

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Igor Henrique Martins Campos

**METODOLOGIA E ANÁLISE DE DESEMPENHO NA TECNOLOGIA DE
COLETA DE CORRENTE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS:
ESTUDO DE CASO EM UM ACIONAMENTO FERROVIÁRIO**

Belo Horizonte
2023

Igor Henrique Martins Campos

**METODOLOGIA E ANÁLISE DE DESEMPENHO NA TECNOLOGIA DE
COLETA DE CORRENTE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS:
ESTUDO DE CASO EM UM ACIONAMENTO FERROVIÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia

Coorientador: Prof. Dr. Marco Túlio Corrêa de Faria

Belo Horizonte
2023

C198m

Campos, Igor Henrique Martins.

Metodologia e análise de desempenho na tecnologia de coleta de corrente em máquinas elétricas [recurso eletrônico] : estudo de caso em um acionamento ferroviário / Igor Henrique Martins Campos. – 2023.
1 recurso online (123 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Thales Alexandre Carvalho Maia.
Coorientador: Marco Túlio Corrêa de Faria.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 120-123.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Correntes elétricas – Teses.
3. Desgaste mecânico – Teses. 4. Atrito – Teses. 5. Máquinas elétricas – Corrente contínua – Teses. 6. Motores elétricos de corrente contínua – Teses. I. Maia, Thales Alexandre Carvalho. II. Faria, Marco Túlio Corrêa de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"METODOLOGIA E ANÁLISE DE DESEMPENHO NA TECNOLOGIA DE COLETA DE CORRENTE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS:
ESTUDO DE CASO EM UM ACIONAMENTO FERROVIÁRIO"

IGOR HENRIQUE MARTINS CAMPOS

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 22 de março de 2023. Por:

Prof. Dr. Thales Alexandre Carvalho Maia - (UFMG) - Orientador
Prof. Dr. Marco Tulio Correa de Faria (Coorientador) - DEMEC (UFMG)
Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho - DEE (UFMG)
Prof. Dr. Alexandre da Silva Scari - DEMEC (UFMG)
Dr. Gabriel Alves Mendonça - APERAM



Documento assinado eletronicamente por **Thales Alexandre Carvalho Maia, Professor do Magistério Superior**, em 23/03/2023, às 12:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Braz de Jesus Cardoso Filho, Professor do Magistério Superior**, em 23/03/2023, às 16:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre da Silva Scari, Professor do Magistério Superior**, em 23/03/2023, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Tulio Correa de Faria, Professor do Magistério Superior**, em 24/03/2023, às 07:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Alves Mendonça, Usuário Externo**, em 28/03/2023, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2161873** e o código CRC **C4FC709F**.

Aos meus avôs, Marcos e José, torneiro mecânico e agricultor familiar, que, mesmo sem completarem o ensino fundamental, posta a aridez de suas oportunidades, me instruíram sobre as coisas da engenharia que não reaprendi em nenhum desses anos de estudo.

AGRADECIMENTOS

Às minhas avós, Cecy e Clarice, que me ensinaram o valor da união familiar. Aos meus pais, Marcos e Cláudia, pela educação, exemplo e amor incondicional. Aos meus irmãos, William, Alan e Maria, pela amizade e por todas as nossas histórias de luta. À Livia, minha esposa, companheira de estrada e de finais de semana confinados em casa me dedicando a este trabalho.

Aos colegas, Ezequiel, Luiz, Ronan, Welisson e Willians, da Companhia Brasileira de Trens Urbanos de Belo Horizonte, pela troca de conhecimentos e pela auxílio na fabricação de peças e dispositivos que tornaram possível a realização desse estudo. Ao colega Gabriel, da Aperam de Timóteo, que permitiu a execução e auxiliou na análise de todos os ensaios realizados no microscópio eletrônico de varredura. Ao engenheiro Edmur, da Carbomec, especialista em escovas elétricas, pela disponibilidade e prazer em ensinar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC), ambos da Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de cursar disciplinas desafiadoras e estimulantes. Ao meu orientador Thales A. C. Maia e meu coorientador Marco Túlio C. de Faria, pela paciência, dedicação e exemplo que me inspiraram ainda mais a me tornar um educador.

Por fim, sou grato a todos os meus empenhados professores e reconheço a valia das escolas públicas que estudei, E. M. Prof^a. Maria Modesta Cravo, E. M. Gov. Carlos Lacerda e CEFET MG. De maneira especial devo a escolha da minha área de exercício à paixão dos docentes, Cláudio do CEFET MG e Marcos da PUC Minas, no ensino das Máquinas Elétricas.

"Eu sou é eu mesmo. Diverjo de todo o mundo... Eu quase que nada não sei. Mas desconfio de muita coisa. O senhor concedendo, eu digo: para pensar longe, sou cão mestre – o senhor solte em minha frente uma ideia ligeira, e eu rastreio essa por fundo de todos os matos, amém!" (João Guimarães Rosa, Grande Sertão: Veredas, 1956).

RESUMO

No âmbito das máquinas elétricas rotativas, ainda hoje, a coleta de corrente, seja em comutadores ou em anéis coletores, é muito comum. As condições para a aplicação dessa técnica, presumidamente onerosa, laboriosa e, portanto, obsoleta, ditam o rendimento, a vida útil, a ocorrência de falhas, o número e o custo das manutenções dos diversos equipamentos que utilizam essa tecnologia. Em função da má reputação e, especialmente, por se tratar de um ramo científico interdisciplinar, as especificidades técnicas da coleta de corrente foram relegadas ao esquecimento, resultando numa lacuna de conhecimento.

Este trabalho investiga a interação entre a geometria dimensional, condições ambientais e propriedades físico-químicas, que, sob a influência de aspectos elétricos, magnéticos, mecânicos, químicos e térmicos, determinam o comportamento do contato das escovas com a pista no processo de coleta de corrente de máquinas elétricas rotativas escovadas. Inicialmente, apresenta-se uma revisão bibliográfica focada nos aspectos macroscópicos do fenômeno, explicitando as recomendações empíricas que contribuem para o bom funcionamento dos equipamentos. Na sequência, sobre a ótica micro, discorre-se uma breve investigação dos mecanismos de desgaste, relacionando-os às recomendações anteriormente propostas.

O trabalho também apresenta um estudo de caso de uma máquina de corrente contínua (cc) ferroviária que vinha operando com desgaste anormal no comutador. O desempenho tribológico do contato seco em função do material da escova, da pressão das molas implementada, da corrente de operação e de outras variáveis relevantes foi investigado. O problema foi mitigado através da troca do material e da rigidez das molas. Porém, visando evitar falhas em operação, um ensaio experimental em bancada com a medição da força e da temperatura no contato foi realizado. Ao final, utilizando diversas técnicas, inclusive a microscopia eletrônica de varredura, inspecionou-se a face de contato das escovas submetidas ao teste, concluindo acerca da deposição de cobre à face.

Palavras-chave: Coleta de corrente. Comutação. Atrito. Temperatura de contato. Desgaste.

ABSTRACT

Within the scope of rotating electrical machines, even today, the current collection, whether in commutators or slip rings, is very common. The conditions for the application of this technique, presumably expensive, laborious and therefore obsolete, dictate the performance, lifespan, occurrence of failures, the amount and cost of maintenance of the various equipment that use this technology. Due to the bad reputation and, especially, because of its interdisciplinary, current collection technical specificities were, in a way, relegated to oblivion, resulting in a knowledge gap.

This work investigates the interaction among and not between dimensional geometry, environmental conditions and physical-chemical properties, which, under the influence of electrical, magnetic, mechanical, chemical and thermal aspects, determine the behavior of the brushes contact with the track in the process of collecting current from brushed rotating electrical machines. Initially, we present a literature review focused on the macroscopic aspects of the phenomenon, explaining the empirical recommendations that contribute to the proper functioning of the equipment. Next, from a micro perspective, a brief investigation of wear mechanisms is developed, relating them to the recommendations presented above.

The work also presents a case study of a direct current (dc) railway machine, that had been operating with abnormal wear on the commutator. The tribological performance of the dry contact was investigated as a function of the brush material, the implemented spring pressure, the operating current and other relevant variables. The problem was mitigated by changing the material of the brushes and the stiffness of the springs. However, in order to avoid failures in operation, an experimental bench test with the measurement of force and temperature in the contact. At the end, using several techniques, including scanning electron microscopy, the contact face of the brushes submitted to the test was inspected, concluding about the copper deposition to the face.

Keywords: Current collection. Commutation. Friction. Contact temperature. Wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Gráfico da matriz de transportes de alguns países (% de TKU).	18
Figura 1.2 - Diagrama de blocos - organização esquemática do texto.....	23
Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de uma máquina síncrona com excitação direta....	27
Figura 2.2 - Máquina síncrona escovada - BMW iX M60.	28
Figura 2.3 - Máquina assíncrona - rotor bobinado acessível.....	28
Figura 2.4 - Ilustração da operação de anéis coletores (ca) e comutador (cc).....	29
Figura 2.5 - Esquema de uma máquina cc com foco no comutador.	30
Figura 2.6 - Efeito de reação de armadura por magnetização transversal.	31
Figura 2.7 - Enrolamento de comutação e compensador.....	32
Figura 2.8 - Atenuação das correntes circulantes.	33
Figura 2.9 - Ilustração esquemática da montagem do comutador.....	34
Figura 2.10 - Ampliação esquemática do conjunto comutador/filme/escova.	35
Figura 2.11 - Mudança de coloração da pista com a formação do filme.	36
Figura 2.12 - Comutação de conversor rotativo com centelhamento intenso.....	38
Figura 2.13 - Faiscamento conforme norma JIS.	38
Figura 2.14 - Pátinas de aparência normal - variação de tonalidade.	39
Figura 2.15 - Pátinas de aparência anormal - problemas de comutação.	40
Figura 2.16 - Aparência típica das superfícies de contato das escovas.....	41
Figura 2.17 - Consumo das escovas - função da variação da pressão das molas....	42
Figura 2.18 - Desgaste das escovas em função da umidade e temperatura.	43
Figura 2.19 - Rebarbamento de lâminas em uma máquina de tração cc.	47
Figura 2.20 - Retífica do comutador com a máquina cc in loco.....	48
Figura 2.21 - Exemplos de aparelhos de retífica in loco.....	48
Figura 2.22 - Coeficiente de atrito em função da temperatura - coleta de corrente...54	
Figura 2.23 - Coeficiente de atrito em função da temperatura - comutação.....55	
Figura 2.24 - Força de atrito (diagrama de forças genérico).	56
Figura 2.25 - Ensaio simples - atrito seco.....	58
Figura 2.26 - Deformação elástica de estruturas cristalinas - deslizamento a seco. .58	
Figura 2.27 - Superfícies rugosas em contato - deformação elástica.....59	
Figura 2.28 - Deformações plásticas no contato seco - ótica macro.	60
Figura 2.29 - Campo de temperatura - safira-aço (5,5 MPa e 22,5 m/s).	64
Figura 2.30 - Técnica de contenção elástica - medição do atrito.	64
Figura 2.31 - Viga elástica dupla - medição do atrito.	66

Figura 2.32 - Viga elástica dupla - movimento rotativo.....	66
Figura 3.1 - Conversor Eletromecânico Rotativo em operação no trem.....	69
Figura 3.2 - Localização MCVR - TUE série 900.....	69
Figura 3.3 - Fragmento do diagrama elétrico do trem - 62 circuitos auxiliares.....	71
Figura 3.4 - Dispositivo de retorno de corrente - TUE série 900	74
Figura 3.5 - Desgaste anormal do comutador do MCVR - filetamento.....	75
Figura 4.1 - Furação de escova na fresa CNC - inserção sensor de temperatura. ...	83
Figura 4.2 - Esquema de ligação do CI LM35 - medição de temperatura.	84
Figura 4.3 - Diagrama de forças no contato escova comutador.....	85
Figura 4.4 - Projeto e protótipo - isolador modificado para a medição de atrito.	86
Figura 4.5 - Projeto do porta escovas fabricado (medição do atrito).	87
Figura 4.6 - Porta escovas fabricado (medição do atrito) e original.	87
Figura 4.7 - Projeto de base regulável para montagem do dinamômetro.....	88
Figura 4.8 - Curva obtida na calibração do dinamômetro.....	89
Figura 4.9 - Ensaios de força de atrito e temperatura - conversor rotativo.....	90
Figura 4.10 - Curvas de força de atrito e de temperatura obtidas nos ensaios realizados com escovas de originais (<i>grade 01</i>) à pressão nominal.	92
Figura 4.11 - Curvas de força de atrito e de temperatura obtidas nos ensaios realizados com escovas em teste (<i>grade 02</i>) à pressão nominal.	93
Figura 4.12 - Curvas de força de atrito e de temperatura obtidas nos ensaios realizados com escovas em teste (<i>grade 02</i>) à pressão reduzida.....	94
Figura 4.13 - Medição do perfil do comutador - usado e recondicionado.....	99
Figura 4.14 - Aparência da face de contato das escovas em teste.	100
Figura 4.15 - Desgaste médio de escovas - MCVR's em teste na operação.	101
Figura 4.16 - Aquecimento das escovas em teste - redução do cobre.....	104
Figura 4.17 - Escovas em teste após aquecimento e redução.....	105
Figura 4.18 - MEV e EDS utilizados no estudo.	107
Figura 4.19 - Preparação das amostras de carbono.	108
Figura 4.20 - Varredura inicial MEV - padrão de textura e cores.....	109
Figura 4.21 - EDS amostra 5 - <i>grade 01</i> escova nova.	110
Figura 4.22 - EDS amostra 3 - <i>grade 02</i> escova nova.	111
Figura 4.23 - EDS amostra 4 - <i>grade 01</i> à pressão nominal.	112
Figura 4.24 - EDS amostra 2 - <i>grade 02</i> à pressão nominal.	113
Figura 4.25 - EDS amostra 1 - <i>grade 02</i> à pressão reduzida.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de escovas mais comuns.	26
Tabela 2.2 - Graduação do faiscamento conforme norma JIS.	39
Tabela 2.3 - Classificação típica das superfícies de contato das escovas.	41
Tabela 2.4 - Pressões de contato recomendadas à cada tipo de máquina.	54
Tabela 3.1 - Especificações dos componentes do MCVR.	70
Tabela 3.2 - Corrente de armadura MCVR em função do carregamento - TUE 18...77	
Tabela 3.3 - Especificação alicate amperímetro - medição da corrente do MCVR. ..	78
Tabela 3.4 - Características físicas escova original (01) x escova em teste (02).	79
Tabela 4.1 - Especificação pirômetro - medição prévia da temperatura.	83
Tabela 4.2 - Especificação CI LM35 - medição direta da temperatura.	84
Tabela 4.3 - Especificação dinamômetro - medição da força de atrito.	88
Tabela 4.4 - Patamares de temperatura e força de atrito - medições em bancada das escovas original e em teste sob diferentes pressões no contato.	95
Tabela 4.5 - Configurações propostas para o teste operacional dos conversores.	99
Tabela 4.6 - Especificação MEV e EDS - análise de deposição de cobre.	107
Tabela 4.7 - Amostras de escovas - análise MEV e EDS.	108
Tabela 4.8 - Compilado das análises comparativas de contaminação por cobre....	115
Tabela 4.9 - Compilado dos resultados dos procedimentos experimentais	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD - Conversão Analógico Digital

BMW - *Bayerische Motoren Werke*

ca - Corrente alternada (*ac - alternating current*)

CBTU - Companhia Brasileira de Trens Urbanos

cc - Corrente contínua (*dc - direct current*)

CCD - Dispositivo Coletor de Corrente (*Current Collector Devices*)

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CI - Circuito integrado

DAC - *Hardware* de aquisição de dados da *National Instruments*

DFIG - Gerador de indução duplamente alimentado (*Double-Fed Induction Generator*)

EDS - Espectroscopia por energia dispersiva (*Energy Disperse Spectroscopy*)

JIS - *Japanese Industrial Standards*

LVDT - Transformador diferencial linear variável (*Linear Variable Differential Transformer*)

MA - Carro motriz voltado à estação Vilarinho (externo e com tração própria)

MB - Carro motriz voltado à estação Eldorado (externo e com tração própria)

MCVR - Conversor eletromecânico rotativo ou Motor conversor de tensão rotativo

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

NR10 - Norma Regulamentadora N° 10

Procel - Programa nacional de conservação de energia elétrica

Ra - Escala de rugosidade média (valores absolutos no comprimento de amostragem)

RA - Carro reboque voltado à estação Vilarinho (intermediário e sem tração própria)

RB - Carro reboque voltado à estação Eldorado (intermediário e sem tração própria)

SAE - *Society of Automotive Engineers*

TCO - *Traction Cem-Oerlikon*

TKU - Tonelada quilometro útil (produto da massa útil transportada por uma certa distância)

TUE - Trem-unidade elétrico (*EMU - electric multiple unit*)

LISTA DE SÍMBOLOS

- \mathcal{E}_{ind} - Tensão de reatância residual induzida na armadura
- R_t - Resistência transversal das escovas
- I_c - Correntes circulantes no contato das escovas com o comutador
- V_{ce} - Queda de tensão no contato da escova com a lâmina esquerda
- V_{cd} - Queda de tensão no contato da escova com a lâmina direita
- R_c - Resistências de contato entre as seções de escovas multipartidas
- η - Rendimento
- P_{mec} - Potência mecânica de saída de uma máquina cc
- ω - Velocidade angular desenvolvida pelo rotor
- T - Torque ou conjugado mecânico desenvolvido pelo rotor
- P_e - Perdas elétricas (totais)
- P_c - Perdas elétricas no cobre (em carga)
- P_v - Perdas elétricas a vazio (histerese e Foucault)
- P_{ee} - Perdas elétricas da comutação (condução e queda de tensão no contato)
- P_m - Perdas mecânicas (totais)
- P_a - Perdas mecânicas por arrasto (atrito com o ar gerado pela ventilação)
- P_r - Perdas mecânicas nos mancais (atrito entre elementos fixos e móveis)
- P_{me} - Perdas mecânicas da comutação (atrito: escovas eletrográficas e pista)
- P_{mm} - Perdas mecânicas da coleta de corrente (atrito: escovas metálicas e pista)
- \varnothing - Diâmetro do comutador ou dos anéis coletores
- A - Área de contato das escovas com a pista (total)
- n - Número de escovas de uma máquina (total)
- p_c - Potência dissipada na condução de corrente pelo corpo de uma escova
- R - Resistência de condução de uma escova
- I_e - Corrente conduzida através de uma escova
- I_a - Corrente de armadura da máquina cc
- ρ - Resistividade do material da escova
- s - Área de seção transversal de uma escova
- l - Comprimento de uma escova
- p_q - Potência dissipada pela queda de tensão no contato de escovas com o comutador

U - Queda de tensão no contato das escovas com o comutador
C2 - Escala Shore de dureza mecânica
K - Constante construtiva da máquina cc
 Φ_p - Fluxo polar estático resultante dos enrolamentos de campo da máquina cc
 J_{nom} - Densidade de corrente nominal de uma máquina (cc ou ca) escovada
 I_{nom} - Corrente nominal total coletada no comutador ou nos anéis coletores
f - Fator de cálculo (0,5 para comutador e 1 para anéis coletores)
 ΔP_m - Faixa tolerável de pressão das molas
C - Coeficiente de rigidez da mola
 Δx - Variação do comprimento das escovas
 \vec{N} - Força normal
 \vec{P} - Força peso
 \vec{F} - Força aplicada
m - Massa
 \vec{F}_a - Força de atrito
 μ - Coeficiente de atrito
 \vec{F}_{ae} - Força de atrito estático
 μ_e - Coeficiente de atrito estático
 \vec{F}_{ac} - Força de atrito cinético
 μ_c - Coeficiente de atrito cinético
 q_{ij} - Intensidade do calor gerado (função das coordenadas i e j relacionadas)
 p_{ij} - Distribuição de pressão no contato (função das coordenadas i e j relacionadas)
v - Velocidade de deslizamento no contato
T - Campo de temperatura
L - Comprimento do contato
W - Largura do contato
Y - Ligação trifásica em estrela
 Δ - Ligação trifásica em delta
 J_{med} - Densidade de corrente média de uma máquina (cc ou ca) escovada
 I_{med} - Corrente média total coletada no comutador ou nos anéis coletores
CAT - Categoria de suportabilidade a impulsos de tensão (NBR 05410)
 $\epsilon_{carbono}$ - Emissividade do carbono

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 A COLETA DE CORRENTE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS.....	24
2.1.1 Escovas	25
2.1.2 Anéis coletores	26
2.1.3 Comutador	29
2.2 OS FENÔMENOS DA COMUTAÇÃO.....	35
2.2.1 Formação e conservação do filme	35
2.2.2 Condições para a melhora do desempenho da comutação	37
2.3 A INFLUÊNCIA DO ATRITO NA COMUTAÇÃO.....	46
2.3.1 Recomendações práticas para a redução do atrito (aspectos macro)	46
2.3.2 A mecânica do contato seco (aspectos micro)	56
2.4 MEDIÇÕES NO CONTATO SECO.....	63
2.4.1 Medição da temperatura	63
2.4.2 Medição da força de atrito	64
2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO	67
3 ESTUDO DE CASO	68
3.1 O CONVERSOR ELETROMECHANICO ROTATIVO	68
3.1.1 Função e localização	68
3.1.2 Características e funcionamento	70
3.2 DESGASTE ANORMAL DO COMUTADOR	74
3.2.1 Histórico e mecanismos do filetamento	75
3.2.2 Avaliação da densidade de corrente média de operação	76
3.2.3 Proposta de novas configurações (escova e pressão das molas)	78
3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO	80
4 PROCEDIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
4.1 MEDIÇÕES EM BANCADA	81
4.1.1 Procedimento para a medição prévia da temperatura no contato	82
4.1.2 Procedimento para a medição da temperatura no contato	83

4.1.3 Procedimento para a medição da força de atrito	84
4.1.4 Procedimento para a aquisição de dados e calibração.....	89
4.1.5 Procedimento padrão para a energização do conversor	90
4.1.6 Resultados das medições em bancada	91
4.2 MEDIÇÕES NA OPERAÇÃO.....	97
4.2.1 Procedimento para a medição do desgaste em operação	97
4.2.2 Análise de falhas e inspeção visual das escovas testadas	100
4.2.3 Resultados das medições de desgaste em operação	101
4.3 ANÁLISE DE DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS DE COBRE NAS ESCOVAS ...	103
4.3.1 Procedimento de aquecimento e redução.....	103
4.3.2 Resultados do procedimento de aquecimento e redução	104
4.3.3 Procedimento de análise microestrutural.....	106
4.3.4 Resultados da análise microestrutural	109
4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO	116
5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS.....	118
5.1 CONCLUSÕES.....	118
5.2 PROPOSTAS FUTURAS.....	119
REFERÊNCIAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

A engenharia propõe a aplicação de métodos científicos ou empíricos à utilização dos recursos da natureza em benefício do ser humano. Contudo, a cada dia esses recursos tornam-se mais escassos, o que contribui para o aumento de preço e, além disso, aflora o debate ético sobre a continuidade das explorações, em ritmo acelerado, utilizando as atuais tecnologias. Assim, a engenharia é desafiada a encontrar soluções não apenas simples e econômicas, que promovam o progresso humano, mas ecologicamente viáveis.

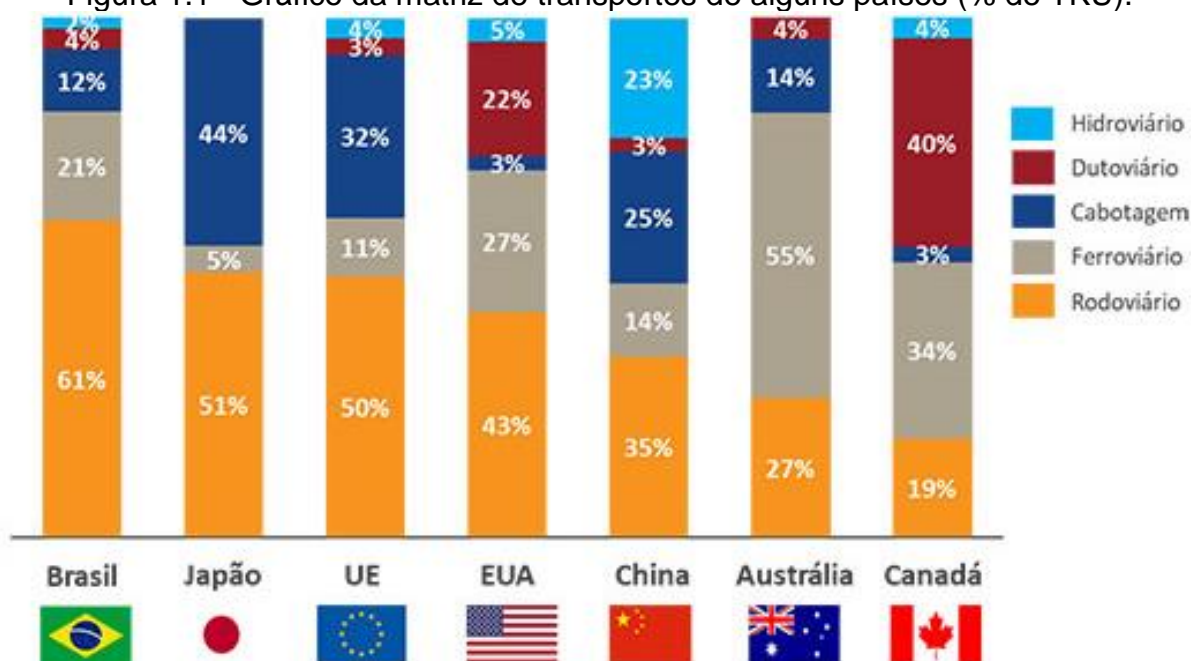
Nesse contexto, observa-se um clamor social de entidades e populações pelo uso de fontes de energia renováveis e, também, pelo aumento de eficiência dos equipamentos de uma maneira geral. No Brasil, por exemplo, percebeu-se nos últimos anos o crescimento dos parques eólicos, que possuem elevado potencial de geração, mas que representam impactos ambientais relativamente pequenos (TAVARES, 2017). Além disso, nas últimas décadas, o selo Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) tem auxiliado os consumidores brasileiros a escolher produtos energeticamente mais eficientes, aumentando a competitividade do país, postergando investimentos no setor elétrico e atenuando a emissão de gases de efeito estufa (BRASIL, 2019). No final de 2021 a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) aprovou uma série de projetos voltados à eficiência energética. O investimento de R\$13,6 milhões foi focado principalmente na iluminação pública, na implantação de sistemas fotovoltaicos, no condicionamento ambiental e na troca de motores elétricos industriais (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2022).

