
- MYSHKIN, N. K.; PETROKOVETS, M. I.; KOVALEV, A. V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. **Tribology International**, v. 38, n. 11–12 SPEC. ISS., p. 910–921, 2005.
- NUNES, R. A. X. **Abrasão, desgaste e atrito sob deslizamento de recobrimentos preparados por aspensão térmica a partir do PET pós-consumo**. [s.l.] Engenharia de Materiais REDEMAT, 2008.
- PATNAIK, A. *et al.* Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review. **Wear**, v. 268, n. 1, p. 249–263, 2009.
- RODRIGUES, A. A. **Investigação das características tribológicas e ambientais de termoplásticos de engenharia especiais para uso em materiais de atrito**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.
- SANTANA, J. S. DE. **Avaliação tribológica dos polímeros NBR, PTFE e PTFE Grafitado em contato com o aço AISI 52100**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- SCARPIN, C. A. **Análise Sistêmica de Falhas**. 2ª ed. [s.l.] FALCONI, 2013.
- SILVA, C. H. DA. **Degradação de UHMWPE e de POM devido à ação tribológica contra axo inoxidável e alumínio**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
- SILVA, R. C. D. L. **Desgaste de Polímeros Estruturais de Engenharia em Contato de Deslizamento com Cilindro Metálico**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- SILVA, R. C. L. DA; SILVA, C. H. DA; MEDEIROS, J. T. N. Is there delamination wear in polyurethane? **Wear**, v. 263, n. 7–12 SPEC. ISS., p. 974–983, 2007.
- SILVA, V. A. DA. **Desgaste de Poliuretano por erosão úmida: Desenvolvimento de um ensaio tecnológico**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- SOCIEDADE AMERICANA DE MATERIAIS (ASM). **Friction, Lubrication, and Wear Technology**, 1992. (Nota técnica).
- TEIXEIRA, L. M. R. **Avaliação do Comportamento ao Desgaste de Compositos Poliméricos**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2012.
- TOLEDO, M. DE. **EFICIÊNCIA NA FABRICAÇÃO DE CORREIAS MICRO V® AUTOMOTIVAS**. [s.l.] Universidade de Taubaté, 2015.
- VALE, J. L. DO. **Estudo do comportamento tribológico do politetrafluoretileno em deslizamento sem lubrificação contra aço inoxidável**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

VALE, J. L. DO; SILVA, C. H. DA. Uma discussão sobre os principais parâmetros que influenciam no comportamento tribológico dos termoplásticos. **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, p. 32, 2015.

VOLCI, G. A. **Comportamento tribológico do anel de primeiro canaleta em motores operando em sistemas flex fuel**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2007.

WANDEMBRUCK, G.; BARIONI, W. E. **Avaliação tribológica de compostos de politetrafluoretileno em ensaio de desgaste tipo mancal sobre eixo sem lubrificação** Curitiba Universidade Tecnológica Federal do Paraná, , 2015.

WANG, Q. J.; CHUNG, Y.-W. **Encyclopedia of tribology**. New York: Springer Reference, 2013.

ANEXOS

Anexo A - Fator f_1 relacionado ao movimento

Mode of Motion	Characteristic Pressure P , psi		Velocity V , ft/min	f_1^*
Rotary	720 or less		3.3 or less	1.0
			3.3–33	1.0–1.3
			33–100	1.3–1.8
	720–3600		3.3 or less	1.5
			3.3–33	1.5–2.0
			33–100	2.0–2.7
Oscillatory	720 or less	>30°	3.3 or less	1.3
			3.3–100	1.3–2.4
		<30°	3.3 or less	2.0
		3.3–100	2.0–3.6	
	720–3600	>30°	3.3 or less	2.0
			3.3–100	2.0–3.2
<30°		3.3 or less	3.0	
	3.3–100	3.0–4.8		
Reciprocating	720 or less		33 or less	1.5
			33–100	1.5–3.8
	720–3600		33 or less	2.0
			33–100	2.0–7.5

*Values of f_1 based on results over an extended period of time on automotive manufacturing machinery.

Fonte: Budynas e Nisbett (2015).