Considerando o uso racional das fontes de energia, destaca-se grande potencial de contribuição do setor de transportes. A eletrificação veicular, por exemplo, tem sido incentivada, principalmente nos países europeus, substituindo os veículos a combustão por carros elétricos ou híbridos até 2030, conforme tratativas do acordo de Paris (GONZALEZ, 2018). No Brasil, com o programa Rota 2030, tal seguimento tem avançado, mesmo que lentamente, graças aos incentivos fiscais concedidos as empresas automotivas (BRANDÃO, 2021).

Contudo, comparando a matriz de transporte de alguns países, exibida na Figura 1.1, percebe-se que no Brasil, que tem um território de dimensões continentais e economia

baseada na exportação de commodities, é claro o desequilíbrio percentual de TKU (tonelada quilometro útil) no transporte de cargas. A referida matriz evidencia a histórica dependência nacional no transporte rodoviário, que gera custos aproximadamente seis vezes maiores que o modal ferroviário, mais eficiente e seguro na movimentação de grandes cargas. Nesse sentido, percebe-se que as ferrovias possuem elevado potencial econômico e, também, ecológico na logística de transporte nacional; contudo, de 2010 a 2018 o investimento governamental em ferrovias encolheu em quase sete vezes, o que torna a situação desse modal ainda mais crítica (ALVARENGA, 2019).

Figura 1.1 - Gráfico da matriz de transportes de alguns países (% de TKU).



Fonte: ALVARENGA (2019)

Apesar das reduções dos investimentos no transporte ferroviário, que tem dificultado a modernização do material rodante e a expansão da via permanente nacional, esse modal é ainda um grande aliado da eficiência energética, tanto no transporte de carga quanto de passageiros, fundamentais nas grandes metrópoles brasileiras.

Analisando os exemplos elencados percebe-se que existem duas formas de atuar na melhoria da eficiência energética dos sistemas de geração, de consumo, de produção industrial e de transporte. A primeira, que em geral necessita de um maior investimento, diz respeito à modernização/troca dos equipamentos, implementando assim uma tecnologia totalmente inovadora. A segunda, que não necessariamente alcança o mesmo nível de eficiência da primeira, também lança mão de tecnologias

inovadoras, propondo a melhora da manutenção/operação dos equipamentos existentes, evitando o descarte de componentes que possuem condições de uso e, conseqüentemente, atenuando os impactos da produção de novos itens.

Este trabalho apresenta uma investigação focada na manutenção de máquinas elétricas rotativas escovadas, que são utilizadas nos sistemas de geração, consumo e no transporte (de cargas e de passageiros). Esses equipamentos possuem como um dos maiores desafios a obtenção de uma coleta de corrente satisfatória, buscando uma operação sem falhas, com perdas atenuadas e com menor desgaste possível das escovas e da pista (do comutador ou dos anéis coletores). Desta forma, dominado os mecanismos e especificidades da coleta de corrente, a melhora final de desempenho só pode ser restringida pelos limites físicos e químicos intrínsecos desse método (ROBERGE e HERON, 2019).

1.1 OBJETIVO

Tendo em vista a grande aplicabilidade da técnica de condução de corrente através de contatos deslizantes, o presente estudo investiga, na perspectiva da tribologia, os aspectos elétricos, magnéticos, mecânicos, químicos e térmicos que influenciam no desempenho em operação do contato das escovas com a pista no processo de coleta de corrente. Para tal, apresenta-se, além de uma revisão bibliográfica focalizada à comutação, um estudo de caso de um conversor eletromecânico rotativo (MCVR) do metrô de Belo Horizonte que vinha operando com desgaste anormal do comutador.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo ALZAMORA (2018), especialmente no Brasil, a frota de locomotivas em operação é composta majoritariamente por motores de tração cc; além disso, o correto funcionamento destes equipamentos é extremamente relevante, já que representam o terceiro componente de maior custo de manutenção na tração de carga ferroviária

(SIMÕES, 2019). Além da vasta aplicação em locomotivas, os motores de corrente contínua também são largamente empregados no acionamento de máquinas pesadas da indústria metal-mecânica (BORGES, 2007).

O funcionamento das máquinas cc depende, essencialmente, da comutação, no entanto, essa é apenas uma forma particular de coleta de corrente. Sendo assim, atualmente, constata-se grande aplicabilidade da tecnologia de coleta de corrente em diversos outros equipamentos. Geradores síncronos, largamente utilizados em termoelétricas e centrais hidroelétricas (LLERENA, 2011), e geradores de indução duplamente alimentados (DFIG), que representavam, até 2021, 50% das máquinas empregadas na geração eólica no mundo (BATH, 2022), são exemplos de aplicações de escovas em anéis coletores.

Atualmente, a coleta de corrente tem sido objeto de estudos inovadores na eletrificação veicular. A BMW (*Bayerische Motoren Werke*), por exemplo, anunciou, em janeiro de 2022, um motor elétrico de quinta geração que utiliza a tecnologia de anéis coletores e será montado no modelo BMW iX M60. Essa máquina de tração síncrona escovada possui elevada densidade energética, apresenta grande eficiência e, por dispensar o uso de ímãs permanentes, indica o caráter sustentável do projeto desse veículo elétrico (YOUNG, 2022).

De maneira mais ampla, é possível considerar, também, as diversas aplicações de contatos elétricos deslizantes, tais como: pantógrafos ferroviários com a catenária, CCD's (Dispositivos Coletores de Corrente) com o terceiro trilho e sapatas coletoras com barramento trifásico de pontes rolantes. Em todo caso, encontram-se diferenças significativas entre os mecanismos de condução adotados. Contudo, nas discussões deste trabalho, que destacam a coleta de corrente em máquinas elétricas rotativas, pretende-se realizar uma análise que, baseada nos fundamentos tribológicos do contato permeado por corrente elétrica, possa ser generalizada às demais aplicações.

Em geral, no projeto das máquinas escovadas são preconizados alguns parâmetros relativos ao material da escova e à pressão das molas. Contudo, durante a operação, em virtude de alterações de condições ambientais e/ou do regime de carregamento, o desempenho da comutação da configuração (material e pressão) proposta pelo fabricante da máquina pode ser insatisfatório. Nesse caso, é necessário buscar outro arranjo de escovas e/ou pressões de molas que melhor se adequem ao dado regime.

Nos catálogos dos fabricantes de escovas encontram-se diversas propriedades mecânicas, elétricas, químicas e físicas relativas aos materiais comercializados; contudo, tais parâmetros são apenas uma referência para a escolha do tipo de escova.

Comumente, considera-se como premissa a avaliação qualitativa da aparência do filme de carbono. Além disso, recomenda-se o acompanhamento do teste em operação da configuração proposta (escova e pressão das molas). Contudo, mesmo escolhendo com cuidado a qualidade da escova testada, bem como o ajuste de força das molas, é possível que durante o teste em operação ocorram falhas que justifiquem até mesmo a retirada da máquina para uma manutenção corretiva. Nesse contexto, este estudo propõe uma metodologia para estimar algumas das condições de operação, definindo o desempenho da comutação e possibilitando uma avaliação do tipo de desgaste imposto ao comutador.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Na revisão investigou-se a eficiência da coleta de corrente nas diversas máquinas elétricas, apurando os mecanismos, técnicas e especificidades que interferem no funcionamento de cada componente principal desse sistema eletromecânico. Além disso, constatou-se, ainda nos dias de hoje, a grande aplicabilidade dessa técnica.

Na sequência, percebendo que a coleta de corrente tende a ser bem mais desafiadora nos comutadores que nos anéis coletores, definiu-se como prioridade a investigação dos fenômenos relativos à comutação, considerando, porém, que esses também poderiam ser aproveitados nos anéis. Assim, atentando-se à formação e consolidação do filme de grafite, explicitaram-se os mecanismos, procedimentos e recomendações, que tem como foco a melhoria de desempenho da comutação.

Compreendendo que os distúrbios mecânicos respondem por fração significativa de falhas na operação, contribuindo, em casos de desgaste anormal, para a redução da vida útil de máquinas escovadas, propôs-se a continuidade da investigação relacionada ao desempenho da comutação, porém, sob a perspectiva tribológica.

Inicialmente, sob a ótica macro, tendo como premissa a análise empírica dos fenômenos da coleta de corrente, apresentaram-se recomendações visando a redução do atrito na comutação. Posteriormente, sob a ótica micro, adotando conceitos relacionados aos mecanismos de desgaste, fundamentou-se a maioria orientações práticas, possibilitando o uso dessas em casos mais específicos. Finalmente, buscando garantir uma maior confiabilidade no estudo de caso apresentado, investigaram-se algumas técnicas de medição consolidadas na análise mecânica do contato seco, especialmente da temperatura e do coeficiente de atrito.

O referido estudo de caso contemplou uma apresentação inicial do conversor eletromecânico rotativo, evidenciando a aplicação, as características e o funcionamento da máquina, além da descrição histórica do desgaste anormal que acometia o comutador. Realizaram-se medições e cálculos de forma a obter a densidade de corrente média da máquina. A partir desses resultados, pretendendo atenuar ou eliminar o desgaste anormal, foram propostas novas configurações de escovas e pressões para as molas.

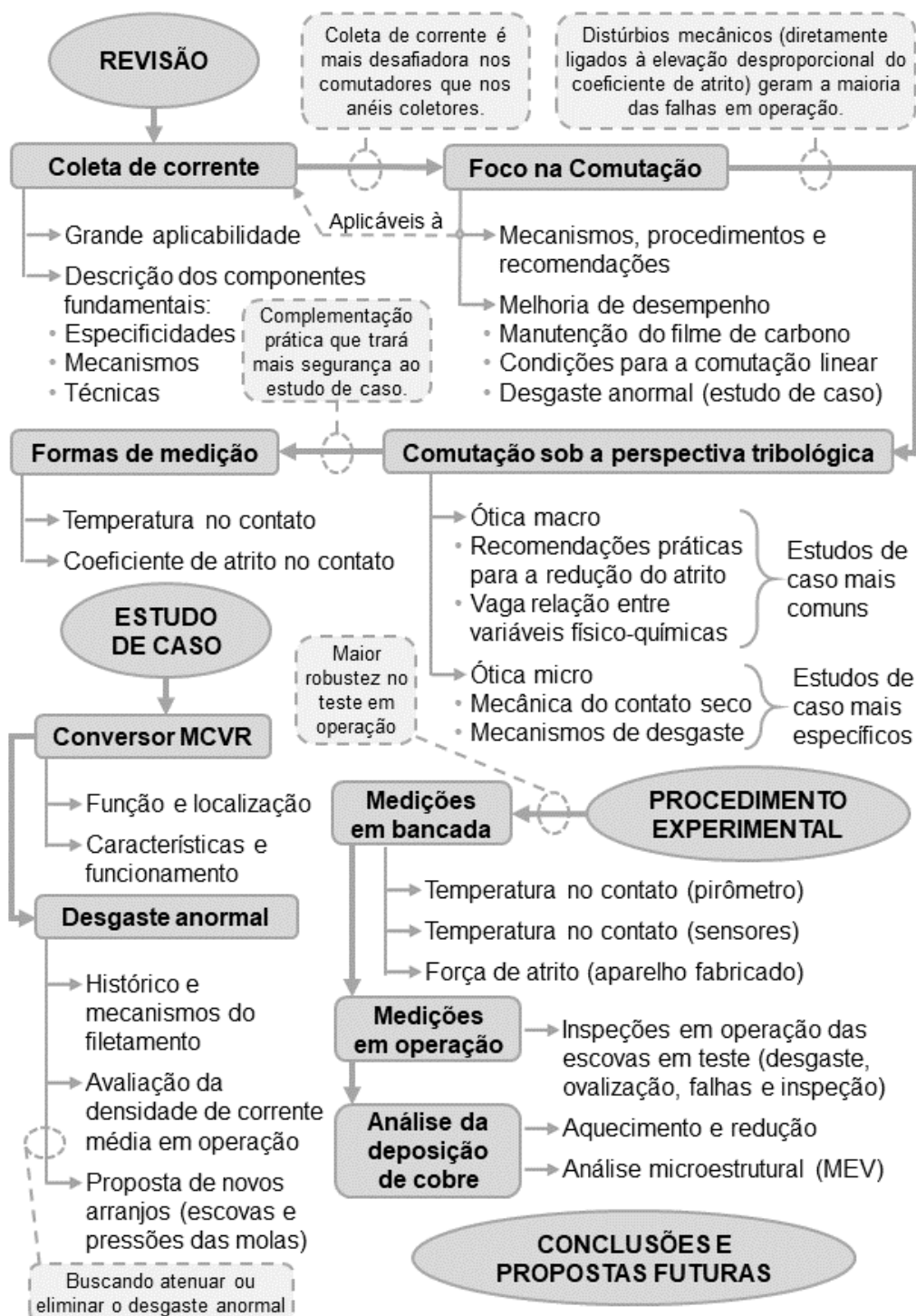
No procedimento experimental, buscando evitar falhas em operação, utilizaram-se equipamentos e confeccionaram-se dispositivos que puderam medir em bancada os valores de temperatura e força de atrito no contato de cada um dos arranjos (de escovas e pressões das molas) propostos. De posse desses resultados, definiu-se a robustez de algumas das configurações apresentadas, que foram utilizadas, subsequentemente, no teste operacional. Nesse experimento, mediram-se o desgaste das escovas e a ovalização da pista, registrando eventuais falhas de comutação e inspecionando a face de contato das escovas, comparando-as com a literatura.

Concluído o teste em operação, coletaram-se as escovas usadas em cada uma das configurações com o intuito de examinar, em todas as amostras, a deposição de partículas de cobre à face tentando detectar o início do filetamento. Primeiramente, buscando aumentar a nitidez do exame à olho nu, realizou-se o procedimento de aquecimento e redução do cobre, revelando-o em cores claras.

Na sequência, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV), obtiveram-se imagens da face de contato das escovas coletadas que, além de apresentarem significativa ampliação, possibilitaram o uso da técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), gerando uma análise semiquantitativa da composição de pontos específicos das amostras e favorecendo na investigação acerca do desgaste anormal.

Ao final, concluiu-se acerca das reais causas do filetamento, definindo também o arranjo com o melhor desempenho na atenuação/eliminação desse tipo de desgaste anormal. Além disso, elencou-se algumas propostas para a continuidade do trabalho. De maneira ilustrativa, na Figura 1.2 exibe-se o fluxograma estrutural utilizado nesta dissertação.

Figura 1.2 - Diagrama de blocos - organização esquemática do texto.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A COLETA DE CORRENTE EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

As máquinas elétricas rotativas, quando em operação motora, são capazes de converter uma determinada quantidade de energia elétrica (fluxo de potência do barramento para a máquina) em mecânica (conjugado acelerante); por outro lado, quando em operação geradora, esses equipamentos absorvem certa quantidade de energia mecânica (conjugado frenante) e transformam-na em energia elétrica (fluxo de potência da máquina para o barramento). Em ambos os casos, porém, a conversão acarreta necessariamente em perdas (magnéticas, elétricas e mecânicas) que atenuam o rendimento do sistema eletromecânico.

De maneira geral, as máquinas elétricas rotativas podem ser classificadas em quatro grupos distintos: máquinas assíncronas (indução), máquinas síncronas, máquinas de corrente contínua e máquinas especiais. Em todos os casos, contudo, destacam-se essencialmente o estator (conjunto de elementos fixados à carcaça da máquina) e o rotor (conjunto de elementos, internamente ao estator, fixados em torno do eixo) (BORGES, 2007). Naturalmente, quando demandado, a energização das bobinas do estator pode ser realizada através da conexão do barramento com a caixa terminal; entretanto, se houver necessidade de ligação elétrica com os enrolamentos do rotor, o acesso só poderá ser feito através do uso de escovas, comutadores e/ou anéis coletores.

A coleta de corrente, técnica que possibilita acesso aos terminais do rotor de alguns tipos de máquinas, possui múltiplas variáveis físicas e químicas que, conjuntamente, afetam significativamente a operação dos equipamentos. De certa forma, o desempenho dos contatos deslizantes de uma máquina escovada possui grande influência no rendimento, na potência de saída, na vida útil das escovas e na durabilidade do comutador e/ou anéis coletores (VAUQUELIN *et al.*, 2008). Na sequência, distinguem-se os principais componentes, mecanismos e fenômenos característicos da coleta de corrente:

2.1.1 Escovas

Nas primeiras máquinas elétricas, quando demandada, a coleta de corrente era realizada através de escovas constituídas de uma espécie de tela de latão e/ou cobre que, após prensada no formato escolhido, deslizava nos anéis coletores ou no comutador estabelecendo o contato elétrico necessário. As telas metálicas, que marcaram o uso do termo “escovas elétricas”, por apresentarem baixíssima resistividade, geravam centelhamento destrutivo, riscando a superfície da pista e inutilizando rapidamente os anéis coletores e/ou comutadores com pouco tempo de funcionamento. Posteriormente, na iminência de se abandonar a coleta de corrente, descobriu-se que o carvão utilizado em baterias e em lâmpadas de arco voltaico se adaptava muito bem a essa aplicação (ARIZA, 1977).

Conhecido por suas propriedades lubrificantes, há mais de um século o grafite natural, juntamente com outros compostos de carbono, vem sendo utilizados na condução de corrente às partes rotativas de máquinas elétricas. Outros atributos relevantes desse tipo de material são: baixa densidade, estabilidade em altas temperaturas (até 3000°C) e, diferentemente dos metais, quando submetido a um arco elétrico, não apresentam o efeito de solda (BORGES, 2007).

Considerando as diferentes máquinas elétricas existentes, operando com cargas variadas, instaladas em ambientes diversos e submetidas a todo tipo de adversidade, faz-se necessário que haja qualidades específicas de escovas que alcancem a melhor desempenho em cada caso. No mercado, existem alguns fabricantes de escovas que obtêm materiais (*grades*) otimizados a partir da combinação de uma série de matérias primas, tais como: grafite natural e artificial, coque de petróleo e de carvão, negro de fumo, alcatrão, piche, resina, cobre, prata, chumbo, estanho etc. Cada *grade*, projetado a partir de pesquisas e do conhecimento industrial de cada fabricante, varia em composição, proporção e tratamento dependendo da aplicação.

Tendo em vista a composição, o processo de fabricação, os aspectos típicos e as principais aplicações no universo das máquinas elétricas, discriminam-se as escovas comercializadas em pelo menos quatro classes principais, conforme é exibido na Tabela 2.1. Porém, dependendo do fabricante e do nicho de aplicação, existem classes específicas de escovas que não foram elencadas na referida tabela.

Tabela 2.1 - Classes de escovas mais comuns.

CLASSE	COMPOSIÇÃO	FABRICAÇÃO	ASPECTOS	APLICAÇÕES
GRAFÍTICAS	Grafite em pó (natural purificado ou artificial) + agente ligador (resina)	Mistura, prensagem, cozimento (coqueificação total ou parcial do ligante)	Macias, lubrificantes, plásticas, condutivas e de trabalho silencioso	Máquinas com alta velocidade, em geral usadas em anéis coletores ou comutadores recortados
CARBOGRAFÍTICAS	Grafite em pó (natural purificado ou artificial) + carvão mineral + agente ligador (resina)	Mistura, prensagem, cozimento de 816°C a 1538 °C (coqueificação total ou parcial do ligante)	Duras, com boa comutação em condições adversas, polidora e de elevada resistência mecânica	Máquinas com baixa velocidade e pequena densidade de corrente, em geral de corrente contínua com mica à face
ELETROGRAFÍTICAS	Grafite em pó (natural purificado ou artificial) + carvão mineral + agente ligador (resina)	Mistura, prensagem, cozimento de 2300°C a 2800 °C (coqueificação transforma o carvão de base em grafite artificial)	Perdas reduzidas, boa comutação, ótima lubrificação (robustez do carbono somada à lubrificação do grafite)	Máquinas com elevada velocidade, independente da tensão, em geral usada em motores de tração, laminadores e geradores
METÁLICAS	Grafite em pó (natural ou artificial) e/ou carvão mineral e/ou agente ligador + cobre, prata, estanho e/ou chumbo	Mistura, prensagem e cozimento sob pressão controlada (sinterização) ou impregnação de metal fundido nos poros do composto de carbono	Densas, com formação de filme, coeficiente de atrito, resistividade e queda no contato muito baixos	Máquinas lentas, de baixa ou extra baixa tensão e com elevada densidade de corrente, em geral usadas em anéis coletores de bronze ou aço

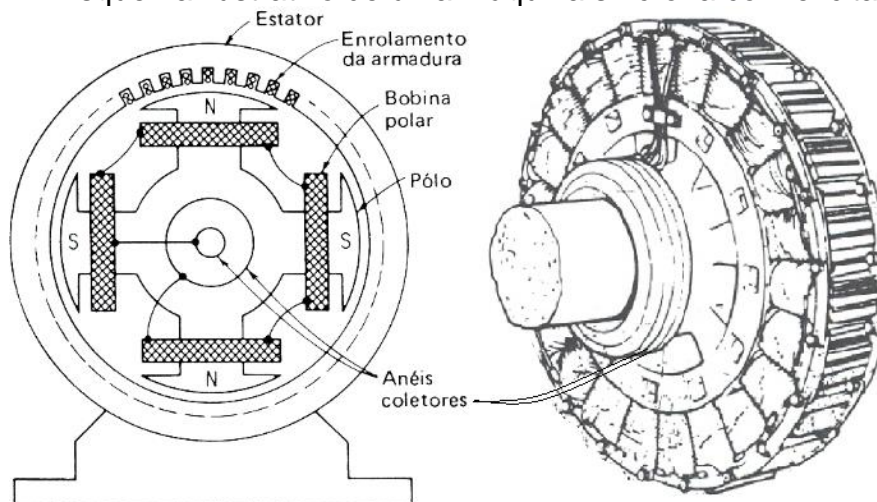
Fontes: Adaptado de ARIZA(1977), BRANÇAN (1987) e GROUPE CARBONE LORRAINE (2000)

2.1.2 Anéis coletores

Nas máquinas síncronas convencionais, muito utilizadas em centrais hidroelétricas e termoelétricas, o campo magnético produzido no rotor pode ser excitado e regulado em corrente contínua. Nesse caso, utiliza-se, por exemplo, escovas que deslizam

sobre dois anéis coletores, ilustrados na Figura 2.1. Em alguns projetos, existe também a possibilidade de inverter os circuitos de campo e armadura, posicionando o primeiro no estator e o segundo no rotor; contudo, geralmente o circuito de carga requer maior nível de isolamento e apresenta densidade de corrente superior em relação ao circuito de campo, o que torna a coleta de corrente ainda mais desafiadora.

Figura 2.1 - Esquema ilustrativo de uma máquina síncrona com excitação direta.



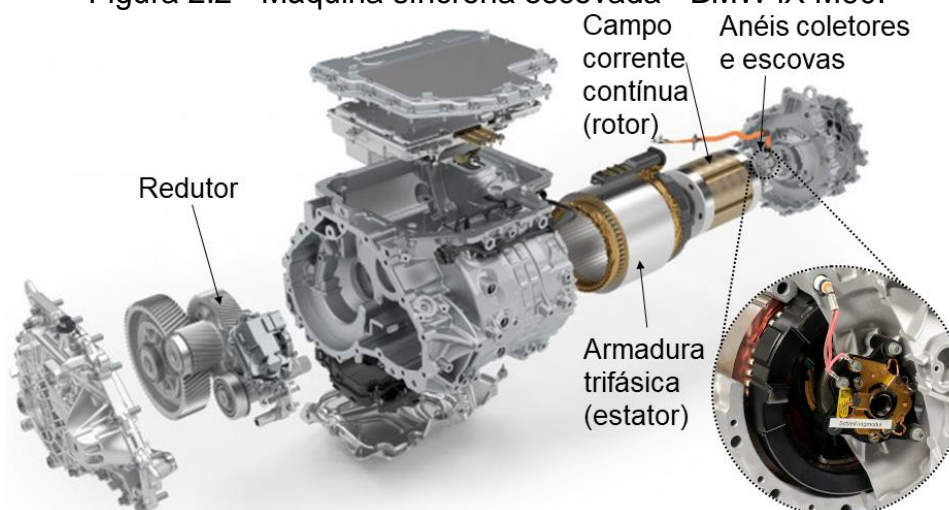
Fonte: PINHEIRO (2007, p. 4 e p. 6)

Uma outra possibilidade é a excitação sem escovas (*brushless*); nesse caso, utiliza-se uma excitatriz (armadura trifásica rotativa e campo estacionário) acoplada ao eixo da máquina síncrona, juntamente com uma roda de diodos (retificador de onda completa). Considerando a rotação do conjunto, o campo estacionário controla a tensão induzida na armadura rotativa que, após retificada, alimenta com corrente contínua o campo da máquina síncrona. A aplicação direta de corrente contínua no campo, através de escovas e anéis coletores, segundo ilustrado na Figura 2.1, confere à máquina síncrona menor tempo de resposta na recuperação de tensão, fator fundamental na geração de energia elétrica. Por outro lado, essa tecnologia exige troca periódica de escovas e manutenções eventuais nos anéis e porta escovas; além disso, dada a possibilidade de faiscamento, a excitação direta é desaconselhável para cargas sensíveis a ruídos (telecomunicações) e proibida em atmosferas explosivas.

A coleta de corrente através de anéis tem uso, inclusive, na eletrificação veicular. Recentemente, a BMW anunciou um motor de quinta geração (modelo BMW iX M60), exibido na Figura 2.2. Esta é uma máquina de tração trifásica síncrona sem ímãs permanentes, de elevada densidade energética, que possui nominalmente 355,3 kW de potência e um torque de 1015,5 Nm. O projeto dispensa o uso de metais de terras

raras, recorrendo à tecnologia de anéis coletores para alimentar o campo com corrente contínua. Segundo a BMW, a ideia é um pouco antiquada e extremamente *high-tech*, já que utiliza um método antigo associado a tecnologias de ponta no desenvolvimento de materiais e vedações, com o intuito de prolongar a vida útil do sistema e impedir a contaminação (por pó de escovas) de outras partes da máquina (YOUNG, 2022).

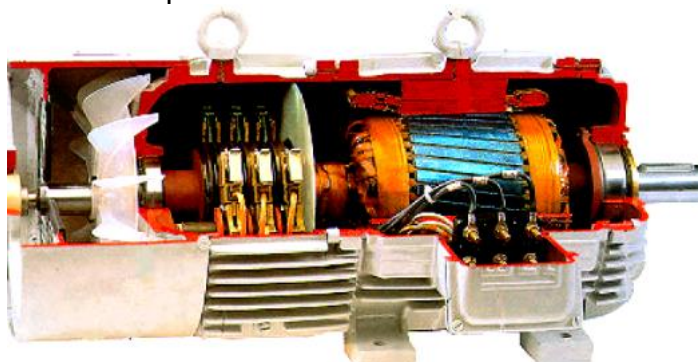
Figura 2.2 - Máquina síncrona escovada - BMW iX M60.



Fonte: Adaptado de YOUNG (2022)

Os anéis coletores também podem ser usados na construção de máquinas de indução com acesso aos terminais do rotor trifásico bobinado. Nesse tipo de máquina, mostrada na Figura 2.3, considerando a operação motora, é possível inserir reostatos no circuito do rotor de forma a atenuar a corrente de partida (graças ao aumento do fator de potência), possibilitando, inclusive, o ajuste da velocidade. Outro cenário, considerando a operação geradora em velocidade inconstante, é alimentar o rotor em frequência variável, através de um inversor, com o intuito de induzir tensão em frequência e amplitude comercial constante, conforme observa-se na geração eólica.

Figura 2.3 - Máquina assíncrona - rotor bobinado acessível.



Fonte: PINHEIRO (2007, p. 26)

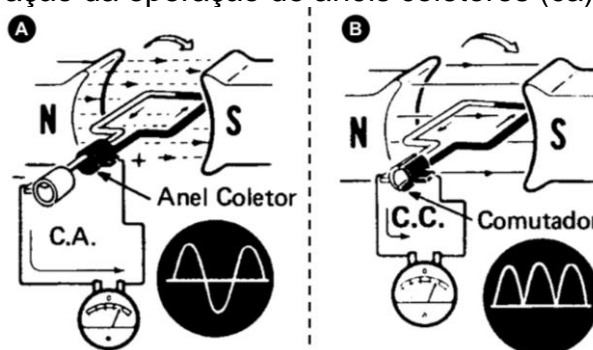
O acesso, feito através de anéis e escovas, aos terminais das bobinas trifásicas do rotor da máquina assíncrona, ilustrada na Figura 2.3, possibilita a conexão de um conversor de frequência ao rotor, ao invés do estator; desse modo, reduz-se o custo dos equipamentos na instalação, visto que o rotor processa uma potência menor, cerca de 30 % da potência total da máquina assíncrona (TAVARES, 2017).

De maneira análoga aos anéis, a coleta de corrente também pode acontecer em discos rotativos de latão ou bronze, que são patinados por escovas metálicas. Essa tecnologia é muito utilizada no transporte ferroviário de passageiros, independente da alimentação das máquinas de tração (cc ou ca), nos dispositivos de retorno de corrente dos TUE's (Trem-Unidade Elétrico). Essa forma particular de coleta de corrente em discos será abordada, com maior ênfase, no item 3.1.2 deste trabalho.

2.1.3 Comutador

O uso de anéis coletores restringe-se à transmissão de corrente entre estator e rotor; a coleta de corrente, contínua ou alternada (ca), ocorre numa superfície constante (no sentido circunferencial em todo o perímetro do anel) e equipotencializada, sem abertura e fechamento de contatos. Em alguns casos a troca de polaridade (sentido da corrente) ocorre exclusivamente pela característica senoidal da tensão aplicada do barramento ou induzida pela própria máquina, segundo exibido na Figura 2.4A.

Figura 2.4 - Ilustração da operação de anéis coletores (ca) e comutador (cc).



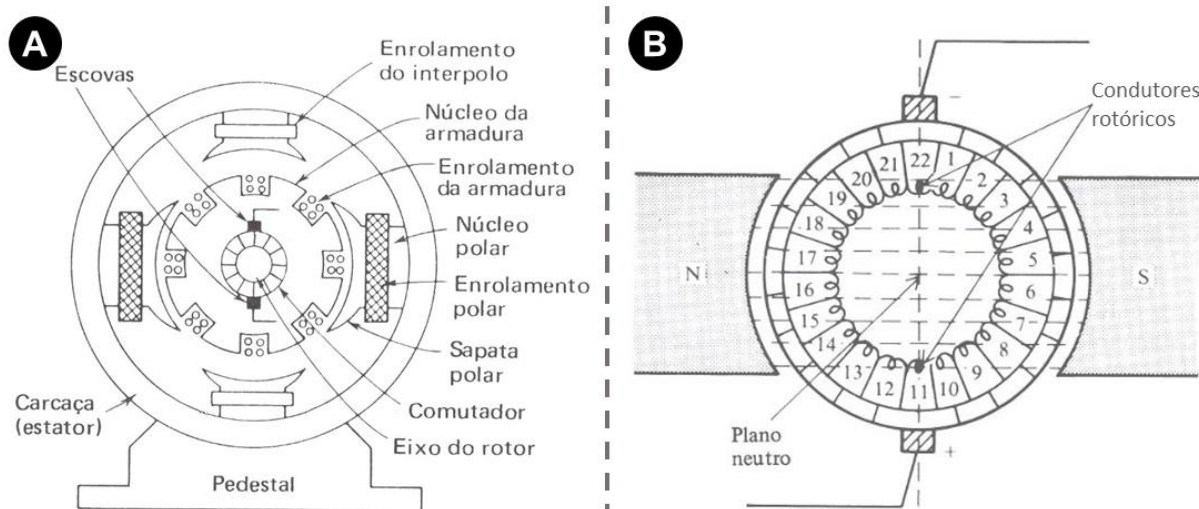
Fonte: PINHEIRO (2007, p. 1)

Por outro lado, no caso dos comutadores, vinculados intimamente ao funcionamento das máquinas de corrente contínua, em geral, são substancialmente maiores os desafios elétricos, magnéticos e mecânicos da coleta de corrente, denominada

particularmente de comutação. Nessas máquinas, ilustradas esquematicamente na Figura 2.5A, a polaridade magnética de cada sapata polar influi na direção da força eletromotriz induzida e, portanto, no sentido da corrente implementada nos condutores da armadura.

Naturalmente, com o giro do enrolamento de armadura, toda vez que os condutores passam da influência de um polo para o subsequente, a força eletromotriz e também as correntes das espiras rotóricas precisam inverter o sentido. Assim, considerando a operação geradora, ilustrada na Figura 2.4B, a conexão elétrica entre o enrolamento rotórico da armadura e o estator, requer um mecanismo (comutador) que converta a força eletromotriz induzida e a corrente da armadura, ambas alternadas, em grandezas unidirecionais (contínuas). Analogamente, supondo a operação motora, o mesmo mecanismo deve ser capaz de converter a alimentação contínua (tensão e corrente) em alternada, antes de transferir essa energia aos enrolamentos da armadura (ROBERGE e HERON, 2019).

Figura 2.5 - Esquema de uma máquina cc com foco no comutador.

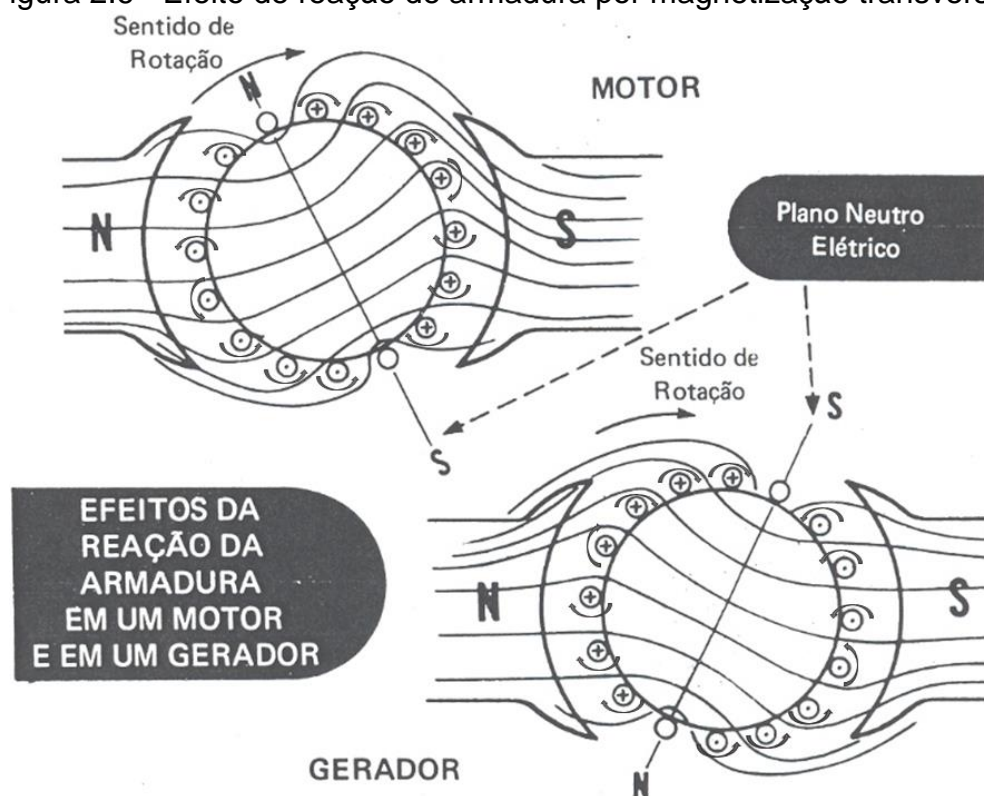


Fonte: Adaptado de VILLAR (2006, p. 6 e p. 21)

Na máquina cc, o ponto ideal para realizar a inversão de sentido da corrente, ou seja, para posicionar as escovas de forma a realizar o curto circuito entre bobinas vizinhas buscando obter centelhamento nulo ou mínimo, é à meia distância entre polos adjacentes (zonas interpolares); no dito plano neutro ou de comutação, exibido na Figura 2.5B, quase nenhuma tensão pode ser induzida nos condutores da armadura. Contudo, mesmo posicionando as escovas no plano de comutação é preciso considerar a distorção do campo estático, que é gerada pela interação desse com o

campo da armadura em movimento. O chamado efeito de reação de armadura por magnetização transversal distorce o campo principal, subtraindo fluxo resultante do entreferro em uma metade do polo e aumentando na outra metade (FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO, 1975). Tal qual exhibe-se na Figura 2.6, a reação de armadura acaba torcendo a zona neutra no sentido coincidente ou oposto à rotação, dependendo da configuração adotada (geradora ou motora).

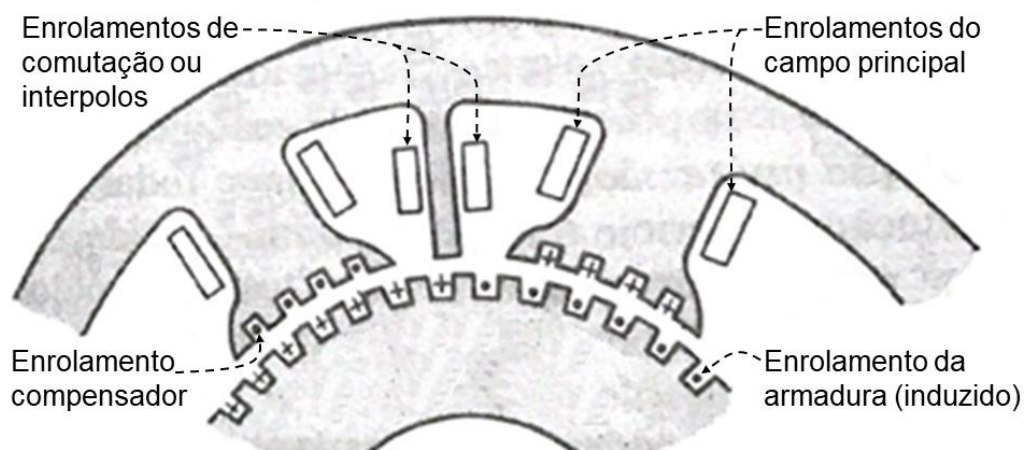
Figura 2.6 - Efeito de reação de armadura por magnetização transversal.



Fonte: Adaptado de VILLAR (2006, p. 24)

Com o intuito de mitigar o faiscamento, é necessário, portanto, reajustar a posição das escovas para o plano neutro elétrico, conforme mostrado na Figura 2.6. Contudo, independente da configuração adotada (motora ou geradora) é muito comum que a aplicação exija mudanças de carregamento na máquina, o que leva à variação da amplitude da corrente de armadura e, conseqüentemente, à movimentação do plano de comutação. Para lidar com esse problema, no projeto de algumas máquinas, geralmente de médio ou grande porte, prevê-se ainda, conforme exibido na Figura 2.7, os enrolamentos de interpolos (ou de comutação) e/ou enrolamentos compensadores que, submetidos à mesma corrente do induzido (com polaridade subtrativa), são responsáveis por contrapor o efeito de reação de armadura, reposicionando o plano neutro exatamente no meio dos polos principais da máquina.

Figura 2.7 - Enrolamento de comutação e compensador.



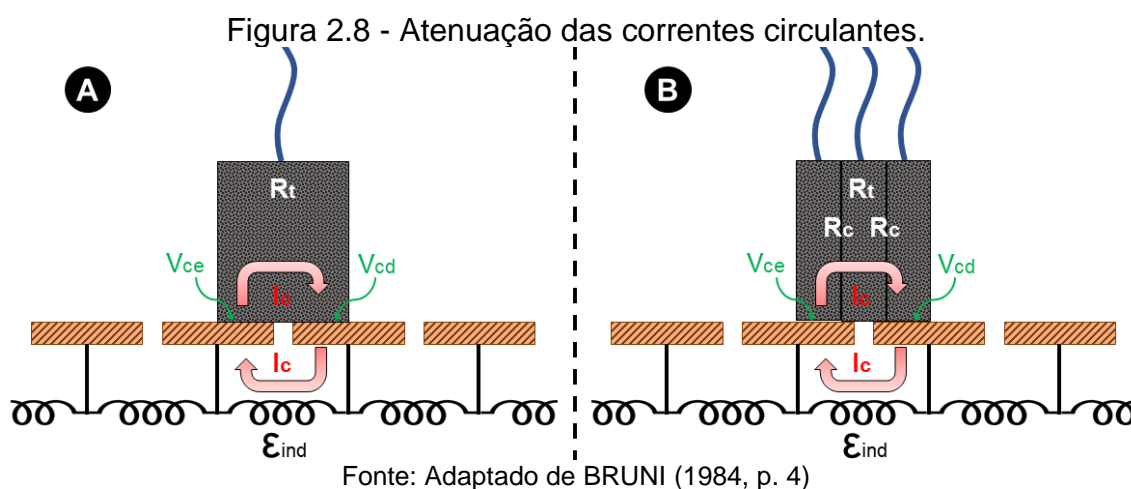
Fonte: Adaptado de FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO (1975, p. 240)

Nas zonas interpolares, os enrolamentos de comutação buscam contrariar a distorção do plano neutro de maneira proporcional ao carregamento; no sentido da rotação implementada, a polaridade desses enrolamentos auxiliares deve ser idêntica à do polo principal seguinte, no caso de operação motora ou oposta, no caso da configuração geradora. Observando novamente a Figura 2.6, percebe-se que, escolhendo corretamente a polaridade da sapata de comutação, haverá atenuação de linhas de fluxo nas zonas interpolares com excesso e estímulo à implementação dessas linhas nas regiões defasadas.

Nos casos em que a máquina cc for submetida à sobrecargas duradouras, a mudanças rápidas de carregamento e/ou ao funcionamento com campo principal enfraquecido, a correção da distorção magnética propiciada pelo enrolamento de comutação no espaço interpolar pode ser insuficiente. Especificamente, considerando uma bobina do induzido que passa pelos centros das sapatas polares e, dada a elevada distorção eletromagnética imposta ao entreferro dos polos principais pela reação de armadura, experimenta uma tensão induzida excessiva. Geralmente, essa tensão elevada rompe a rigidez do ar entre lâminas, ocasionando um curto circuito destrutivo que, em alguns casos, pode se espalhar por todo o comutador. Com o intuito de diminuir variações bruscas no fluxo do entreferro do polo principal, empregase o enrolamento compensador, fixo em ranhuras na face das sapatas polares principais e com polaridade sempre oposta ao enrolamento de armadura adjacente, conforme exibido na Figura 2.7 (FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO, 1975).

O uso do enrolamento de comutação e/ou compensador depende normalmente da aplicação e do porte da máquina. Em alguns projetos, seja pela necessidade de

redução de custos ou pela severidade das condições de operação do equipamento, não é possível neutralizar totalmente o efeito de reação de armadura por magnetização transversal. Nesse caso, segundo ilustrado na Figura 2.8, considerando especificamente a tensão de reatância residual (\mathcal{E}_{ind}), induzida nas bobinas da armadura no momento da inversão de polaridade dos condutores rotóricos, recomenda-se a elevação da resistência transversal das escovas (R_t), de forma a atenuar as correntes circulantes (I_c) e, conseqüentemente, o faiscamento (efeito prejudicial à coleta de corrente que será abordado no item 2.2.2) suscitado pelo curto-circuito de lâminas adjacentes com potenciais diferentes.



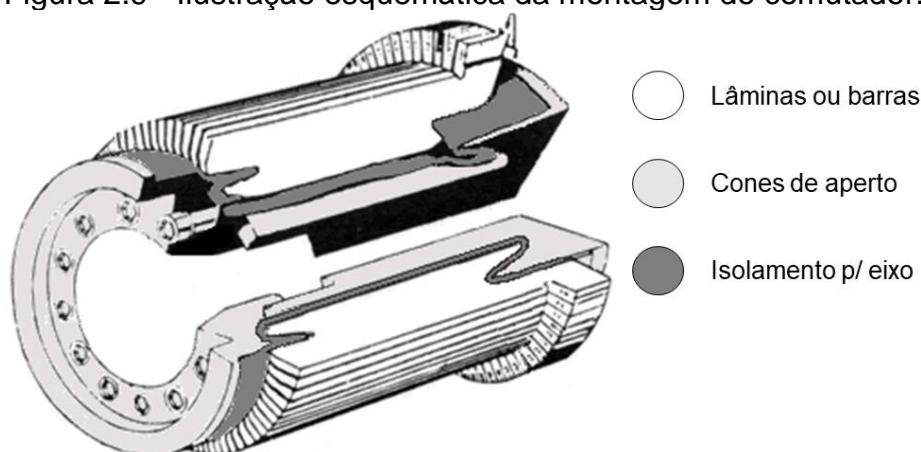
Buscando a elevação da resistência transversal (R_t) para atenuar as correntes circulantes (I_c) pode-se, por exemplo, aumentar a resistividade do *grade* adotado; nesse caso, tal qual exibido na Figura 2.8A, de maneira correlata, observa-se também a elevação das quedas de tensão no contato na lâmina esquerda (V_{ce}) e direita (V_{cd}). Outra estratégia bastante comum é utilizar escovas multipartidas, mostradas na Figura 2.8B, assim, acrescentam-se resistências de contato entre as seções de carbono (R_c), que contribuem ainda mais na atenuação das correntes circulantes. Mecanicamente, escovas multipartidas também apresentam, em geral, melhor desempenho que as monobloco, visto que se adaptam melhor à comutadores irregulares, o que favorece ainda mais na mitigação do faiscamento (BRUNI, 1984).

Ademais, também no aspecto mecânico, a comutação mostra-se mais adversa, visto que os anéis, geralmente fabricados em aço, latão ou bronze, possuem um projeto mais simples, ilustrado na Figura 2.1, com uma superfície uniformemente cilíndrica que facilita o deslizamento das escovas. Por outro lado, com um projeto mais desafiador, o comutador é constituído de um conjunto de lâminas de cobre,

conectadas individualmente ao enrolamento de armadura e dispostas radialmente no entorno do eixo; essas barras, são isoladas entre si, do próprio eixo e do pacote de chapas do núcleo por mica, fibra de vidro, resina e outros materiais isolantes.

Segundo a técnica tradicional, exemplificada na Figura 2.9, cada lâmina de cobre do comutador apresenta em sua base o formato trapezoidal, conhecido como rabo de andorinha, que é fixada pelo aperto, realizado por parafusos no sentido axial do induzido, entre dois cones de aço móveis. Esse tipo de fixação, aliada à ação aderente de resinas, confere ao conjunto rigidez mecânica suficiente para suportar a força centrífuga, resultante da velocidade imposta à armadura. Com o uso da máquina por um longo tempo, é comum que haja uma pequena perda de volume na massa isolante que envolve as barras de cobre; portanto, indica-se a conferência do torque (46 Nm) à quente (135 °C) dos parafusos que apertam os cones, garantindo assim a centralidade e a fixação do comutador a cada revisão geral (COBRASMA, 1984).

Figura 2.9 - Ilustração esquemática da montagem do comutador.



Fonte: Adaptado de BRANÇAN (1987, p. 24)

Com certo tempo de uso do comutador ocorrem deformidades nas faces superiores das lâminas, o que torna a pista excêntrica e/ou irregular; além disso, com o desgaste do cobre, é natural que haja a redução de profundidade da mica no entre lâminas, que impacta negativamente na limpeza do pó de carbono residual e na refrigeração dos canais. No caso de projetos de máquinas com mica à face, o desgaste das barras é ainda mais grave, pois acaba resultando numa superfície com proeminências isolantes, que perturba a estabilidade das escovas e dificulta muito a comutação.

Portanto, em comparação com a coleta de corrente nos anéis, percebe-se que são muito maiores os desafios elétricos e magnéticos e mecânicos impostos aos comutadores. Assim, propõe-se um estudo com maior enfoque na comutação.