Anexo B - Fator f_2 em relação ao ambiente

Ambient Temperature, °F	Foreign Matter	f_2
140 or lower	No	1.0
140 or lower	Yes	3.0–6.0
140–210	No	3.0–6.0
140–210	Yes	6.0–12.0

Fonte: Budynas e Nisbett (2015).

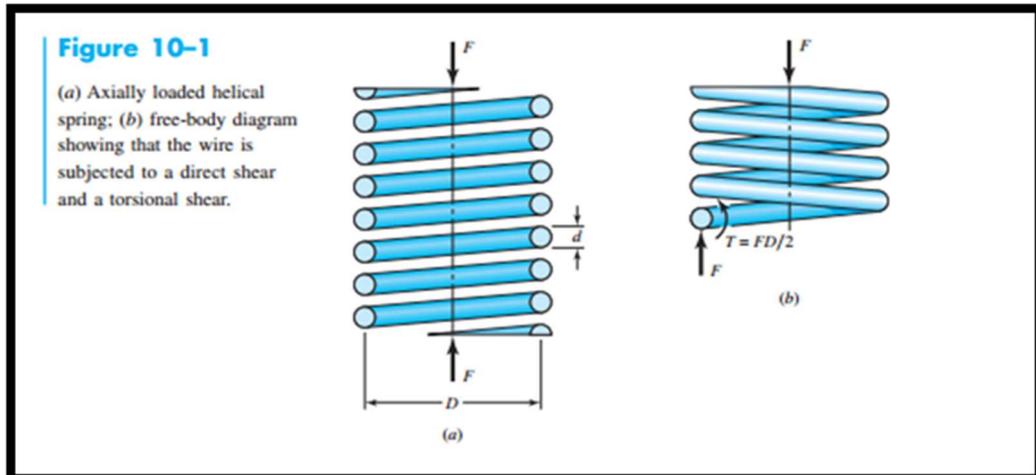
Anexo C - Fator de Desgaste K

Bushing Material	Wear Factor K	Limiting PV
Oiles 800	$3(10^{-10})$	18 000
Oiles 500	$0.6(10^{-10})$	46 700
Polyactal copolymer	$50(10^{-10})$	5 000
Polyactal homopolymer	$60(10^{-10})$	3 000
66 nylon	$200(10^{-10})$	2 000
66 nylon + 15% PTFE	$13(10^{-10})$	7 000
+ 15% PTFE + 30% glass	$16(10^{-10})$	10 000
+ 2.5% MoS ₂	$200(10^{-10})$	2 000
6 nylon	$200(10^{-10})$	2 000
Polycarbonate + 15% PTFE	$75(10^{-10})$	7 000
Sintered bronze	$102(10^{-10})$	8 500
Phenol + 25% glass fiber	$8(10^{-10})$	11 500

*dim[K] = in³ · min/(lbf · ft · h), dim [PV] = psi · ft/min.

Fonte: Budynas e Nisbett (2015).

Anexo D – Cálculo de Carga Axial para Molas Helicoidais



Deflection of Helical Springs

The deflection-force relations are quite easily obtained by using Castigliano's theorem. The total strain energy for a helical spring is composed of a torsional component and a shear component. From Eqs. (4-18) and (4-20), p. 176, the strain energy is

$$U = \frac{T^2 l}{2GJ} + \frac{F^2 l}{2AG} \quad (a)$$

Substituting $T = FD/2$, $l = \pi DN$, $J = \pi d^4/32$, and $A = \pi d^2/4$ results in

$$U = \frac{4F^2 D^3 N}{d^4 G} + \frac{2F^2 DN}{d^2 G} \quad (b)$$

where $N = N_a$ = number of active coils. Then using Castigliano's theorem, Eq. (4-26), p. 179, to find total deflection y gives

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} + \frac{4FDN}{d^2 G} \quad (c)$$

Since $C = D/d$, Eq. (c) can be rearranged to yield

$$y = \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \left(1 + \frac{1}{2C^2} \right) \approx \frac{8FD^3 N}{d^4 G} \quad (10-8)$$

The spring rate, also called the *scale* of the spring, is $k = F/y$, and so

$$k \approx \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (10-9)$$

Fonte: Budynas e Nisbett (2015).

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial desta obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Rafael Rodrigues Fortes

Taubaté-SP, 07 de dezembro de 2018