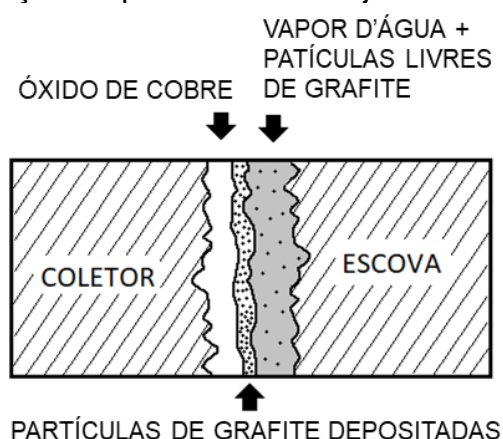
2.2 OS FENÔMENOS DA COMUTAÇÃO

Conforme apresentado, sob diversos aspectos, a coleta de corrente é bem mais desafiadora nos comutadores que nos anéis coletores, portanto, neste trabalho, define-se como prioridade a investigação dos fenômenos relativos à comutação; contudo, todos os mecanismos, procedimentos e recomendações, que tem como foco a melhoria de desempenho da comutação, também podem ser aproveitados para a coleta de corrente nos anéis e demais aplicações de contatos deslizantes.

2.2.1 Formação e conservação do filme

O comutador da máquina cc deve ser coberto por uma fina película de grafite, com a espessura de aproximadamente $0,02\mu\text{m}$ (BORGES, 2007). O filme, também chamado de pátina, exibido na Figura 2.10, é formado por óxido de cobre (75 %), partículas de grafite depositadas e livres (15 a 20 %), contaminação (5 %) e uma pequena, mas importante quantidade de vapor de água (ROBERGE e HERON, 2019).

Figura 2.10 - Ampliação esquemática do conjunto comutador/filme/escova.



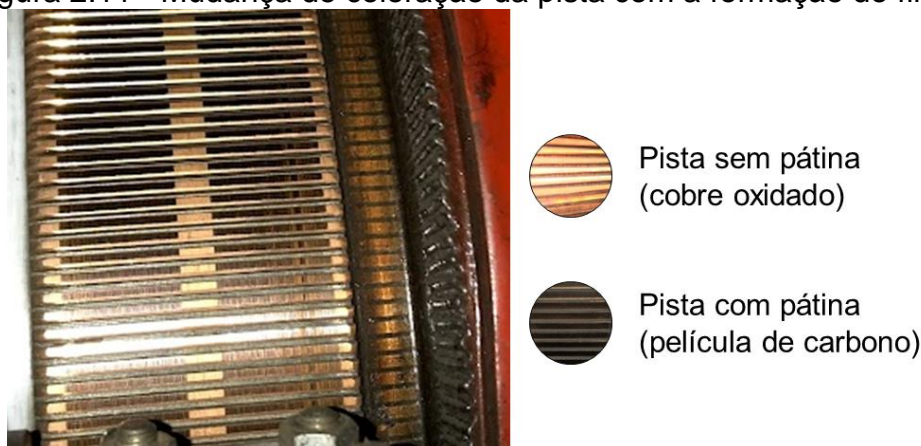
Fonte: Adaptado de ARIZA (1977, p. 92)

O desempenho elétrico da comutação depende do grafite depositado à pista, oriundo das escovas, e dos óxidos cúpricos, formados e regenerados a partir do cobre da base e do oxigênio disponível no ar, que garantem a estabilidade físico-química da película. Por outro lado, a umidade da atmosfera de comutação, juntamente com o grafite

depositado, é responsável pela atenuação do atrito e, conseqüentemente, pelo desempenho mecânico da coleta de corrente. Enfim, salienta-se que a sinterização dos elementos que constituem o filme depende, fundamentalmente, da densidade de corrente implementada no contato, já que a sedimentação do carbono na pista se baseia no processo de eletrólise (GROUPE CARBONE LORRAINE, 2000).

Considerando um comutador novo ou reconicionado (sem nenhuma partícula de grafite depositada), iniciado o fluxo de corrente, constata-se que o tempo para a formação integral do filme pode variar entre determinadas horas e alguns dias (BRANÇAN, 1987). A presença do filme pode ser constatada através da mudança de coloração da superfície do comutador, expressa na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Mudança de coloração da pista com a formação do filme.



Fonte: Autor (2022)

A lubrificação sólida promovida pelo filme já consolidado reduz substancialmente o coeficiente de atrito e, portanto, o desgaste das escovas e do comutador. Tal película, por ser eletricamente mais resistiva do que o cobre, contribui na mitigação das correntes circulantes, exibidas na Figura 2.8, dado o aumento das quedas de tensão no contato entre as escovas e as lâminas do comutador.

A pátina propicia ao comutador maior robustez na comutação, entretanto é extremamente vulnerável à escolha errada da granulação da escova, ao excesso ou ausência de umidade e a contatos perigosos, que são substâncias danosas ao filme, muito comuns no ambiente industrial, tais como: vapores ácidos, óleos, graxas, poeiras, detergentes, álcoois, cetonas, fumaça de cigarro e amônias (ARIZA, 1977). Com o intuito de proteger o comutador e preservar a pátina, recomenda-se a escolha da classe das escovas, apresentadas sinteticamente na Tabela 2.1, em função do nível de contatos perigosos.

A primeira opção, para ambientes pouco contaminados, é utilizar um carbono simples, que seja capaz de desenvolver um filme consistente. Se houver dificuldade na consolidação da pátina, em atmosferas com contaminação leve ou moderada, uma segunda opção é modificar o material da escova, impregnando a estrutura de carbono com resina. Se, em último caso, a contaminação for excessiva, é necessário aplicar escovas de classe abrasiva, que possuem agentes de limpeza, impregnados ou adicionados no material base, responsáveis por polir suavemente o comutador, removendo a contaminação pesada. Contudo, deve-se ter cuidado no uso de escovas abrasivas, pois sua ação deve remover a contaminação superficial, e não o cobre subjacente (ROBERGE e HERON, 2019).

Além de observar os níveis de contaminação, para a escolha do tipo de escova adequado, é necessário avaliar também a umidade da atmosfera de comutação, já que disponibilidade de vapor e água está intimamente ligada à capacidade de fixação do carbono na superfície do comutador (BORGES, 2007). Sendo assim, em ambientes mais secos deve-se optar por qualidades de escovas que tenham maior propensão à formação de filme, garantindo a operação com o mínimo desgaste do comutador. Por outro lado, em casos de excesso de umidade, é recomendado o uso de escovas com menor tendência de formar pátina, pois o excesso de filme tende a elevar de maneira descontrolada a queda de tensão no contato que, por consequência, pode levar ao centelhamento destrutivo.

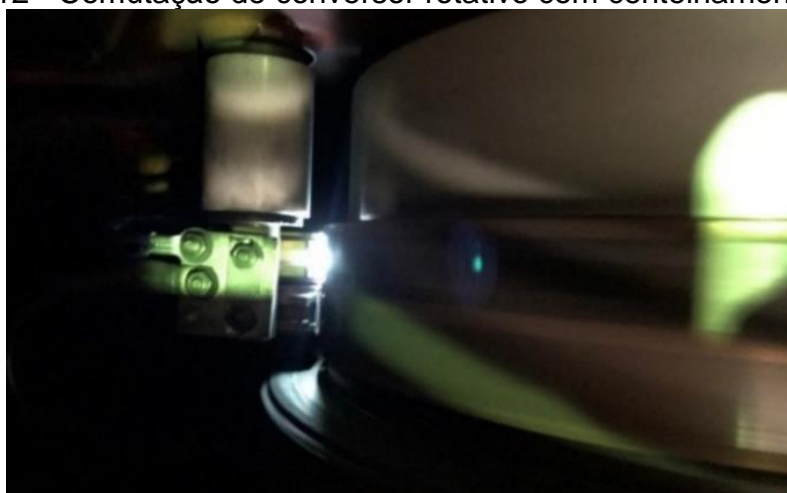
2.2.2 Condições para a melhora do desempenho da comutação

Define-se uma boa comutação como o resultado da interação complexa entre geometria mecânica, condições ambientais, propriedades químicas e físicas do conjunto eletromecânico (ROBERGE e HERON, 2019). Os aspectos mais relevantes relacionados a melhora do desempenho podem ser elencados como: ausência de centelhamento, uniformidade do filme, condição das escovas, intensidade do ruído, vida útil das escovas, perdas mínimas na comutação e o mínimo desgaste do comutador (ARIZA, 1977). Na sequência, descreve-se cada uma dessas condições.

Ausência de centelhamento

O centelhamento, conforme exibido na Figura 2.12, é indício de graves problemas na máquina; esse sinal, pode ser provocado por condições mecânicas deficientes, tais como: vibrações (oriundas ou não da máquina), defeitos no comutador (desgaste irregular, rugosidade inadequada, mica saliente, excentricidade, entre outros) e/ou pressões de mola incompatíveis com o regime de operação. Além disso, segundo explicado no item 2.1.3, o faiscamento pode ser causado por condições elétricas (sobrecarga ou elevação das correntes circulantes, ilustradas na Figura 2.8) e magnéticas (desalinhamento do plano neutro).

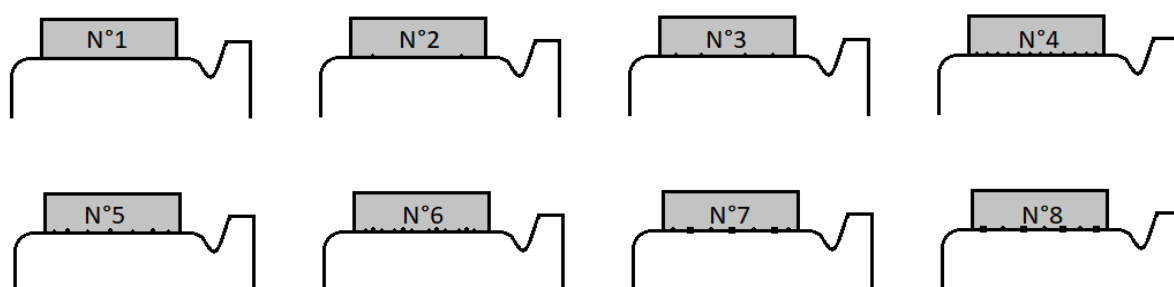
Figura 2.12 - Comutação de conversor rotativo com centelhamento intenso.



Fonte: AUTOR (2019)

É usual definir o nível de centelhamento em operação para que seja observada a progressão do problema durante o rastreamento do equipamento. Dependendo do projeto magnético da máquina, da densidade de corrente, dos fatores mecânicos de operação e da contaminação da atmosfera de comutação, algum faiscamento é tolerável e pode ser discriminado conforme exibido na Figura 2.13 e na Tabela 2.2 da norma *Japanese Industrial Standards (JIS)*.

Figura 2.13 - Faiscamento conforme norma JIS.



Fonte: Adaptado de BRANÇAN (1987, p. 30)

Tabela 2.2 - Graduação do faiscamento conforme norma JIS.

Nº	Descrição do faiscamento
1	Ausência de faiscamento
2	Faiscamento de pouca intensidade com 2 estrelas
3	Faiscamento de pouca intensidade com 3 e 4 estrelas
4	Faiscamento de pouca intensidade em toda a área de contato
5	Faiscamento de intensidade média com 2 projeções sem intensidade e intermitente
6	Faiscamento de intensidade média com várias projeções sem intensidade e intermitente
7	Faiscamento de intensidade alta, várias projeções com intensidade alta e constante
8	Faiscamento de intensidade alta, projeções importantes e constantes

Fonte: Adaptado de BRANÇAN (1987, p. 30)

Inicialmente, a elevada temperatura do faiscamento é extremamente danosa ao filme, na sequência, com a pátina comprometida, o ataque ao cobre é inevitável (erosões elétricas (B2, B6, B8 e B10) exibidas na Figura 2.15), o que piora ainda mais as condições da comutação. Assim que o faiscamento inicia, o valor da queda de tensão no contato cresce com a queima da pista, gerando um processo de realimentação do surto que, se não combatido, pode gerar falhas na máquina e danos sérios à pista.

Uniformidade do filme e condição das escovas

Durante a operação, acompanhar quantitativamente a formação, consolidação e desempenho do filme é quase sempre impossível; a inspeção qualitativa da aparência da pátina surge, portanto, como ferramenta principal para análise de desempenho da comutação. O maior obstáculo à análise quantitativa do filme baseia-se no seu comportamento resistivo não-linear, que é função da densidade e direção da corrente, do material da escova, da umidade, temperatura e pressão da atmosfera de comutação. Em alguns aspectos, o comportamento elétrico da pátina é semelhante ao de um gás ionizado (FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO, 1975).

Figura 2.14 - Pátinas de aparência normal - variação de tonalidade.

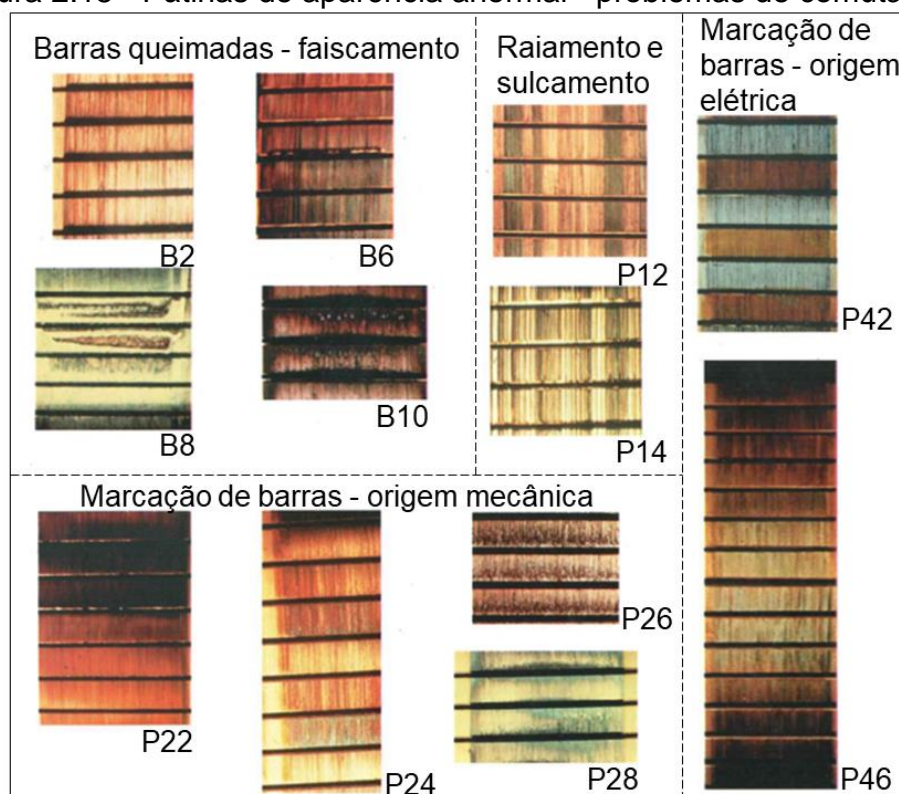


Fonte: BRANÇAN (1987, p. 37)

A variação de tonalidade do filme, exibida na Figura 2.14, indo do castanho claro ao negro, é um assunto bastante controverso, contudo, tal variação pode ter origem no material das escovas bem como na contaminação e não necessariamente define o diagnóstico da comutação (BRUNI, 1984). A verificação visual da pátina, portanto, deve ser restrita ao julgamento da uniformidade não cabendo outras interpretações.

Quando a máquina está em operação, a inspeção visual do filme desuniforme pode ajudar a discriminar possíveis problemas de funcionamento; nesse contexto, diversos catálogos de fabricantes e manuais de manutenção disponibilizam imagens típicas de anormalidades na pátina, exibidas na Figura 2.15, relacionando-as com as causas mais prováveis e, em alguns casos, recomendando algumas ações corretivas.

Figura 2.15 - Pátinas de aparência anormal - problemas de comutação.



Fonte: Adaptado de GROUPE CARBONE LORRAINE (2000, p.37)

Além da avaliação visual do filme depositado sobre a pista, é fortemente recomendada a inspeção das escovas que estão em operação. Inicialmente, essa verificação pode ocorrer nas faces laterais do carvão, procurando marcas de fricção com o porta escovas, trincas, quebras e sinais de sobreaquecimento. Também é muito importante avaliar os pontos de conexão com os porta escovas, a integridade dos estribos e dos flexíveis (cordoalha e isolamento) e a firme fixação desses rabichos no corpo das escovas (feita através de compactação de pó de cobre, rebites e/ou solda).

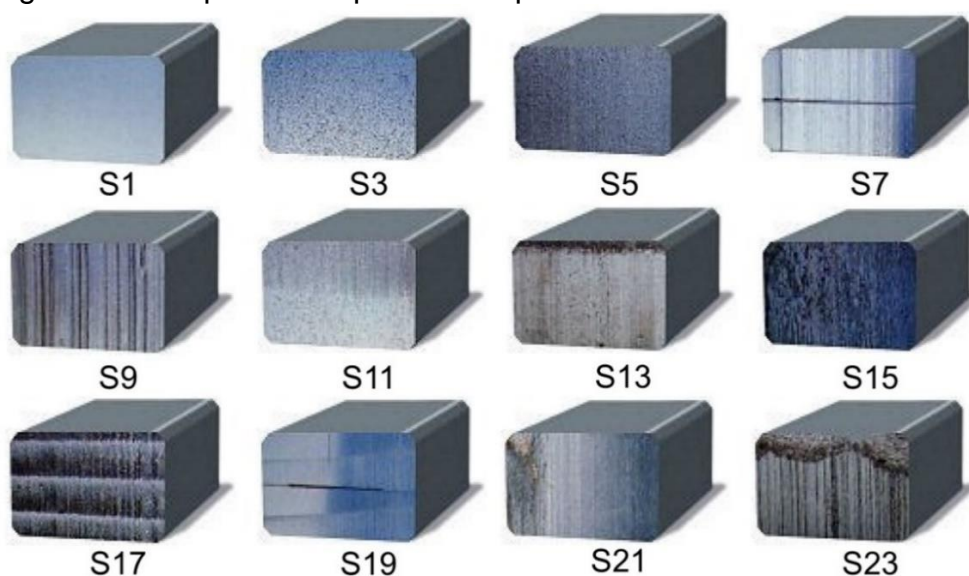
Especialmente no caso da comutação, muitos catálogos de fabricantes e manuais de manutenção de máquinas rotativas indicam, como parte fundamental do diagnóstico da coleta de corrente, a inspeção da face de contato das escovas. Geralmente, de maneira padronizada, as superfícies de contato típicas são classificadas e retratadas segundo exibido, respectivamente, na Tabela 2.3 e na Figura 2.16.

Tabela 2.3 - Classificação típica das superfícies de contato das escovas.

Tipo	Aparência	Comutação	Causa
S1	Lisa e polida (não espelhada)	Excelente	Caso evolua para espelhamento, tem como causa a baixa carga de comutação.
S3	Porosa	Excelente	A porosidade depende do <i>grade</i> utilizado.
S5	Levemente raiada	Boa	Leve incidência de pó contaminante na atmosfera de comutação.
S7	Levemente filetada	Tolerável	Evolução da S5 dada existência contatos perigosos e/ou baixa carga de comutação.
S9	Filetada	Ruim	Evolução da condição S7 depois de um longo tempo de uso da máquina.
S11	Sombreada	Ruim	Desalinhamento do plano neutro.
S13	Borda queimada	Pobre	Faiscamento (pista irregular, baixa pressão das molas e/ou falta de assentamento).
S15	Perfurada	Péssima	Centelhamento intenso (sobrecarga).
S17	Laminada	Pobre	Picos de corrente (falhas elétricas no enrolamento de armadura).
S19	Duplo assentamento	Tolerável	Excesso de afastamento e/ou folga no alojamento dos porta escovas.
S21	Depósito de cobre	Péssima	Arrastamento de cobre e/ou sobrecarga (pode gerar danos sérios ao comutador)
S23	Lascada	Péssima	Lâminas e/ou mica saliente, alta ovalização.

Fonte: Adaptado de BRANÇAN (1987, p.39 - 40) e MORGAN AM&T (1998, p. 14)

Figura 2.16 - Aparência típica das superfícies de contato das escovas.



Fonte: Adaptado de MORGAN AM&T (1998, p. 14)

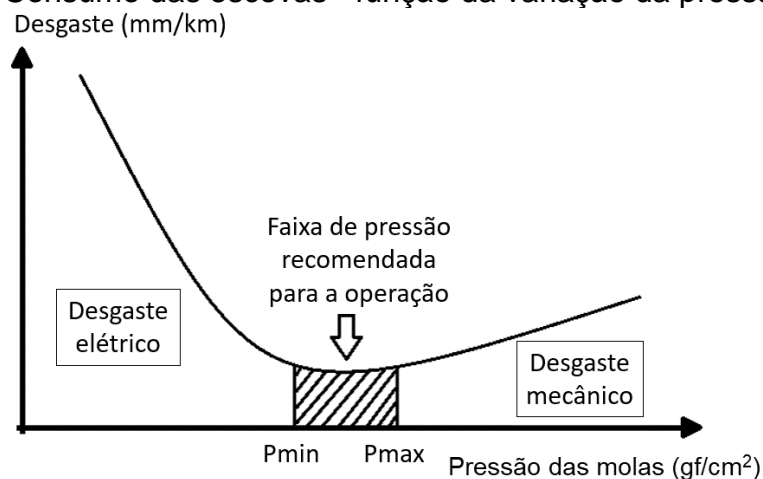
Intensidade do ruído

O contato das escovas com o comutador deve se dar de maneira constante e ininterrupta caracterizando, portanto, um dos fatores básicos para uma boa comutação. Defeitos mecânicos na pista, como excentricidade, elevação de lâminas e mica saliente são grandes causadores de barulho. A trepidação das escovas pode ser gerada também pelo excesso de filme, ângulo e pressão das molas inadequada. De maneira sintética, o aumento do ruído representa a elevação do coeficiente de atrito, que leva ao acréscimo de desgaste nas escovas e danos ao comutador.

Vida útil das escovas

O aumento do desgaste das escovas pode estar atrelado a problemas mecânicos, porém, existe também a contribuição de fatores elétricos. Conforme Ilustrado na Figura 2.17, o aparecimento de centelhamento, causado pela redução da pressão, por exemplo, leva ao aumento tipicamente exponencial do consumo (desgaste elétrico). Por outro lado, a elevação da pressão leva à ampliação da força de atrito e, por consequência, ao aumento, praticamente linear (desgaste mecânico), do consumo.

Figura 2.17 - Consumo das escovas - função da variação da pressão das molas.



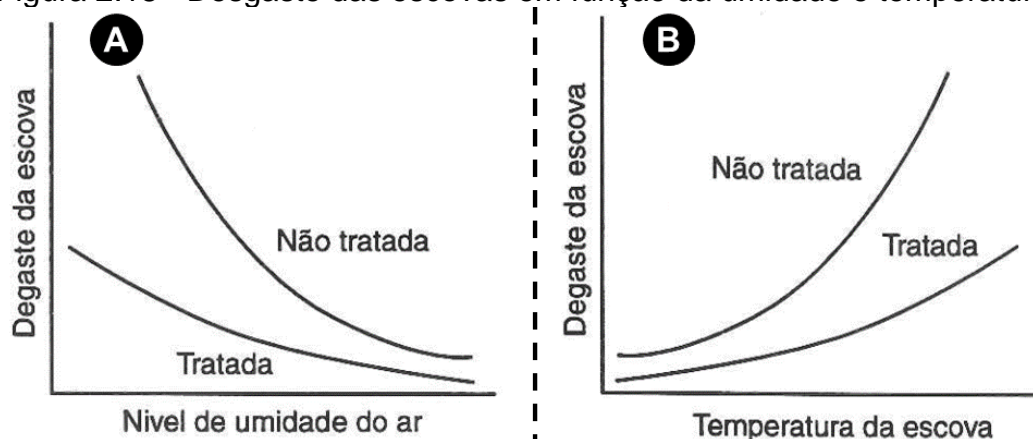
Fonte: Adaptado de ARIZA (1977, p. 89)

Em alguns projetos de porta escovas há a possibilidade de se ajustar a pressão das molas com o intuito de melhorar o desempenho da comutação. Contudo, além da força de molas, existem diversos fatores que interferem no desempenho geral da coleta de corrente, mas que não podem ser diretamente manipulados. A temperatura do contato e a umidade da atmosfera de comutação são dois exemplos bastante pertinentes.

Conforme abordado no item 2.2.1, a disponibilidade de umidade é fundamental no processo de eletrodeposição de carbono e, portanto, na formação do filme; assim,

conforme exibido na Figura 2.18A, o desgaste da escova será sempre maior em atmosferas mais secas. Em geral, considerando que a umidade absoluta da atmosfera de comutação atende a faixa de 8 a 15 g/cm³, espera-se, em casos de funcionamento normal da coleta de corrente, um desgaste de 2 a 6 mm a cada 1000 horas de operação da máquina (BRANÇAN, 1987). Por outro lado, como mostrado na Figura 2.18B, o desgaste tende a subir com o crescimento da temperatura no contato escova-comutador. Esse tema será abordado com mais critério no item 2.3.1.

Figura 2.18 - Desgaste das escovas em função da umidade e temperatura.



Fonte: MORGANITE GEVISA (1998, p. 3)

Em ambos os casos, porém, percebe-se que as escovas tratadas apresentam um desempenho melhor que as não tratadas; isso pois, dependendo da condição de operação da máquina, a introdução de aditivos químicos na composição da escova pode regular (aumentando em casos de falta ou atenuando em casos de excesso) a formação de filme e, por consequência, reduzir o desgaste (BORGES, 2007).

Intimamente relacionada com baixos valores de coeficiente de atrito, a vida longa das escovas é significativa para determinar um bom desempenho na coleta de corrente, porém, é o fator menos importante dentre os demais. Os prejuízos que podem ser causados à máquina para a redução inconsequente no desgaste não se justificam em hipótese alguma. A redução deve acontecer como consequência de uma série de ações que beneficiem a comutação como um todo.

Perdas mínimas na comutação - elétricas e mecânicas

O rendimento (η) de uma máquina cc pode ser calculado conforme a Equação (2.1); tem-se no numerador a potência mecânica de saída (P_{mec}), utilizada para realizar trabalho, que é na verdade o produto entre a velocidade (ω) e o conjugado (T) desenvolvido num dado instante de tempo. No denominador, somadas à potência de

saída, são incorporadas as perdas elétricas (P_e) e mecânicas (P_m). As elétricas dizem respeito às perdas joulicas em carga (P_c), as perdas a vazio (P_v), histerese e Foucault, e as perdas elétricas nas escovas (P_{ee}), condução e queda no contato. As mecânicas são a somatória das perdas por arrasto (P_a), turbulência do ar devido à ventilação, e perdas por atrito, nos mancais (P_r) e pelo contato das escovas com o comutador (P_{me}).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{mec} + (P_e + P_m)} = \frac{\omega \times T}{P_{mec} + (P_c + P_v + P_{ee}) + (P_a + P_r + P_{me})} \quad (2.1)$$

Considerando o funcionamento normal da máquina, em alguns casos é possível calcular as perdas da coleta de corrente. Mostra-se que, de maneira empírica e aproximada, acatando uma série de fatores necessários a uma boa coleta de corrente, é possível estimar, respectivamente, conforme as Equações (2.2) e (2.3), as perdas mecânicas, geradas pelo atrito de escovas eletrográficas com o comutador (P_{me}) e de escovas metálicas operando em anéis coletores (P_{mm}) (BRANÇAN, 1987).

$$P_{me} = 0,0131 \cdot \omega \cdot \emptyset \cdot A \quad (2.2)$$

$$P_{mm} = 0,00785 \cdot \omega \cdot \emptyset \cdot A \quad (2.3)$$

onde:

P_{me} = Perdas mecânicas por atrito de escovas eletrográficas com o comutador (W)

P_{mm} = Perdas mecânicas por atrito de escovas metálicas com os anéis coletores (W)

ω = velocidade angular do comutador ou dos anéis coletores (rpm)

\emptyset = diâmetro do comutador ou dos anéis coletores (m)

A = área de contato das escovas com a pista (cm²)

Considerando as perdas elétricas das escovas (P_{ee}), observa-se que, numa máquina cc com um determinado número total de escovas (n) e resistência (R), o valor de potência dissipada na condução de corrente (I_e) pelo corpo de uma escova (p_c) é função do quadrado de uma fração da corrente de armadura da máquina (I_a), da resistividade do material (ρ), da área de seção transversal (s) e do comprimento da escova (l), sendo descrito pela Equação (2.4):

$$p_c = R \times I_e^2 = \left(\frac{\rho \times l}{s} \right) \times \left(\frac{2 \times I_a}{n} \right)^2 \quad (2.4)$$

A potência dissipada pela queda no contato (p_q) numa máquina cc com um dado número total de escovas (n) é dada pelo produto entre uma fração da corrente de armadura (I_a) e a queda de tensão no contato da escova (U), tal qual a Equação (2.5):

$$p_q = \left(\frac{2 \times I_a}{n} \right) \times U \quad (2.5)$$

O desenvolvimento de novas tecnologias eleva, a cada dia, a demanda mundial por energia; nesse sentido, de maneira geral, cresce a importância da melhoria de eficiência dos equipamentos na transformação da energia. Também para a comutação, preliminarmente, esperam-se as mínimas perdas elétricas (P_{ee}) e mecânicas (P_{me}). Contudo, conforme será abordado no item 2.3.1, nem sempre a coleta de corrente com perdas reduzidas contribui na preservação do comutador.

Mínimo desgaste do comutador

O contato das escovas com o comutador gera fadiga mecânica, elétrica e térmica para ambas as peças, levando ao desgaste natural com o tempo de operação. Entretanto, qualquer anormalidade no desgaste traz redução de vida útil ao comutador, acréscimo no consumo de escovas e aumento na probabilidade de a máquina falhar em operação devido a surtos de comutação. O desgaste anormal do comutador pode acontecer de diversas maneiras: queima de barras por ranhura, queimas de barras no passo polar, arrastamento de cobre, filmes não condutivos, seletividade, decapagem, sulcamento, ranhuramento e filetagem (BRUNI, 1984). Destacadamente, esse último desgaste anormal será tratado num estudo de caso, exibido no item 3.2 deste trabalho.

Elencados os mecanismos e as condições necessárias a formação da película de grafite, além de todas as recomendações necessárias à uma boa coleta de corrente, percebe-se que a reputação de *Black Magic*, atribuída à comutação por todos aqueles que desconhecem esse ramo interdisciplinar da ciência, não se justifica sob qualquer hipótese (ROBERGE e HERON, 2019). Como tantas outras áreas do conhecimento, ao compreender com clareza os fenômenos físico-químicos, partindo da análise teórica e/ou empírica, é possível discriminar a contribuição de cada variável, indicando, em cada caso, ações que favoreçam a uma melhor comutação.

Ao investigar essas variáveis, excetuando os distúrbios elétricos e/ou magnéticos (sobrecarga, problemas de conexão, desalinhamento de plano neutro, desbalanços eletromagnéticos etc.), pode-se entender que, de certa forma, todos os problemas mecânicos da coleta de corrente, que em geral são os grandes causadores de falhas na operação das máquinas escovadas, relacionam-se à elevação desproporcional do coeficiente de atrito. Assim, propõe-se a investigação do desempenho da comutação sob a perspectiva da tribologia, evidenciando, para tal, as seguintes considerações.

2.3 A INFLUÊNCIA DO ATRITO NA COMUTAÇÃO

De maneira geral, a interação mecânica entre superfícies rugosas (que não são perfeitamente lisas) com movimento relativo, tal qual o contato das escovas com o comutador, pode ser observado sob o aspecto macro e micro. A investigação do atrito na comutação normalmente encontra na literatura técnica de manutenção de máquinas rotativas importantes análises descritivas dos fenômenos macro, que justificam algumas recomendações para o bom funcionamento dos equipamentos. Em contrapartida, nos estudos da mecânica do contato, majoritariamente sob a ótica do micro, a fundamentação teórica dos mecanismos de desgaste não possui como foco a comutação, fricção de compostos de carbono (escovas) com cobre (lâminas do comutador) permeada por corrente elétrica. Aqui, pretende-se, portanto, a aproximação dos conhecimentos interdisciplinares, sob as óticas macro e micro.

2.3.1 Recomendações práticas para a redução do atrito (aspectos macro)

Neste tópico, recorrendo ao empirismo difundido nos manuais de máquinas escovadas e à avaliação do desempenho em operação, apresentam-se alguns parâmetros fundamentais na gestão de uma coleta de corrente com o mínimo atrito.

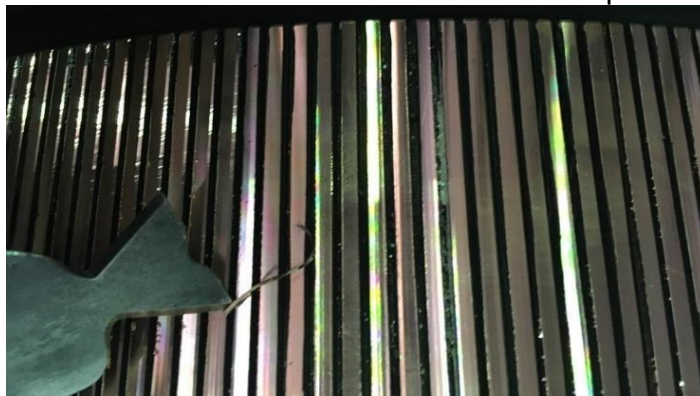
Acabamentos da pista

O reperfilamento do comutador, prática comum na manutenção de máquinas escovadas, conta com o rebaixamento de mica do entre lâminas, a usinagem da pista, a retirada de mica saliente, o rebarbamento das arestas, exibido na Figura 2.19, e a retífica das quinas. Todos esses procedimentos, rigorosamente controlados, são de extrema importância para uma boa comutação.

Um comutador acidentado, reflexo por exemplo de rebarbas no cobre, desgaste irregular da pista, excentricidade ou saliências no isolamento do entre lâminas, pode levar por um instante a uma falha na coleta de corrente, que, eventualmente, progredirá para um centelhamento intenso, danificando o filme; por outro lado, uma pista uniforme, mas com aspereza inadequada impede a formação do filme. Em

ambos os casos, a película lubrificante não será capaz de atuar adequadamente em prol da redução do coeficiente de atrito.

Figura 2.19 - Rebarbamento de lâminas em uma máquina de tração cc.



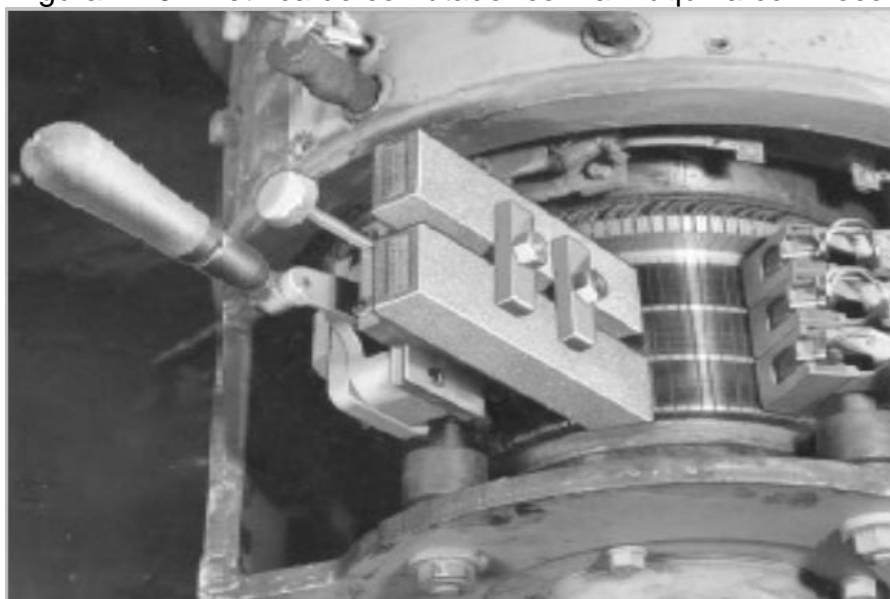
Fonte: AUTOR (2019)

Através do controle de rugosidade evita-se deixar a pista com um acabamento excessivamente liso, o que dificulta a deposição de grafite e leva a uma formação de filme lenta e imperfeita; no entanto, em um acabamento demasiadamente áspero, observa-se um grande desgaste inicial das escovas, que deve ser evitado, embora seja admissível se comparada à situação anterior. Empiricamente, considerando a escala Ra (escala de rugosidade média de valores absolutos dentro do comprimento de amostragem), sabe-se que a rugosidade da pista deve estar contida na faixa de 1,2 a 1,8 μm , para os comutadores de cobre, e de 0,75 a 1,8 μm , tendo em conta a operação das escovas nos anéis coletores de bronze ou aço (BRANÇAN, 1987).

Naturalmente, deve ser uniforme a distribuição dessas discontinuidades em todo o perímetro do comutador, sendo executada por torneamento, com inserto de diamante, que fornece um acabamento excepcionalmente bom, conforme exibido na Figura 2.19, ou retífica, através de pedras específicas pra esse fim.

Ainda, considerando danos moderados à pista de máquinas cc embarcadas, por exemplo no transporte ferroviário de carga ou de passageiros, é usual realizar a retífica do comutador com a máquina *in loco*, tal qual ilustrado na Figura 2.20. Neste caso, apesar do acabamento final exigir diversos retrabalhos e a retífica não garantir o mesmo controle de desgaste de cobre que o torneamento, é possível retomar a operação da máquina sem desmontagem e, portanto, com maior celeridade que no processo convencional. Além dos aparelhos de retífica, em catálogos especializados, é possível encontrar também ferramentas para realizar o rebaixamento de mica, a quebra de quinas, entre outros erviços *in loco*.

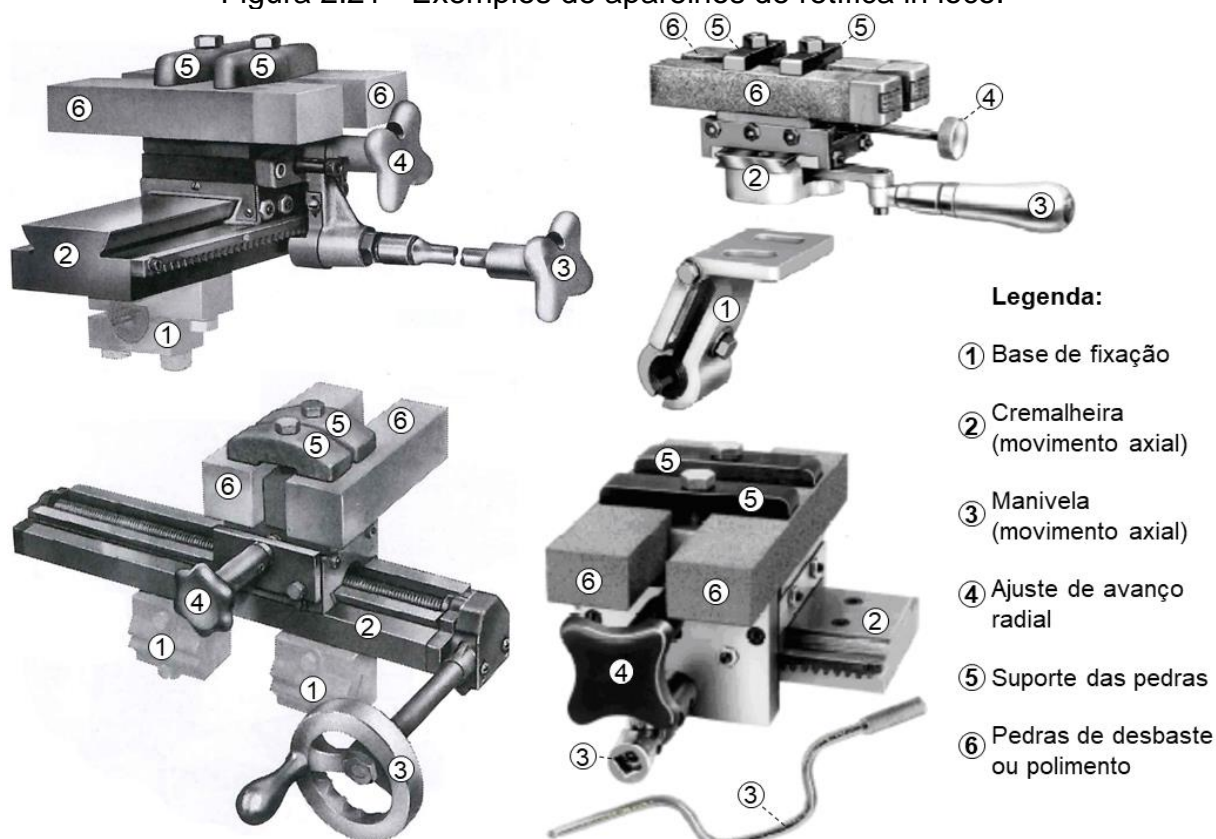
Figura 2.20 - Retífica do comutador com a máquina cc in loco.



Fonte: Adaptado de MORGAN AM&T (1998, p. 42)

Dependendo da aplicação, da restrição de espaço e do acionamento (utilizando um motor externo ou energizando o próprio equipamento), cada máquina possui um aparelho específico que, fixado à carcaça, é capaz de realizar a retífica in loco. Alguns desses aparelhos são exibidos, de maneira descritiva, na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Exemplos de aparelhos de retífica in loco.



Fonte: Adaptado de MORGAN AM&T (1998, p. 42 e 43)

Material da escova

Mesmo admitindo o controle da rugosidade da pista não se garante, no ponto de vista mecânico, a gestão do coeficiente de atrito; esse fator depende também da composição da escova e da adaptabilidade do material ao tipo de operação da máquina. As escovas utilizadas no estudo de caso deste trabalho, exibidas no item 3.2.3, se enquadram na classe das eletrográficas; sua matéria prima varia em proporção e tratamento térmico dependendo do tipo e do fabricante. Em geral, coque de petróleo, negro de fumo, grafite natural e outros carvões amorfos são unidos, através de processos de prensagem, e tratados termicamente (2300°C a 2800°C), volatilizando as impurezas e tornando-os menos abrasivos. Assim, os carvões se transformam em grafite artificial (BRANÇAN, 1987). Por serem levemente porosos, os materiais dessa classe viabilizam o tratamento com resinas orgânicas, que propiciam uma excelente lubrificação e um consumo reduzido, especialmente considerando a operação com elevadas velocidades (MORGANITE GEVISA, 1998).

Se tratando da coleta de corrente, sabe-se que as propriedades do contato das escovas com a pista influem muito mais no desempenho final do *grade* do que a avaliação da composição e das propriedades físicas do material (BORGES, 2007). Ainda assim, a maioria dos fabricantes disponibilizam diversos parâmetros relacionados a cada qualidade de escova comercializada, tais como: dureza (Shore C2), massa específica (g/cm^3), resistência à flexão (kgf/cm^2), resistividade elétrica ($\mu\Omega\text{cm}$), queda no contato (V), máxima velocidade periférica (m/s), máxima densidade de corrente (A/cm^2), coeficiente de atrito etc. Cada um desses parâmetros, sejam eles próprios do material ou característicos da operação, em conjunto com aspectos ambientais, influem no desempenho final da qualidade adotada.

A dureza indica, até certo ponto, a capacidade de resistência mecânica do carvão; contudo, baseado apenas nesse parâmetro, é um equívoco julgar sobre a abrasividade e o consumo de um dado tipo de escova, visto que a combinação da estrutura dos grãos e também a contaminação ambiental interferem no desgaste das escovas e da pista (MORGANITE GEVISA, 1998).

Mecanicamente, a massa específica é fundamental na dinâmica do carvão no interior do porta escovas; em geral, com uma menor densidade a escova tende a seguir com menos dificuldade as irregularidades da pista, o que favorece para uma boa coleta de corrente (BRANÇAN, 1987).

A resistência à flexão ou rigidez transversal indica a capacidade da escova de resistir sem rupturas (trincas, arrancamentos ou fraturas) às forças, especificamente no sentido tangencial, geradas por elevações repentinas no coeficiente de atrito ou, em pior caso, por impactos de saliências da pista com a lateral do carvão; eventualmente, a ruptura pode desencadear uma série de falhas na coleta de corrente e comprometer seriamente o funcionamento da máquina.

A resistividade das escovas influi nas perdas por condução, conforme expresso pela Equação (2.4); além disso, aumentando esse parâmetro é possível atenuar as correntes circulantes, dada a elevação final da resistência transversal e da queda no contato.

A queda no contato influi nas perdas elétricas da máquina cc, além disso, esse parâmetro se relaciona moderadamente com a resistividade, visto que uma fração do filme é composta de partículas de carbono oriundas das escovas; no entanto, salienta-se que fatores como a pressão das molas, velocidade periférica, densidade de corrente, temperatura no contato e condições ambientais interferem muito mais na referida queda de tensão.

Considerando ainda o ângulo de ataque (entre a face lateral das escovas e o plano tangente à pista) e o tipo de porta escovas, alguns fabricantes recomendam, dependendo da qualidade adotada, uma velocidade periférica máxima na qual é confiável executar a coleta de corrente; no caso da comutação, o limite de velocidade é também um dado de projeto da máquina cc, que possui o comutador como um dos componentes mais vulneráveis à força centrífuga. As duas últimas características operacionais comumente relacionadas em catálogos, densidade de corrente e coeficiente de atrito serão, na sequência, tratadas de maneira mais criteriosa.

Por fim, é importante destacar que esses e outros parâmetros tabelados pelos fabricantes de escovas são obtidos em condições laboratoriais controladas de temperatura, umidade e contaminação da atmosfera de comutação, rugosidade da pista, assentamento das escovas, pressão das molas, densidade de corrente etc. Sendo assim, não é correto considerar que os valores estipulados serão desenvolvidos na prática em um dado regime de trabalho de uma máquina; logo, servem apenas para uma comparação teórica na escolha do *grade* a ser testado.

Densidade de corrente

No motor cc, a variação de conjugado, comumente exigida em diversos processos industriais, reflete diretamente na corrente de armadura da máquina (I_a), que é conduzida pelas escovas ao comutador, como é exibido na Equação (2.6):

$$I_a = \frac{T}{K \times \Phi_p} \quad (2.6)$$

onde:

T = Torque ou conjugado mecânico (Nm)

K = Constante construtiva da máquina

Φ_p = Fluxo polar estático resultante dos enrolamentos de campo (Wb)

I_a = Corrente de armadura (A)

A densidade de corrente máxima, em Ampère por centímetro quadrado, expressa o nível de corrente que é possível conduzir numa determinada área de seção de uma escova sem problemas de comutação. A Equação (2.7) exhibe o cálculo de densidade de corrente nominal (J_{nom}) para uma máquina escovada; essa é a máxima densidade de que se observa no contato em regime contínuo de funcionamento.

$$J_{nom} = \frac{I_{nom}}{f \times n \times s} \quad (2.7)$$

onde:

I_{nom} = Corrente nominal total coletada no comutador ou nos anéis coletores (A)

f = Fator 0,5 para comutador e 1 para anéis coletores

n = Número total de escovas por comutador ou por anel coletor

s = Área de seção transversal de uma escova (cm^2)

Efetivamente, a capacidade de condução de corrente das escovas depende de algumas condições de operação tais como: velocidade, tipo de serviço (contínuo ou intermitente), ventilação etc. Sabe-se que, do ponto de vista do aumento do atrito e, portanto, do desgaste das escovas, a coleta de corrente tende a piorar com o aumento excessivo da temperatura. Assim, em máquinas com boa ventilação, avaliando o aumento da temperatura, é possível operar com certo nível de sobrecarga, já que os valores de densidade máxima de corrente tabelados são, em geral, conservadores (na faixa de 10 a 12 A/ cm^2). Em aplicação de geradores, por exemplo, há relatos de escovas eletrográficas operando com até 28 A/ cm^2 (MORGANITE GEVISA, 1998).

Obviamente, a sobrecarga, seja ela intermitente ou contínua, estimula o fenômeno do faiscamento, que é extremamente prejudicial à coleta de corrente. Em contrapartida, diferentemente de um circuito elétrico comum, em que a mínima densidade de corrente é desejada para minimizar as perdas joulicas, uma baixa carga de comutação é também prejudicial para a máquina; o recomendável, portanto, é que se observe a densidade média mínima de corrente para uma operação segura.

De acordo com a Equação (2.7), é possível calcular, a partir dos dados de placa, o valor de densidade de corrente nominal do equipamento; no entanto, integrando a curva característica de carregamento da máquina e dividindo pelo tempo de operação, é possível calcular a densidade de corrente média no referido intervalo. Normalmente, ao executar esse cálculo, obtém-se o valor médio bastante inferior à estimativa nominal. Nesses casos de baixa carga de comutação, em geral, as escovas acabam riscando a pista, pois a formação e manutenção do filme fica comprometida (ARIZA, 1977). Essa constatação fundamenta-se no fato de que a sinterização dos elementos do filme (baseada no processo de eletrólise) depende, essencialmente, da densidade de corrente implementada no contato.

A relação da baixa carga de comutação com o ataque ao filme também pode ser explicada pela presença de partículas de cobre provenientes do comutador encrustadas na face de contato das escovas. É considerado normal que ocorra uma pequena transferência de metal da pista às escovas durante a coleta de corrente, contudo, garantidos os níveis aceitáveis de energia no contato, a maior parte destas partículas são vaporizadas. Porém, nos casos em que a comutação ocorre em baixa carga, as partículas que se desprendem não podem ser evaporadas, depositando-se nos poros da escova (BRUNI, 1984). Esse fenômeno, chamado filetamento, tem seus mecanismos pormenorizados no item 3.2.

A deposição de partículas de cobre prejudica a formação e consolidação da pátina, o que geralmente leva ao desgaste anormal do comutador. De modo geral, a deficiência de um filme lubrificante entre duas superfícies sólidas implica no contato total ou parcial destas, o que acarreta necessariamente num comportamento de atrito prejudicial (DORINSON e LUDEMA, 1985).

É importante compreender, no entanto, que a distribuição da densidade de corrente na face de contato das escovas com a pista não é constante e nem mesmo estática. Na realidade a condução ocorre em numerosas zonas de área reduzida, que se

alternam de maneira sucessiva no tempo, varrendo toda a superfície de contato da escova. Supondo a perda desse equilíbrio, haverá a tendência de agrupamento de zonas de condução, condensando a corrente em alguns pontos (sobrecarga) e atenuando a densidade de outros (baixa carga de comutação); como consequência da falta de uniformidade na coleta de corrente, é comum que sejam geradas estrias e/ou ranhuras na pista (GROUPE CARBONE LORRAINE, 2000).

Pressão das molas

Ainda na etapa de projeto, considerando o tipo de máquina e, em alguns casos, também sua aplicação, o fabricante avalia a variação natural de pressão com o comprimento das escovas e recomenda uma faixa de valores adequada à operação. A força das molas é fundamental no processo de coleta de corrente, sendo que o desequilíbrio de pressões de contato num mesmo porta escovas, por exemplo, leva à condução desigual de corrente nas pistas, podendo gerar sobrecarga em uma escova e baixa densidade de corrente na outra. Conhecendo o coeficiente de rigidez da mola (C), a variação do comprimento das escovas (Δx), ocasionada pelo desgaste natural em operação, e a área de seção transversal (s), obtém-se, conforme a Equação (2.8), a faixa tolerável de pressão das molas (ΔP_m).

$$\Delta P_m = \frac{C \times \Delta x}{s} \quad (2.8)$$

Do ponto de vista tribológico, a variação da força das molas influi de duas formas: se for abaixo da recomendada poderá haver falha na condução, que pode danificar a pista e a face de contato da escova, elevando o atrito; por outro lado, se for demasiada haverá um aumento automático do coeficiente de atrito (ARIZA, 1977). Percebe-se, portanto, uma relação extremamente próxima entre a curva de desgaste de escovas, apresentada na Figura 2.17, e a descrição da variação do atrito, ambas em função da mudança da pressão de contato gerada pelas molas. À esquerda o desgaste elétrico, causado pela queima do filme, denota o aumento do atrito com a precarização da pátina, à direita o desgaste mecânico, denota a elevação do atrito devido ao aumento das interações entre superfícies.

Fundamentados na prática e esboçando os níveis de vibração na operação do equipamento, alguns autores estabelecem, tal qual exibido na Tabela 2.4, faixas de valores de pressão que servem de referência para os dados tipos de máquinas.

Tabela 2.4 - Pressões de contato recomendadas à cada tipo de máquina.

TIPO DE MÁQUINA	PRESSÃO NA ESCOVA
Máquina estacionárias livres de vibração e ruído	150 a 200 gf/cm ²
Máquinas com anéis deslizantes	170 a 250 gf/cm ²
Motores de tração	250 a 570 gf/cm ²
Máquinas com alta vibração	até 350 gf/cm ²
Motores fracionários	até 450 gf/cm ²

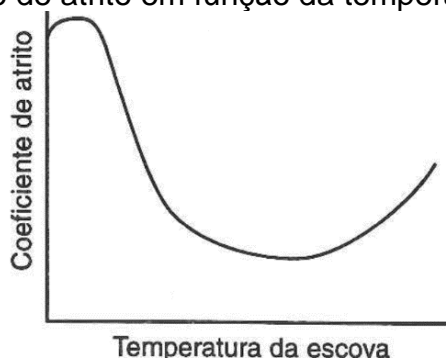
Fonte: Adaptado de BRANÇAN (1987, p.21)

As vibrações na máquina podem ser ocasionadas por falta de balanceamento do rotor, defeitos nos mancais, desalinhamento do eixo, irregularidades na pista, folga excessiva no porta escovas, coeficiente de atrito elevado ou oscilante e/ou por fatores externos (acoplamentos, correias, engrenagens, redutores, rodas etc.). Quando submetido a vibrações, eventualmente, o sistema mecânico, constituído de porta escovas, molas e escovas, pode entrar em ressonância, provocando o arrancamento de rabichos, a quebra de escovas e, em casos mais graves, danos ao porta escovas. Nesse cenário, mesmo conjecturando o aumento no desgaste mecânico, a elevação da pressão das molas tende a impedir que as escovas se descolem da pista. Contudo, previamente, pode-se adotar escovas com um módulo de elasticidade diferente, inclinar as mesmas em relação ao plano radial (ângulo de bisel), utilizar carvões multipartidos e/ou com estribos amortecedores de borracha ou silicone (GROUPE CARBONE LORRAINE, 2000).

Temperatura no contato

O contato das escovas com a superfície girante é, na maioria das vezes, uma grande fonte de calor; quando o atrito é excessivo, as elevadas temperaturas tendem a deformar a pista dos anéis coletores e comutadores, piorando ainda mais a condição da coleta de corrente. Além disso, de maneira inter-relacionada, o coeficiente de atrito possui estreita ligação com a temperatura no contato, como é ilustrado na Figura 2.22.

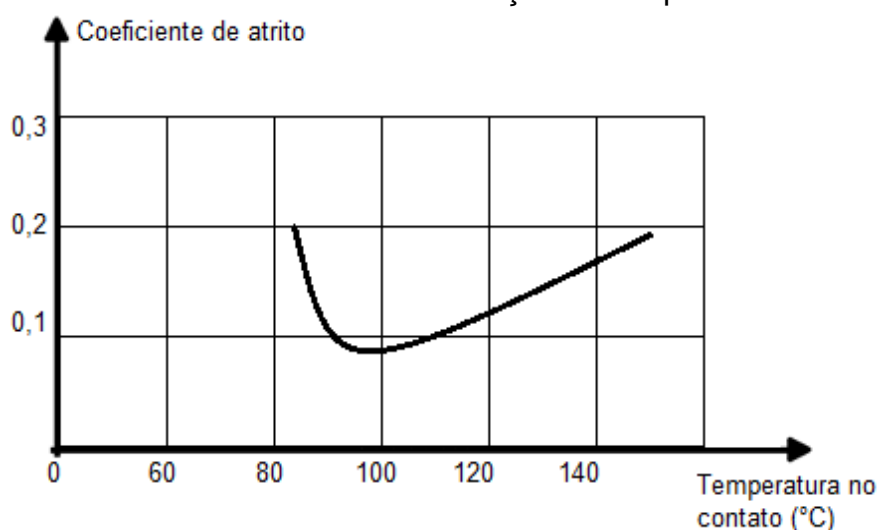
Figura 2.22 - Coeficiente de atrito em função da temperatura - coleta de corrente.



Fonte: MORGANITE GEVISA(1998, p. 3)

Na coleta de corrente, em geral, o contato pode alcançar altos valores de coeficiente de atrito, de desgaste e de temperatura; dependendo das condições do filme lubrificante, é comum observar temperaturas entre 100°C e 200°C no contato seco (HOLINSKI, 2001). Considerando especificamente o caso da comutação, observa-se que a variação do coeficiente de atrito em função da temperatura na face de contato das escovas segue o aspecto de uma curva convexa, que é exibida na Figura 2.23.

Figura 2.23 - Coeficiente de atrito em função da temperatura - comutação.



Fonte: Adaptado de ARIZA (1977, p.85)

A baixa carga de comutação, fator preponderante para a não vaporização do cobre encrustado e, portanto, para o desgaste irregular do comutador, está intimamente ligada ao aumento do coeficiente de atrito quando se considera a comutação com baixas temperaturas no contato. Na maior parte dos casos, quando a coleta de corrente ocorre com a máquina a vazio ou pouco carregada, a escova tende a trabalhar “fria”, acarretando em altíssimo coeficiente de atrito, que por consequência gera danos ao filme e ao comutador. Portanto, recomenda-se que a temperatura da face da escova trabalhe na faixa entre 85°C a 110°C (ARIZA, 1977).

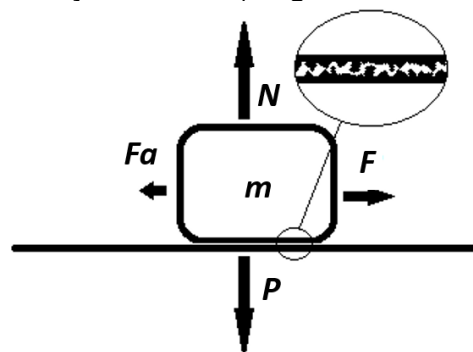
Conhecendo as recomendações e parâmetros fundamentais, é possível viabilizar, em estudos de caso mais comuns, uma coleta de corrente com o mínimo atrito. Contudo, verificar os fenômenos relacionados a essa técnica somente pelo viés macro pode gerar a falsa impressão que não existem conexões diversas entre as variáveis físico-químicas relacionadas. Assim, independente do problema imposto à coleta de corrente, salvo o método de tentativa e erro, é impossível encontrar soluções suficientemente assertivas em estudos de caso incomuns. Nesse contexto, é

fundamental compreender, também, os aspectos micro que permeiam a mecânica do contato seco.

2.3.2 A mecânica do contato seco (aspectos micro)

O atrito seco entre superfícies, fenômeno representativo da parcela mecânica da coleta de corrente, caracterizada pela lubrificação limite, é denotado pela força de retardo que se opõe ao deslizamento de um objeto sobre outro. Conforme exibido na Figura 2.24, o corpo apresenta uma força normal (\vec{N}), consequência do peso (\vec{P}) no contato; a força (\vec{F}) pretende colocar a massa (m) em movimento enquanto a força de atrito (\vec{F}_a) ancora o corpo à superfície, tentando impedir que isso aconteça. Conforme ampliação, percebe-se que o problema consiste no contato entre faces rugosas. Todas as superfícies reais são geometricamente e molecularmente irregulares; além disso, a força de atrito pode ser caracterizada como a força necessária para quebrar as aderências entre as asperezas do contato (DORINSON e LUDEMA, 1985).

Figura 2.24 - Força de atrito (diagrama de forças genérico).



Fonte: AUTOR (2019)

O coeficiente de atrito (μ), expresso pela Equação (2.9) de maneira geral, é adimensional, sendo a relação dada entre o quociente da força de atrito (\vec{F}_a) pela normal (\vec{N}). Tal relação possui como base a 1ª lei do atrito de Amontons (1699), que aponta força de atrito como sendo diretamente proporcional à carga aplicada (normal).

$$\mu = \frac{\vec{F}_a}{\vec{N}} \quad (2.9)$$

No instante anterior à movimentação do corpo, tem-se a força de atrito estático (\vec{F}_{ae}) maior que a força aplicada (\vec{F}), permitindo o cálculo do atrito estático (μ_e) conforme a Equação (2.10):

$$\mu_e = \frac{\vec{F}_{ae}}{\vec{N}} \quad (2.10)$$

Quando a força aplicada (\vec{F}) supera a força de atrito estático (\vec{F}_{ae}) o corpo acelera, movendo-se em relação à superfície estacionária; agora uma reação de menor intensidade, chamada força de atrito cinético (\vec{F}_{ac}) permite o cálculo do atrito cinético (μ_c) conforme a Equação (2.11).

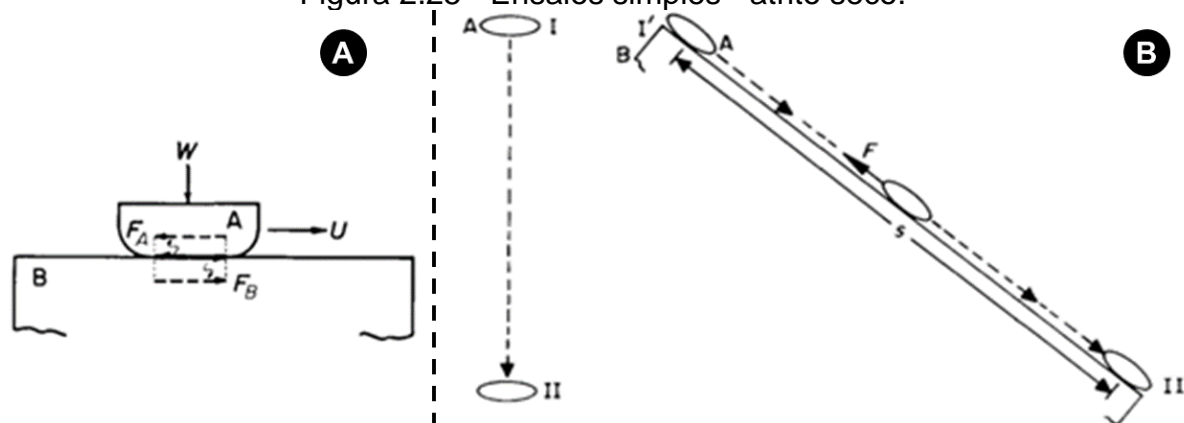
$$\mu_c = \frac{\vec{F}_{ac}}{\vec{N}} \quad (2.11)$$

Existem ainda outras duas leis aplicáveis à mecânica do contato seco: a 2ª lei do atrito de Amontons (1699), que define o atrito como sendo independente da área aparente (nominal) do contato e a 3ª lei do atrito de Coulomb (1781), que estabelece o atrito dinâmico como aproximadamente independente da velocidade de deslizamento.

Em geral, se observa que o coeficiente de atrito dinâmico diminui com o aumento da velocidade; contudo, este fato não se contrapõe às clássicas leis do atrito, pois em velocidades elevadas ocorre uma espécie de polimento mútuo das faces em contato, alterando as irregularidades superficiais e, conseqüentemente, a posição relativa das superfícies (FARIA, 2021). Nesse tipo de contato seco, o mecanismo de lubrificação limite é regido não pelas características superficiais das faces originais, mas pelas propriedades físicas e químicas da pátina formada entre as superfícies após o contato.

Para evidenciar a presença de atrito no contato, propõem-se dois ensaios simples: na Figura 2.25A, considera-se a inserção de sondas hipotéticas, capazes de medir as forças de atrito (mesmo módulo mas com direções opostas) em ambas as superfícies; outra possibilidade, respeitadas as condições de equivalência dos sistemas, seria comparar a velocidade final da queda livre de um corpo com a velocidade final deste mesmo corpo na descida num plano inclinado com atrito, exibido na Figura 2.25B. Em todos os casos, porém, considera-se o fenômeno do atrito como um distanciamento da conservação da energia mecânica útil (DORINSON e LUDEMA, 1985).

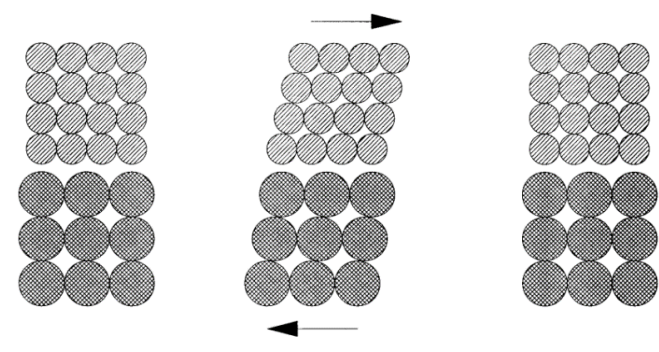
Figura 2.25 - Ensaio simples - atrito seco.



Fonte: Adaptado de DORINSON e LUDEMA (1985, p. 135)

Historicamente considerou-se que o atrito seco era função da rugosidade superficial, da força de adesão, de propriedades mecânicas dos corpos e/ou do tipo de camadas de transferência na interface. Durante o contato de superfícies sólidas com movimento relativo, o atrito pode ser definido como a vibração da rede de átomos destes corpos, que gera ondas sonoras e calor. Conforme exibido na Figura 2.26, a estrutura cristalina vibra até que toda a energia de deformação elástica seja dissipada (HOLINSKI, 2001). A expansão do conceito proposto considera ainda o atrito interno de corpos sólidos que, por deformação plástica ou histerese, representam perdas no sistema mecânico (DORINSON e LUDEMA, 1985).

Figura 2.26 - Deformação elástica de estruturas cristalinas - deslizamento a seco.



Fonte: HOLINSKI (2001, p.62)

Rugosidade da pista

Partindo de um contato entre faces muito lisas, onde surge forte atração das camadas de moléculas de superfícies vizinhas, sabe-se que a força de atrito diminui à medida que se aumenta a aspereza das superfícies até um ponto máximo de rugosidade, capaz de interromper, de maneira definitiva, o movimento relativo (FARIA, 2021).

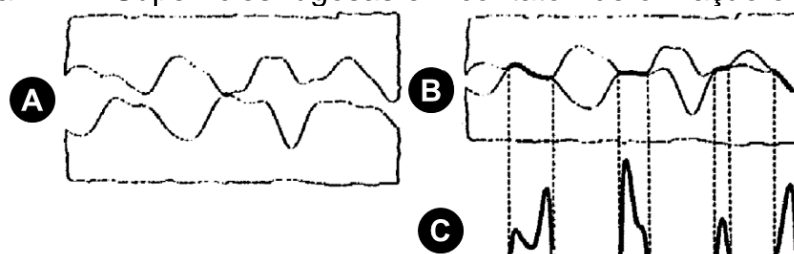
Sendo assim, conforme as recomendações para o acabamento da pista, adotando uma faixa restrita de rugosidades, sendo estes valores de aspereza intermediários, é possível garantir uma comutação com o mínimo coeficiente de atrito.

Pressão real no contato

Tratando-se de contatos deslizantes, a rugosidade superficial e as ondulações na pista acarretam no contato de pequenas áreas entre as duas superfícies. A pressão de contato real é, portanto, muito superior àquela calculada conforme a equação (2.8), que considera a área aparente de contato (nominal). Buscando compensar tal diferença, alguns autores propõem a mudança do plano por uma superfície senoidal, por uma distribuição descontínua de esferas (de diferentes raios), paralelepípedos ou cilindros (de diferentes alturas) (VARADI, NEDER e FRIEDRICH, 1996).

Algumas condições geométricas da interação entre as superfícies rugosas são exibidas na Figura 2.27. Especificamente, o contato inicial sem carga é ilustrado na Figura 2.27A; com o aumento do carregamento, as superfícies se aproximam, como é mostrado na Figura 2.27B, produzindo áreas e pressões de contato reais cada vez maiores, conforme é exibido na Figura 2.27C.

Figura 2.27 - Superfícies rugosas em contato - deformação elástica.



Fonte: Adaptado de VARADI, NEDER e FRIEDRICH (1996, p. 56)

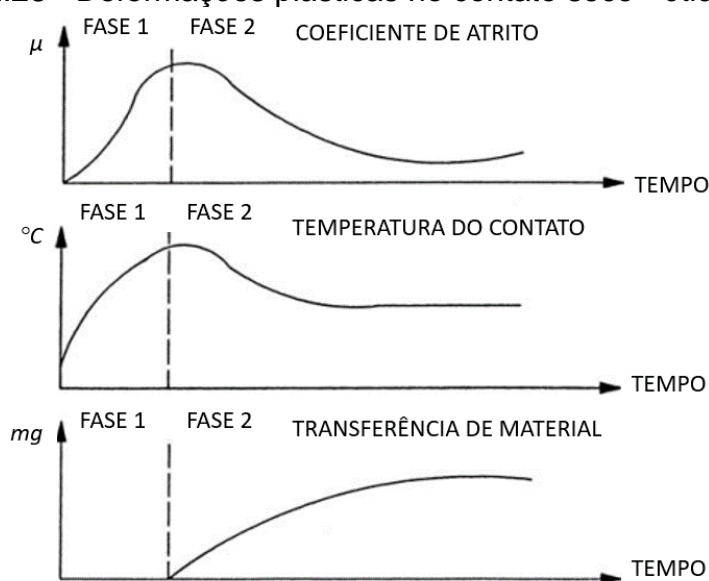
Distribuição da densidade de corrente no contato

O conceito das áreas reais de contato, ilustrado na Figura 2.27, é capaz de explicar, sob a ótica tribológica, porque a distribuição da densidade de corrente entre as escovas e a pista não é constante e nem mesmo estática. Naturalmente, devido às descontinuidades das superfícies em contato e à grande variabilidade da interface, característica do filme de grafite, entende-se que a corrente deve fluir com maior facilidade nas áreas reais de contato; com a rotação da pista, a tendência é que a condução ocorra, de maneira alternada e sucessiva, nessas pequenas zonas, até varrer, aleatoriamente, toda a superfície de contato da escova.

Transferência de material no contato

Os primeiros estudos do atrito seco se basearam na hipótese do comportamento elástico dos corpos em contato. Porém, as elevadas pressões, impostas aos picos de asperezas, tendem a provocar deformações plásticas, gerando desprendimento de partículas das superfícies em movimento relativo. Conforme exibido na Figura 2.28, sob a ótica macro, existe uma mudança no comportamento do atrito e da temperatura à medida que o contato entre picos de asperezas gera deformações plásticas que, conseqüentemente, contribuem na formação do filme (deposição de material).

Figura 2.28 - Deformações plásticas no contato seco - ótica macro.



Fonte: HOLINSKI (2001, p.62)

Nota-se que na fase I, durante o deslizamento inicial, não há transferência de material; além disso, percebe-se um aumento da força de atrito cinético e da temperatura no contato. A partir do ponto onde o atrito atinge seu pico, acompanhado pela curva de temperatura, inicia-se a fase II e a transferência de material; após começada a deposição de partículas, a força de atrito diminui até se estabilizar (BRENDLE e COLIN, 1991). Dependendo do tipo de material, é formado um filme de transferência que cresce até uma certa espessura e passa a governar as propriedades tribológicas do contato, tais como: coeficiente de atrito, flutuação de atrito e taxa de desgaste (LANGLADE, FAYEULLE e OLIER, 1994). Sob a ótica micro, especificamente nos componentes baseados em grafite, como é o caso das escovas, não há de fato a formação de um filme homogêneo; em vez disso, pequenas ilhas de grafite são depositadas a partir de um núcleo (HOLINSKI, 2001).

Garantindo que a tensão tangencial entre superfícies rugosas atritadas seja menor que a resistência de cisalhamento do material, haverá, portanto, a deformação elástica das asperezas, produzindo o aumento da área real de contato, conforme ilustrado na Figura 2.27. Por outro lado, se a tensão tangencial superar a resistência de cisalhamento crítica, o crescimento da junção será interrompido pela deformação plástica abrupta de picos de asperezas, dando origem ao filme, que é na verdade o deslizamento destas partículas na interface (DORINSON e LUDEMA, 1985).

Distribuição da temperatura no contato

No contato seco com movimento relativo, superadas as forças internas de coesão molecular pelas forças de atração das camadas de moléculas de superfícies vizinhas, haverá a tendência de desprendimento de partículas de uma face e consequente adesão desses fragmentos na outra superfície. Esse fenômeno, denominado aderência, relaciona-se intimamente a grandes elevações da temperatura, que levam à fusão de picos de aspereza cisalhados abruptamente (FARIA, 2021). Experimentalmente, observando o atrito de deslizamento entre safira-alumínio e safira-polietileno, verificou-se que o contato seco, com movimento relativo entre asperezas, gera pulsos de temperatura nos chamados *hot spots*, que se aproximam do ponto de fusão dos membros em contato (BOGDANOVICH e TKACHUK, 2005).

O fenômeno da aderência elucidada a benéfica formação da pátina na coleta de corrente, quando ocorre a deposição do carbono na pista, diminuindo o atrito entre as superfícies. Em contrapartida, também fomentada pela aderência, a interpenetração de partículas é capaz de explicar a transferência de cobre do comutador às escovas, bem como a vaporização, nos *hot spots*, dos fragmentos de metal cisalhados. Entretanto, caso não sejam garantidos os níveis mínimos de energia na comutação, o mecanismo de vaporização será comprometido, alterando mecânica de contato das superfícies e, conseqüentemente, levando ao aparecimento do desgaste irregular, dada a elevação descontrolada do coeficiente de atrito (BRUNI, 1984).

A energia no contato é profundamente dependente da corrente implementada na máquina, contudo, pela ótica micro, é necessário avaliar também o calor gerado nos processos tribológicos da interface entre as superfícies. O estudo dos fenômenos

térmicos em contatos secos deslizantes, especialmente os breves pulsos de temperatura, que são gerados nos pontos de contato reais, estão entre os principais fatores que governam a natureza e a taxa de desgaste de contatos sólidos (BOGDANOVICH e TKACHUK, 2005).

A análise térmica do contato pode ser feita calculando a energia dissipada pelo atrito, conforme a Equação (2.12) que, pontualmente, expressa a intensidade do calor gerado em função das coordenadas relacionadas ao ponto (q_{ij}); para tal, é necessário, entretanto, conhecer a distribuição da pressão de contato (p_{ij}), a velocidade de deslizamento (v) e o coeficiente de atrito (μ) (VARADI, NEDER e FRIEDRICH, 1996).

$$q_{ij} = p_{ij} \times v \times \mu \quad (2.12)$$

As Equações (2.2) e (2.3), possuem estreita ligação com a Equação (2.12). Em todas elas, propõe-se a avaliação das perdas tribológicas do contato; nas duas primeiras, contudo, restringe-se à estimativa de perda de potência de escovas eletrográficas e metálicas, em comutadores e em anéis coletores, respectivamente, enquanto a terceira, bem mais generalista, permite calcular o calor gerado pelas deformações dos picos de aspereza de maneira pontual. A integração da Equação (2.12), que considera as áreas de contato reais, permite calcular com bastante precisão a energia dissipada pelo atrito, contudo, dada à complexidade de se obter a distribuição real de pressão no contato, esse tipo de expressão é mais aplicável em ambientes de simulação.

Após elencar, sob a ótica macro, as recomendações essenciais à uma coleta de corrente com mínimo atrito, relacionaram-se os aspectos que regem a mecânica do contato em cada um dos casos. Do ponto de vista micro, percebeu-se que a maioria das observações empíricas foi diretamente validada; em alguns casos, no entanto, sob a abordagem prática, evidenciou-se um certo grau de simplificação na descrição dos fenômenos. Contudo, a fundamentação teórica dos mecanismos de desgaste pôde complementar o entendimento prático, trazendo novas terminologias e aumentando a previsibilidade do desempenho em operação do contato seco.

Todavia, mesmo compreendendo as recomendações práticas e os conceitos da mecânica do contato correspondentes, é ordinário realizar medições em bancada e/ou em operação para avaliar o comportamento dos elementos atritados. Assim, especialmente no estudo da coleta de corrente, propõe-se a investigação acerca das formas de medição de algumas grandezas físicas do contato.

2.4 MEDIÇÕES NO CONTATO SECO

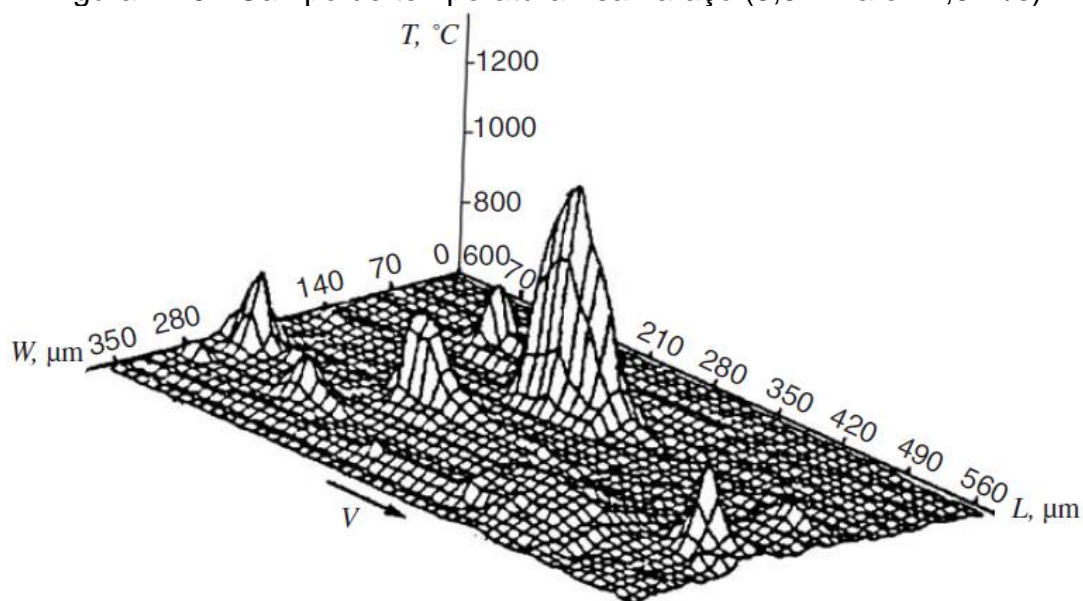
Ainda na revisão bibliográfica, constatou-se que, em alguns casos, inclusive ligados à coleta de corrente, diversos autores desenvolveram métodos, dispositivos e equipamentos para a medição de alguns parâmetros, principalmente temperatura e coeficiente de atrito. Neste item, apresenta-se, portanto, as técnicas mais relevantes:

2.4.1 Medição da temperatura

No Item 2.3.1 apresentou-se uma curva característica de variação do coeficiente de atrito em função do aquecimento na face de contato das escovas sob comutação. De acordo com ARIZA (1977), o controle dos valores de temperatura na abscissa foi feito por meio de medições diretas, utilizando um termopar no interior da escova. Existem diversos métodos de medição de temperatura de forma direta, como por exemplo, termopares, termômetros, fotocélulas, entre outros; contudo, esse tipo de medição estima a temperatura média na área de contato e, com frequência, introduz erros nos resultados da medição (BOGDANOVICH e TKACHUK, 2005).

Com o intuito de compreender fenômenos térmicos do contato entre corpos, sendo pelo menos um deles transparente, e sua relação com a força de atrito, propuseram-se alguns procedimentos em um dispositivo, especificamente projetado para os ensaios. Nele, uma máquina de atrito rotativa de alta velocidade (deslizamento de 0 a 100 m/s) proporcionava a tração necessária ao atrito dos materiais sob análise (safira, alumínio, cobre, titânio, aço, polietileno, poliamida e poliestireno). O campo de temperatura foi medido, durante o funcionamento da máquina de atrito, através de um sistema de registro constituído por lentes de diferentes tamanhos, um scanner óptico, um dispositivo de monitoramento, um gravador de vídeo, um amplificador, um dispositivo capaz formar oscilogramas a partir do brilho captado e um oscilógrafo digital. Na Figura 2.29 é ilustrado o campo de temperatura (T) obtido em um dos ensaios, em função do comprimento (L) e Largura (W), no contato safira-aço (5,5 MPa e 22,5 m/s) (BOGDANOVICH e TKACHUK, 2005).

Figura 2.29 - Campo de temperatura - safira-aço (5,5 MPa e 22,5 m/s).



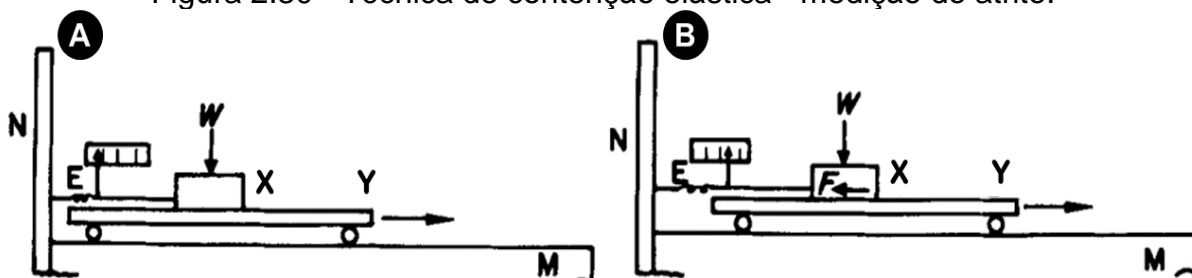
Fonte: Adaptado de BOGDANOVICH e TKACHUK (2005, p. 1357)

Infelizmente, no caso da coleta de corrente, escovas, anéis coletores e comutadores são sempre opacos. Sendo assim, apesar de extremamente relevante na avaliação do desempenho da configuração adotada, o campo de temperatura, evidenciado pelos *hot spots*, não poderá ser medido utilizando o método proposto anteriormente, já que o mesmo carece que pelo menos um dos materiais sob estudo seja transparente.

2.4.2 Medição da força de atrito

A base de um método para a detecção e medição das forças envolvidas no contato seco de duas superfícies com movimento relativo é apresentada na Figura 2.30. Essa simples técnica, chamada de contenção elástica, é a mais utilizada na medição da força de atrito (DORINSON e LUDEMA, 1985).

Figura 2.30 - Técnica de contenção elástica - medição do atrito.



Fonte: Adaptado de DORINSON e LUDEMA (1985, p. 136)

O procedimento consiste em movimentar a placa Y no sentido da seta à velocidade constante, estendendo a mola E, fixa ao pórtico N, até que haja movimento relativo entre o bloco X e placa. Considerando desprezíveis as perdas por atrito nas rodas, o indicador da mola acusará a força de atrito estático no instante imediatamente anterior a movimentação do bloco em relação a placa; posteriormente, quando o movimento relativo entre X e Y acontecer livremente, o indicador acusará a força de atrito cinético.

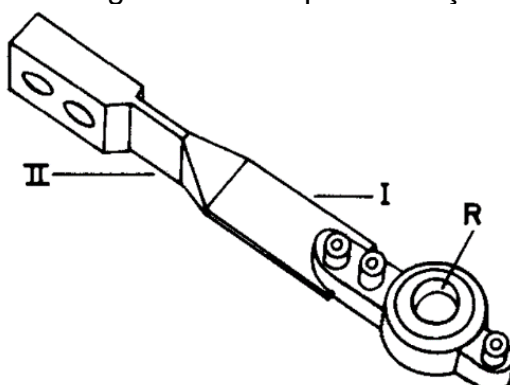
No exemplo ilustrado na Figura 2.30, utilizou-se para a medição da força de atrito pela deflexão de uma mola acoplada a um ponteiro indicador, tal qual um dinamômetro mecânico. Contudo, a medição da deflexão pode ser feita com o auxílio de outros dispositivos acessórios tais como: extensômetros (*strain gauges*), transformadores diferenciais lineares variáveis (LVDT), alavancas ópticas, entre outros.

Além da deflexão de um elemento elástico de restrição (método mais comum), para detectar a força de atrito, utilizam-se de alguns dispositivos que empregam a tração exercida por uma massa sob a influência da gravidade (tração tangencial de peso morto e plano inclinado). Outros métodos se aproveitam da desaceleração do movimento linear ou rotacional, do amortecimento do movimento harmônico simples ou da transferência de momento ou energia do sistema mecânico.

Durante a coleta de corrente, a rigidez dos porta escovas, responsáveis por garantir a pressão no contato e pelo tênue alinhamento das escovas no plano neutro, é fundamental. Com a máquina em funcionamento, almeja-se medir a força de atrito, desenvolvida no contato das escovas com a pista, minimizando ao máximo as chances de falha; para tal, será preciso interferir mecanicamente no sistema de fixação dos porta escovas, tentando garantir o mínimo de movimentação desses dispositivos. Neste sentido, entende-se que, a princípio, o método do elemento elástico de restrição é o mais aplicável à comutação, pois deverá proporcionar uma medição com a máxima rigidez dos dispositivos de fixação das escovas.

O método da deflexão elástica pode ser exemplificado pela viga elástica dupla, exibida na Figura 2.31. Usinados a partir de uma barra única, os elementos I e II são responsáveis, respectivamente, pela medição das forças de carregamento normal e de atrito. O elemento I prende o corpo de prova R, enquanto isso, o elemento II é fixado a qualquer dispositivo que, simultaneamente, implemente força normal e movimento relativo entre o corpo de prova e a superfície sob investigação.

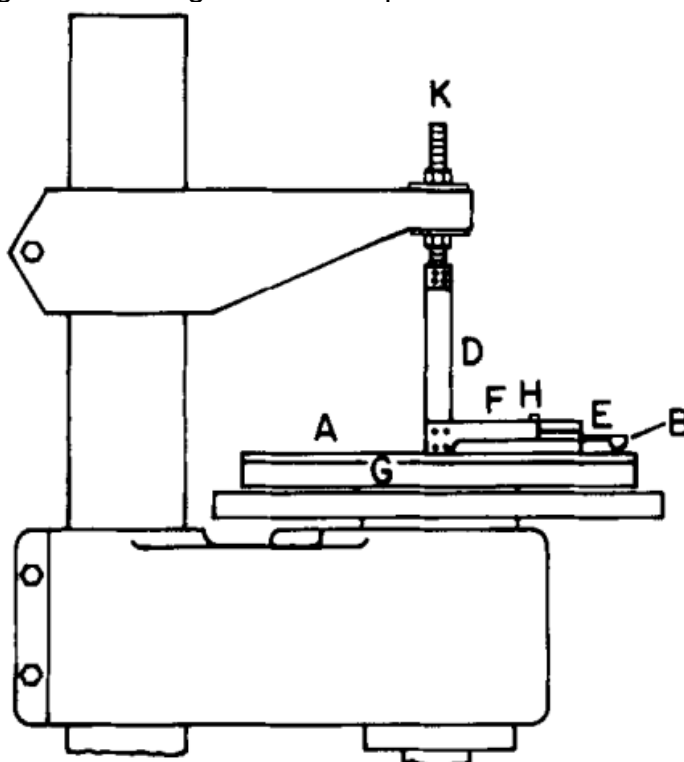
Figura 2.31 - Viga elástica dupla - medição do atrito.



Fonte: DORINSON e LUDEMA (1985, p. 141)

Semelhante ao processo de coleta de corrente, conforme ilustrado na Figura 2.32, apresenta-se um outro tipo de viga elástica dupla aplicável ao movimento rotativo. Atentando-se ao nivelamento, a superfície A (constituída do 1º material sob estudo) é acoplada à placa giratória G; a peça B (constituída do 2º material sob estudo) é acoplado à mola de carga normal E, mantida pelo braço rígido F, fixo no elemento elástico de torção D, posicionado sobre o centro da mesa para responder à força de atrito. O espelho H, fixo ao braço rígido F, reflete um feixe de luz que traça o sinal da força de atrito. O ajuste da força normal pode ser feito através do parafuso K, que movimenta todo o sistema de medição.

Figura 2.32 - Viga elástica dupla - movimento rotativo.



Fonte: DORINSON e LUDEMA (1985, p. 142)

Outro exemplo de medição de coeficiente de atrito correspondente à comutação foi proposto por BOGDANOVICH e TKACHUK (2005). Em um dispositivo com movimento rotativo, especificamente projetado para o estudo de caso, aplicou-se *strain gauges* para realizar as medições da normal e da força de atrito. Nos ensaios utilizaram-se, respectivamente, as seguintes faixas de pressão nominal e velocidade: 0,1 a 0,8 MPa e 1 a 35 m/s para o par safira-polímero e 0,5 a 5,5 MPa e 1 a 60 m/s para o par safira-metal.

Após conhecer algumas técnicas de medição das duas principais variáveis tribológicas do contato, entende-se que, especificamente para a avaliação de desempenho da coleta de corrente, a medição direta de temperatura, exequível mesmo em elementos opacos, e o método do elemento elástico de restrição, que tende a garantir maior rigidez mecânica aos elementos do porta escovas modificado para a medição do atrito, terão grande serventia neste trabalho.

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo destacaram-se a aplicabilidade e o funcionamento dos elementos principais da coleta de corrente. Na sequência, tendo como foco a coleta de corrente nas máquinas cc, bem mais desafiadora que nas demais máquinas escovadas, elencaram-se mecanismos e recomendações associados a comutação.

Compreendendo que o desempenho da comutação, relacionado à ocorrência de falhas e ao desgaste das escovas e do comutador, tem íntima relação com o coeficiente de atrito, apresentou-se uma série de instruções para a atenuação dessa grandeza. De maneira complementar a essa análise macro, abordou-se os fundamentos tribológicos dos mecanismos de desgaste, possibilitando a investigação de casos menos comuns. Além disso, abordaram-se algumas técnicas de medição que serão fundamentais no procedimento experimental apresentado no capítulo 4.

Após esta revisão bibliográfica, apresenta-se o estudo de caso que motivou as investigações, medições e análises exibidas nesta dissertação.

3 ESTUDO DE CASO

Depois de abordar, com foco na comutação, os elementos, fenômenos, variáveis e recomendações relacionadas a melhora do desempenho da coleta de corrente, propõe-se uma complementação prática, que pretende, a partir das considerações teóricas, demonstrar a aplicabilidade das informações até então elencadas. O estudo de caso apresentado destaca as características e funcionalidades do MCVR, dedicando-se, na sequência, a investigação do desgaste anormal do comutador.

3.1 O CONVERSOR ELETROMECAÂNICO ROTATIVO

Atualmente, a eletrônica de potência tem dominado o mercado graças a difusão de novas tecnologias que vem tornando os equipamentos mais acessíveis e confiáveis. Por exemplo, os dez novos TUE's série 1000 do metrô de Belo Horizonte utilizam o chaveamento em estado sólido de inversores que, alimentados pela catenária, suprem todas as demandas do trem, tanto das cargas embarcadas quanto das máquinas assíncronas de tração. Contudo, antes do advento dos inversores, a conversão cc - ca era restrita a um método inteligente, mas rudimentar: a transformação eletromecânica de energia. A tecnologia empregada na época apresenta, em geral, menor rendimento e maior custo de manutenção que sua sucessora, porém, sua robustez e confiabilidade são observadas ainda hoje nas máquinas em operação.

3.1.1 Função e localização

Conforme o manual do motor conversor de tensão rotativo (MCVR), o equipamento, exibido na Figura 3.1, tem por finalidade converter a energia em alta tensão contínua (3000 V), fornecida pela catenária, em energia de baixa tensão trifásica alternada (220

V). Os MCVR's são cruciais no funcionamento e operação comercial dos 25 TUE's série 900 da CBTU (Companhia Brasileira de Trens Urbanos) de Belo Horizonte.

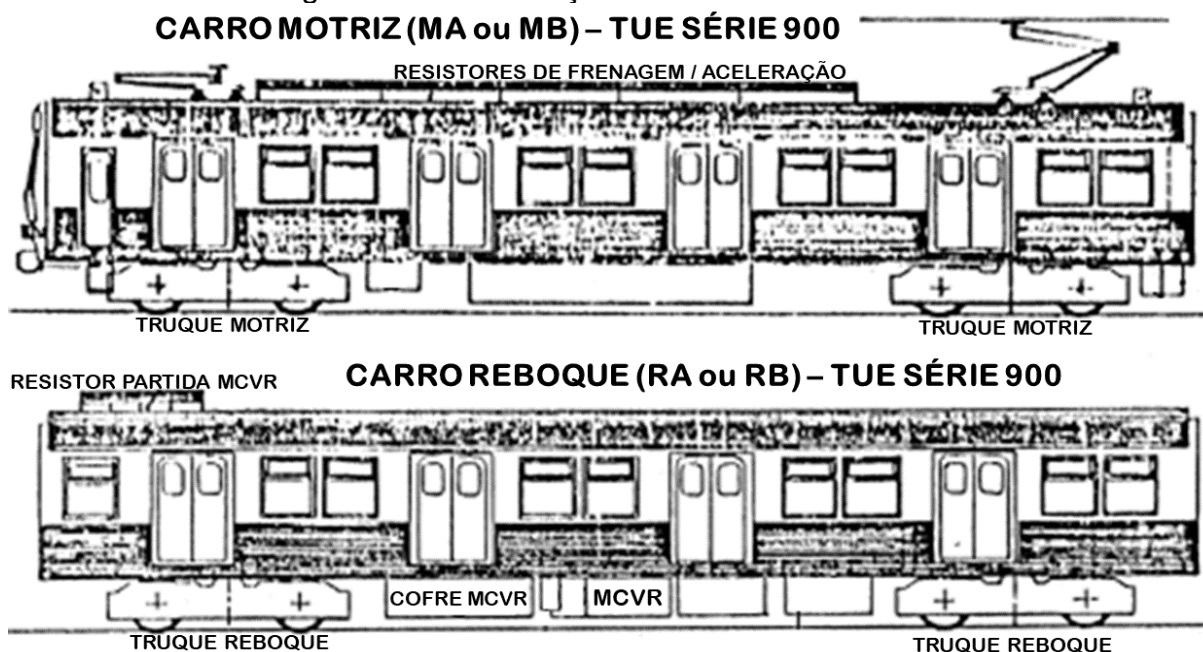
Figura 3.1 - Conversor Eletromecânico Rotativo em operação no trem.



Fonte: AUTOR (2019)

Por TUE, são utilizadas um par de máquinas conversoras, embarcadas sob o estrado no centro dos carros reboques (RA e RB: intermediários e sem tração própria) como é possível observar na Figura 3.2. Por estar acoplada à caixa do trem, o conversor está sujeito a vibrações mecânicas geradas pelas irregularidades dos trilhos e das rodas, contudo existem muitas formas de amortecimento para atenuar as oscilações e reduzir a chance falhas causadas por surtos mecânicos.

Figura 3.2 - Localização MCVR - TUE série 900



Fonte: Adaptado de COBRASMA (1984, p. 6)

Os conversores rotativos são responsáveis por suprir toda a demanda de carga em corrente alternada do trem, incluindo recarga das baterias, ar condicionado das cabines, os sistemas de iluminação, insuflação, exaustão, refrigeração, compressores principais e o freio reostático. Esse último consiste na polarização dos campos dos motores de tração, fixados aos truques dos carros motrizes (MA e MB: externos e com tração própria), segundo exibido na Figura 3.2, para que estes operem como dínamos.

Através da tensão rotacional induzida no rotor e da corrente de armadura coletada pelas escovas, aplicada nos resistores de frenagem, mostrados na Figura 3.2, ocorre a dissipação de potência, gerando um conjugando frenante nos rodeiros. Esse tipo de freio eletromagnético é muito eficiente, pois evita o uso da frenagem mecânica, que, em função do aquecimento, suscita danos à pista de rolamento das rodas, causando mais desgaste no boleto dos trilhos e gerando, além disso, custo com as sapatas.

3.1.2 Características e funcionamento

O conversor rotativo conta com o acoplamento mecânico solidário entre um motor cc composto e uma máquina síncrona *brushless* (tecnologia de excitação sem escovas) que, juntas, formam um conjunto monobloco. As características elétricas de cada uma das partes da máquina são descritas na Tabela 3.1.

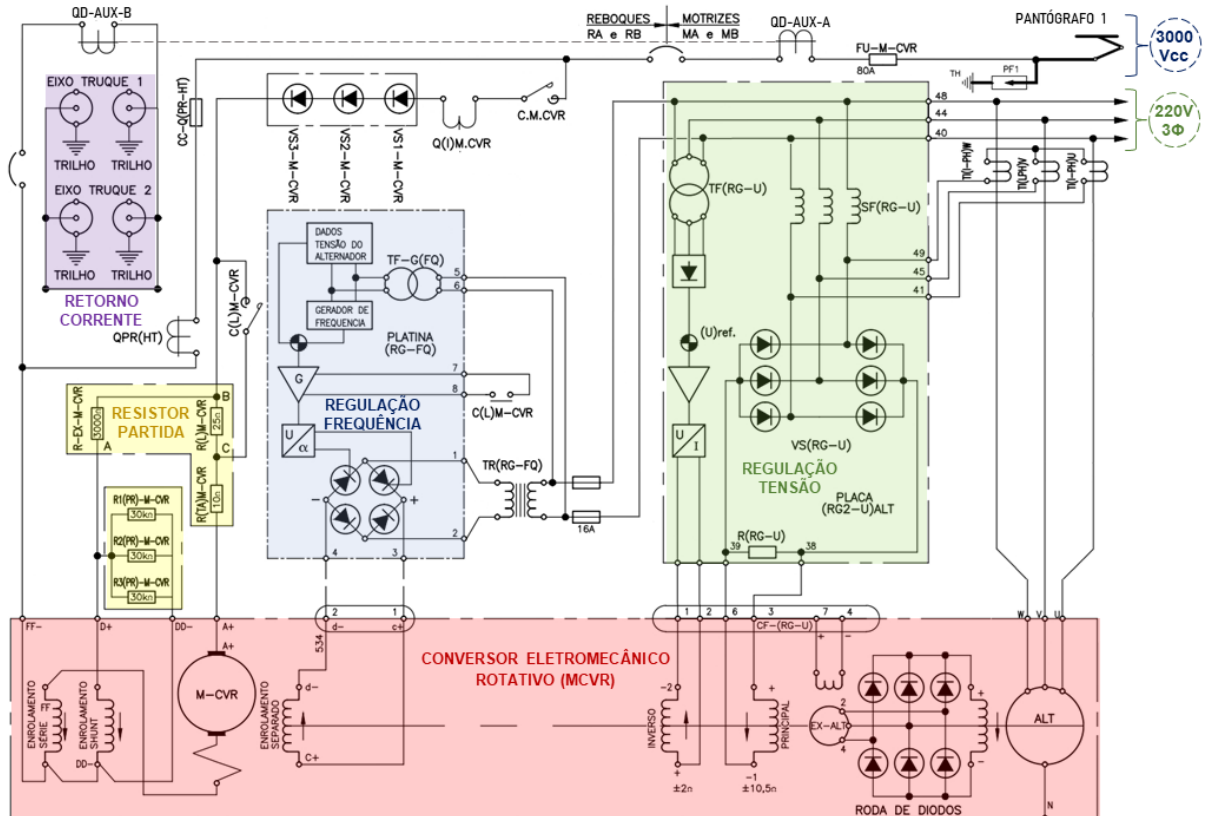
Tabela 3.1 - Especificações dos componentes do MCVR.

MÁQUINA	MOTOR cc	ALTERNADOR 3Φ	EXCITATRIZ
Tipo	2 EUM 3333	4 EUS 2534	160 SP
Marca	TCO (<i>Traction Cem-Oerlikon</i>)		
Fabricação	1982	1982	1983
Potência nominal	50 kW	60 kVA	1,96 kW
Tensão nominal	3000 V (cc)	127 / 220 V (ca)	35 V (cc)
Corrente nominal	19 A (induzido) 0,6 A (indutor)	157 A	56 A
Nº de polos	2	4	8
Excitação / Ligação	Composta aditiva	Y (estrela)	Principal (32V 2,6A) Subtrativa (5V 2A) Δ (delta)
Velocidade nominal	1800 rpm		
Classe de isolamento	F (máximo 155 °C)		
Fator de potência	-	0,75	-

Fonte: Adaptado de COBRASMA (1984, p. 6)

O funcionamento da máquina, representado pelo diagrama exibido na Figura 3.3, pode ser sintetizado como a conversão da energia elétrica na forma de corrente contínua, sob alta tensão da catenária, em energia mecânica na forma de conjugado e velocidade pelo motor cc. Essa energia é transferida por acoplamento mecânico sólido ao rotor de polos salientes da máquina síncrona que, excitado pela corrente de campo proveniente da excitatriz, induz tensão alternada na armadura do alternador, que por sua vez alimenta as cargas em baixa tensão ligadas ao barramento trifásico.

Figura 3.3 - Fragmento do diagrama elétrico do trem - 62 circuitos auxiliares.



Fonte: Adaptado do desenho Demetrô D5-SM-MR64-001N (1986)

No conversor, o controle de tensão (função da corrente de campo da excitatriz) e de frequência (função da velocidade angular do conjunto rotórico), ambas geradas no alternador, é feito de maneira independente por circuitos eletroeletrônicos bastante simples e robustos (COBRASMA, 1984). Espontaneamente, as máquinas com campo shunt possuem boa capacidade de estabilização de velocidade, o que facilita muito a regulação de tensão e frequência (FITZGERALD, KINGSLEY e KUSKO, 1975).

Controle de frequência (velocidade da máquina)

Sendo o motor do conversor uma máquina cc composta, destacada em vermelho na Figura 3.3, alimenta-se à tensão plena o campo shunt por meio dos terminais D+ e

DD-; em seguida, através dos terminais A+ e FF-, a armadura e o campo série partem de maneira controlada, com alívio de tensão propiciado pelos resistores de partida do MCVR, destacados em amarelo na Figura 3.3, até que se atinja o valor máximo, fazendo com que a máquina se estabilize em uma velocidade ligeiramente inferior à nominal. Prontamente, o circuito de regulação de frequência PLATINA (RG-FQ), destacado em azul na Figura 3.3, percebe a subfrequência e injeta corrente nos terminais c+ e d-, chamado campo separado; esse, por possuir polaridade subtrativa em relação ao shunt, enfraquece o fluxo polar e acelera o conjunto rotórico até que a velocidade atinja 1800 rpm, fazendo a máquina síncrona de 4 polos gerar em 60 Hz.

Inserções e retiradas de carga no barramento trifásico do trem são frequentes e intermitentes; isso leva à variação das correntes solicitadas à armadura da máquina síncrona, que por sua vez influi no fluxo de reação de armadura e desestabiliza a velocidade do conversor. No entanto, o circuito PLATINA (RG-FQ) é capaz de perceber mínimas variações de frequência, encarregando-se, portanto, de incrementar ou subtrair a corrente do separado, reestabelecendo a geração em 60 Hz.

Controle da amplitude (tensão gerada)

Na partida, ocorre a injeção de corrente, proveniente da retificação, destacada em verde na Figura 3.3, de amostras de tensão do próprio barramento trifásico no enrolamento principal da excitatriz pelos terminais 3 e 6. Estando em rotação regulada, graças ao ímã permanente existente na excitatriz, a máquina apresenta tensão residual no alternador, o que propicia o chamado escorvamento. Esse processo de realimentação acontece naturalmente até que a tensão se estabilize ligeiramente acima da nominal (220 V).

Controlado pelo circuito eletroeletrônico da PLACA (RG2-U) ALT, destacada em verde na Figura 3.3, a regulação da tensão do barramento é feita através da implementação de corrente nos terminais 1 e 2 da excitatriz. O chamado enrolamento inverso apresenta polaridade subtrativa em relação ao principal, sendo assim, injeções de corrente fazem com que o fluxo do campo da excitatriz seja reduzido, minimizando a corrente de campo e diminuindo as tensões induzidas na armadura máquina síncrona.

As variações de carga já citadas também influem na regulação da tensão do barramento trifásico. O aumento das correntes de armadura do alternador provoca elevação de queda de tensão nos enrolamentos e conseqüente redução das tensões

terminais. O circuito eletroeletrônico percebe a subtensão e diminui a corrente do campo inverso, elevando o potencial do barramento. Naturalmente, ambos os controles (tensão e frequência) devem ser realizados de forma simultânea, pois o sistema é complexo e a variação de qualquer parâmetro influi diretamente nos outros.

Elementos de proteção

Observado atentamente a Figura 3.3, é possível compreender o caminho que percorre a corrente contínua na alimentação do MCVR; a alta tensão é coletada da catenária pelo pantógrafo (localizado no carro motriz), que, conectado ao para-raios (PF1), fornece toda a energia utilizada nos carros MA e RA ou MB e RB. Um dos ramais de alimentação passa pelo fusível principal do conversor rotativo (FU-M-CVR) que é conectado ao relé diferencial de entrada (QD-AUX-A); esse relé, juntamente com seu equivalente de saída (QD-AUX-B) monitoram a corrente de fuga para a massa de todos os equipamentos do ramal, isolando-os em caso de falhas.

Após a conexão entre carros, feita por dois cabos na altura do estrado, encontra-se um fusível (CC-Q(PR-HT)) e um relé de medição de tensão (QPR(HT)), que, conectados à massa, protegem a máquina contra subtensões e sobretensões da rede. A partir desse nó, a corrente segue pelo contator geral de condição de partida (C.M.CVR), passando por um relé de sobrecorrente (Q(I)M.CVR) e por três diodos em série (VS1-M-CVR, VS2-M-CVR e VS3-M-CVR), que impedem qualquer retorno de corrente do MCVR para a catenária. Finalmente, a corrente alcança os resistores de partida, destacados em amarelo na Figura 3.3, alimentando o conversor na partida com alívio de tensão e, posteriormente, com fechamento do contato (C(L)M-CVR), acelerando a armadura para próximo da velocidade nominal.

Dispositivos de retorno de corrente

A conexão final com o polo negativo é feita conduzindo a corrente para a estrutura da caixa do trem, passando por cordoalhas que ligam a aranha do truque aos dispositivos de retorno de corrente, destacados em roxo na Figura 3.3 e ilustrados na Figura 3.4. Esses elementos, montados tanto em truques motrizes quanto reboques, utilizam escovas metálicas, geralmente três, pressionadas por molas do tipo pressão constante contra uma pista circular de latão ou bronze fixada na ponta dos eixos. Assim, a corrente passa das escovas à pista rotativa, descendo pelas rodas até o trilho, que conduz a corrente de volta às subestações retificadoras.

Figura 3.4 - Dispositivo de retorno de corrente - TUE série 900
Exterior Interior



Fonte: AUTOR (2022)

Os dispositivos de retorno de corrente são indispensáveis ao funcionamento dos TUE's, pois viabilizam a condução de correntes de elevada amplitude, limitando sua circulação nos mancais de rolamentos de ponta de eixo, que são vulneráveis à corrosão/erosão elétrica. Esse fenômeno, que reduz a vida útil do mancal, é caracterizado pela diferença de potencial entre os anéis interno e externo, que motiva o aparecimento de arco elétrico entre esses e os elementos rolantes, causando derretimentos, crateras e/ou ondulações nesses componentes (NSK BRASIL, 2001).

Depois de compreender os pormenores do funcionamento do conversor rotativo, destaca-se o histórico, os mecanismos, as condições operacionais e as recomendações relacionadas ao desgaste anormal do comutador.

3.2 DESGASTE ANORMAL DO COMUTADOR

Com base no histórico de manutenções dos MCVR's e considerando as recomendações para a redução do atrito na comutação, investiga-se as causas principais do desgaste anormal. Na sequência, sugere-se novos arranjos de escovas e pressões das molas, que visam atenuar ou eliminar o problema.

3.2.1 Histórico e mecanismos do filetamento

Historicamente, desde 1986, o conversor eletromecânico rotativo veio operando com elevado consumo de escovas e flagrante desgaste anormal no comutador. O filetamento, exibido na Figura 3.5, reduz a vida útil do comutador, contudo, não gera diretamente problemas à operação da máquina; talvez por esse motivo, o desgaste anormal se manteve por décadas sem ser interpelado. Nesse período, diversas escovas eletrográficas foram inseridas nos MCVR's em operação, contudo, devida à falta de critério na escolha do material, somada à carência na rastreabilidade destas máquinas, infelizmente, os diversos testes geraram pouco histórico e muitas falhas.

Figura 3.5 - Desgaste anormal do comutador do MCVR - filetamento.



Fonte: AUTOR (2019)

Um comutador filetado exibe sulcos numerosos e aleatórios dispostos radialmente em todo o perímetro da pista. O filetamento é causado pela deposição de partículas de cobre na face de contato das escovas, principalmente nos porta escovas negativos (escovas catódicas), tornando-as excessivamente duras em pontos arbitrários, inclusive nas zonas de contato real, o que desgasta o cobre como uma ferramenta de usinagem em um torno, deixando o comutador com a aparência de uma rosca fina (BRUNI, 1984).

A presença de ácidos, bases, e alguns óleos na atmosfera de comutação representam contatos perigosos ao equipamento, pois comprometem a formação e a consolidação do filme, fomentando ainda mais os mecanismos do filetamento. Com a película lubrificante comprometida é natural que haja um aumento excessivo no coeficiente de atrito e, por consequência, na transferência de cobre às escovas; concomitantemente,

a degradação do filme pelo elemento contaminador amplia a condutividade entre escova e pista, atenuando ainda mais os níveis de energia no contato.

Além de tornar os efeitos da baixa carga de comutação mais severos, a contaminação envolve as partículas de cobre que se desprenderam, mitigando o benéfico processo de vaporização. Por fim, o filetamento pode também ser impelido dependendo do nível de porosidade do material utilizado na coleta de corrente. Em geral, escovas gráficas ou eletrográficas tratadas e/ou impregnadas tendem a ser menos porosas que as eletrográficas comuns; além disso, qualidades muito macias e/ou de elevada resistividade estão quase sempre associadas à maior porosidade, fator que favorece a deposição de partículas de cobre na face de contato (BRUNI, 1984).

3.2.2 Avaliação da densidade de corrente média de operação

Conforme exibido na Tabela 3.1, o conversor rotativo possui o induzido alimentado nominalmente por uma corrente de 19 A. Tendo em mente que o MCVR conta com a comutação de 4 escovas, cada uma com $2,44 \text{ cm}^2$ de área de seção transversal, recorrendo à Equação (2.7), obtém-se a densidade de corrente nominal da máquina igual a $3,89 \text{ A/cm}^2$. Contudo, dado o filetamento, suspeita-se que a operação dos conversores esteja sujeita à baixa carga de comutação; assim, com o intuito de determinar a densidade média de operação dos MCVR's, recorre-se à seguinte metodologia:

A corrente de armadura é função do carregamento da máquina de corrente contínua. Especificamente no caso dos MCVR's, essa variação ocorre com inserção e retirada das seguintes cargas: farol do carro motriz, refrigeração da cabine do maquinista, iluminação dos salões, recarga das baterias (72V cc), compressor principal, insuflação, exaustão e o freio reostático.

Para calcular o carregamento médio na operação do conversor, mediu-se, utilizando um alicate amperímetro, a influência de cada carga na amplitude da corrente de armadura da máquina. Estes valores, medidos durante a preventiva do TUE N° 18 no pátio de manutenção São Gabriel, são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Corrente de armadura MCVR em função do carregamento - TUE 18.

Carga	Farol	Ar Condicionado	Iluminação	Baterias	Exaustão e insuflação	Compressor	Freio reostático
Correntes individuais (A)	1,6	2,1	2,2	2,2	3,9	3,6	6,1
Corrente dos conjuntos (A)	7,20						
	10,0						
	12,1						
	15,3						

Fonte: AUTOR (2019)

Via de regra, assim que assumem a cabine, os maquinistas ligam o conversor e todas as cargas, com exceção do compressor, acionado todas as vezes que o sistema pneumático apresenta baixa de pressão, e da frenagem reostática, ativada nas entradas de plataforma até que o trem atinja velocidade baixa o suficiente para ação da frenagem mecânica das sapatas no aro das rodas.

Considerando a rastreabilidade e os controles da manutenção realizados por horímetros, sabe-se que os compressores ficam ligados em média 135 horas num período observado de 1 mês. Nesse período, os trens da série 900 percorrem aproximadamente 5000 km, mantendo os conversores energizados por cerca de 650 horas. A via comercial da CBTU BH conta com 19 estações, dispostas em 28,1km de linha, percorridas com uma média de 45 minutos. Desse modo, observa-se que o compressor contribui para o aumento da corrente de armadura em apenas 20,8 % do tempo das viagens no mês. Já a frenagem reostática, aplicada em todas as 19 estações por um tempo médio de 23 segundos, representa num total de 178 viagens mensais, 21,6 horas de frenagem, que retratam apenas 3,3 % do tempo de funcionamento da máquina no referido período.

Assim, a partir dos dados atuais de operação da máquina, calcula-se, através da Equação (3.1), a densidade de corrente média (J_{med}) para os conversores rotativos:

$$J_{med} = \frac{I_{med}}{f \times n \times s} = \frac{(75,9\% \times 7,2) + (20,8\% \times 10,0) + (3,3\% \times 12,1)}{(0,5) \times (4) \times (2,44)} = 1,63 \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (3.1)$$

onde:

I_{med} = Corrente média coletada no comutador com o MCVR em operação (A)

f = Fator 0,5 para comutador e 1 para anéis coletores

n = Número total de escovas por comutador ou por anel coletor

s = Área de seção transversal de uma escova (cm^2)

O valor encontrado representa 41,9 % da densidade de corrente nominal ($3,89 \text{ A/cm}^2$). Mesmo trabalhando com escovas pouco porosas, gráficas ou eletrográficas (tratadas e/ou impregnadas), em função da tendência de provocar o filetamento, é desaconselhável a comutação com menos de 7 A/cm^2 (BRUNI, 1984). Sendo assim, considerando as densidades nominal ($3,89 \text{ A/cm}^2$) ou, em pior caso, a média ($1,63 \text{ A/cm}^2$), percebe-se que, conforme as suspeitas, os conversores realmente operam em baixa carga de comutação, sendo essa uma das prováveis causas do filetamento. Neste estudo, considerando a medição da corrente média na operação do MCVR, utilizou-se o alicate amperímetro especificado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Especificação alicate amperímetro - medição da corrente do MCVR.

Marca	Tipo	CAT	Range	Resolução	Erro
FLUKE	376	III 1000 V	1000	0,1 A	$\pm 2 \%$ (10 a 100 Hz)
	<i>true rms</i>	IV 600 V	A		$\pm 2,5 \%$ (100 a 500 Hz)

Fonte: Adaptado de FLUKE CORPORATION (2010, p. 19 e 20)

3.2.3 Proposta de novas configurações (escova e pressão das molas)

De maneira cautelosa, considerando os limites de operação recomendados pelo fabricante das escovas e observando o regime de operação máquina, é possível adotar algumas medidas corretivas para a eliminação ou mitigação do filetamento.

Remoção de escovas

Dentre as ações mais comuns no combate ao filetamento, destaca-se a remoção de escovas, ajustando a densidade de corrente para níveis adequados (BORGES 2007). Tendo ciência da impossibilidade de alterar as demandas de carga do trem, salienta-se que o conversor rotativo faz uso de quatro escovas que trabalham em par, conduzindo em paralelo, diminuindo as chances de falhas no caso de troca. Por esse motivo, apesar de constatada a baixa carga de comutação na operação dos MCVR's, descarta-se a possibilidade de retirar escovas, deixando apenas uma das pistas em condução, pois isso vulnerabilizaria a coleta de corrente.

Substituição do *grade*

Apesar da remoção de escovas ser desaconselhada no caso dos MCVR's, para evitar o filetamento, é possível ainda alterar o *grade* empregado na comutação. Nesse caso, propõe-se uma comparação de desempenho entre as escovas originais (comuns) e as escovas em teste (impregnadas e tratadas). Na Tabela 3.4 exibem-se as características físico-químicas principais dos dois tipos de escova supracitados.

Tabela 3.4 - Características físicas escova original (01) x escova em teste (02).

PARÂMETRO FÍSICO	UNIDADE	GRADE 01	GRADE 02
Dureza	Shore C2	(Médio) 40	(Médio) 31
Densidade aparente	g/cm ³	1,72	1,61
Resistência à flexão	kgf/cm ²	346,7	160
Coeficiente de atrito	-	M (0,225 a 0,3)	M (0,225 a 0,3)
Resistividade	μΩ.cm	1150	2200
Queda no contato	V	M (1,3 - 1,9)	M (1,3 - 1,9)
Velocidade periférica	m/s	45	40
Densidade de corrente	A/cm ²	12	12

Fonte: Adaptado de GROUPE CARBONE LORRAINE (2000, p. 6) e BRANÇAN (1987, p. 36)

Observando a Tabela 3.4, percebe-se que existem diferenças significativas entre os *grades*; porém, ambos possuem o mesmo limiar de densidade de corrente (12 A/cm²), que representa cerca de 3 vezes a densidade nominal e 7 vezes a densidade média.

Alteração da pressão das molas

O fabricante do conversor, observando a alteração de pressão em função da mudança do comprimento das escovas com o desgaste, indica a faixa de 331 a 404 gf/cm² para garantir uma operação adequada. Comparando esses valores com aqueles exibidos na Tabela 2.4, encontra-se uma discrepância considerável quanto ao tipo de operação do MCVR. A princípio, o conversor estaria funcionando sob o mesmo nível de vibração dos motores de tração (fixos ao truque), superando até as máquinas de alta vibração.

Por estar preso ao estrado do trem, o conversor está sujeito às vibrações geradas pelas irregularidades da via e das rodas, tal qual os motores de tração. Entretanto, há molas e amortecedores principais, que procedem o amortecimento entre os eixos e o truque, bolsas de ar que executam a suspensão entre truque e caixa e os coxins (amortecedores prisioneiros), que permitem absorção de acelerações de até 2 g em todos os sentidos. Portanto, um provável excesso nas pressões das molas poderia

estar contribuindo para o aparecimento do filetamento, sendo necessário avaliar o desempenho tribológico da comutação para a nova faixa proposta: 210 a 260 gf/cm².

No que diz respeito à coleta de corrente, a abordagem teórica dos manuais, livros e catálogos busca contemplar uma grande quantidade de equipamentos e formas de operação. Frequentemente a explanação é realizada de maneira qualitativa tendo como orientação final a realização de medições em bancada, testes operacionais e inspeções de componentes testados. Esses passos serão exibidos no capítulo 4.

3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, que foi dividido em duas seções, exibiram-se diversas informações especificamente relacionadas ao conversor eletromecânico rotativo, equipamento fundamental na operação de 25 trens série 900 da frota do metrô de Belo Horizonte. A primeira seção do estudo de caso foi inteiramente dedicada a apresentação do MCVR, descrevendo sua função e localização no TUE, bem como suas características e o funcionamento, particulares dessa máquina conversora.

A segunda seção concentrou-se na investigação do desgaste anormal do comutador. Inicialmente, apresentam-se o histórico e, baseado em aspectos teóricos da revisão bibliográfica, os principais mecanismos do filetamento. Na sequência, estimou-se, a partir de dados operacionais, a densidade média de corrente, comprovando a suspeita de baixa carga de comutação. Ao final, buscando atenuar ou eliminar o filetamento dos comutadores, apresentaram-se uma série de recomendações, tais como: remoção de escovas, substituição do *grade* e alteração da pressão das molas.

Após constatar a baixíssima carga de comutação, em comparação com outros tipos de máquinas cc, levantou-se a suspeita de que grande parte dos fenômenos da comutação, tal qual as recomendações para o ganho de desempenho operacional, não poderiam ser diretamente acatadas no estudo de caso dos MCVR's. Nesse contexto, surge a necessidade de medir as variáveis tribológicas mais relevantes na análise mecânica do contato seco, verificando a real equivalência na coleta de corrente do conversor com máquinas cc mais comuns. Essas medições, assim como a análise dos resultados obtidos, serão tratadas adiante.

4 PROCEDIMENTOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após compreender os principais dispositivos da mecânica do contato escova-comutador, inteirar-se de algumas formas clássicas de medição e reconhecer os danos que o filetamento impõe à comutação nas máquinas conversoras, realizam-se, de forma concatenada, alguns procedimentos experimentais. Nesse contexto, a partir de cada resultado parcial apresentado, é possível justificar o passo seguinte, atenuando ao máximo as chances de falha na operação do MCVR.

Inicialmente, através das medições em bancada, obtém-se a previsão do desempenho tribológico das configurações sugeridas. Na sequência, realiza-se o categórico teste em operação dos arranjos propostos. Finalmente, recorre-se à análise da face de contato das escovas testadas, concluindo acerca do desempenho e do filetamento.

4.1 MEDIÇÕES EM BANCADA

Após realizar o cálculo nominal e, também, médio da densidade de corrente nos MCVR's, observando o catálogo de diversos fornecedores, percebe-se que não existem escovas, nem mesmo dentre as gráficas, com valor limite para densidade de corrente tão baixo. Isso mostra que, em geral, as máquinas cc coletam uma densidade de corrente superior àquela implementada nos conversores rotativos que, por serem alimentados em 3 kV, nível de tensão cc incomum para uma máquina com apenas 50 kW, tem comutado sob baixa carga.

Suspeita-se, portanto, que a maior parte dos mecanismos da comutação, juntamente com as diversas recomendações para a melhoria de desempenho, generalizadas a todas as máquinas cc, seja fortemente influenciada pela diminuta densidade de corrente. Assim, surge a necessidade de mensurar, especificamente para o caso do conversor rotativo, os dois principais parâmetros relacionados ao desempenho da coleta de corrente: temperatura no contato e coeficiente de atrito.

No transporte ferroviário de passageiros, as medições em operação comercial são extremamente burocráticas, pois além dos riscos relacionados à energização de alta

tensão contínua, descritos pela NR10 (Norma Regulamentadora 10), existe a chance de falha da máquina, que pode, inclusive, levar à imobilização do TUE.

Por questão de segurança e praticidade, durante as manutenções na oficina de máquinas rotativas, realizam-se no conversor diversos ensaios elétricos e mecânicos que demandam a implementação da velocidade angular nominal à baixa tensão contínua, cerca de 500 V. Isso só é possível se a alimentação da máquina for feita apenas por meio do campo série, suprimindo o campo shunt, tornado o nível de tensão acessível a fontes trifásicas tiristorizadas de bancada. Energizando a excitatriz, é possível implementar pequenas cargas trifásicas no alternador, levando a máquina a comutar em corrente nominal. Ainda em baixa tensão cc, cerca de 600 V, é exequível a injeção de pequenas correntes no campo shunt, que elevam consideravelmente o fluxo polar, aumentando as tensões de velocidade, fazendo com que o MCVR opere com tensões mais elevadas e correntes bem próximas da condição a vazio.

Essa adaptabilidade notável da máquina composta permite que, sob velocidade nominal, quaisquer ensaios relacionados à variação da densidade de corrente de comutação sejam exequíveis em baixa tensão, proporcionando resultados fidedignos.

4.1.1 Procedimento para a medição prévia da temperatura no contato

Na oficina de máquinas rotativas, por meio de um pirômetro digital, equipamento que mede irradiação térmica da superfície de um objeto informando a sua temperatura, devidamente ajustado para a emissividade do carbono ($\epsilon_{\text{carbono}} = 0,85$), foram executadas medições prévias no corpo de escovas em conversores com diversas configurações de pressão, *grade* e densidade de corrente.

Os resultados foram inesperados. Com a máquina comutando nominalmente, obteve-se o valor máximo de 60 °C, utilizando as escovas e as pressões recomendadas pelo fabricante. Mantendo a configuração original, porém, retirando um par de escovas, conduzindo por uma pista, o que acarreta no dobro densidade de corrente, percebeu-se uma pequena, porém inesperada queda na temperatura (57°C). Ambos os valores, contudo, estão longe das faixas operacionais de temperatura consideradas normais para a comutação: de 85 °C a 110 °C, tal qual abordado no item 2.3.1.

Evidentemente, a técnica de medição superficial utilizando esse tipo de termômetro infravermelho foi sequer citada na revisão bibliográfica. Possivelmente, a temperatura do corpo da escova não retratasse a mesma observada no contato com o comutador; sendo necessário adotar, portanto, outro método de medição mais confiável.

Na medição prévia da temperatura, utilizou-se o pirômetro especificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificação pirômetro - medição prévia da temperatura.

Marca	Tipo	Range	Resolução	Precisão
RAYTEK	MX2 DT	-90 a +900 °C	0,1 °C	± 0,75 %

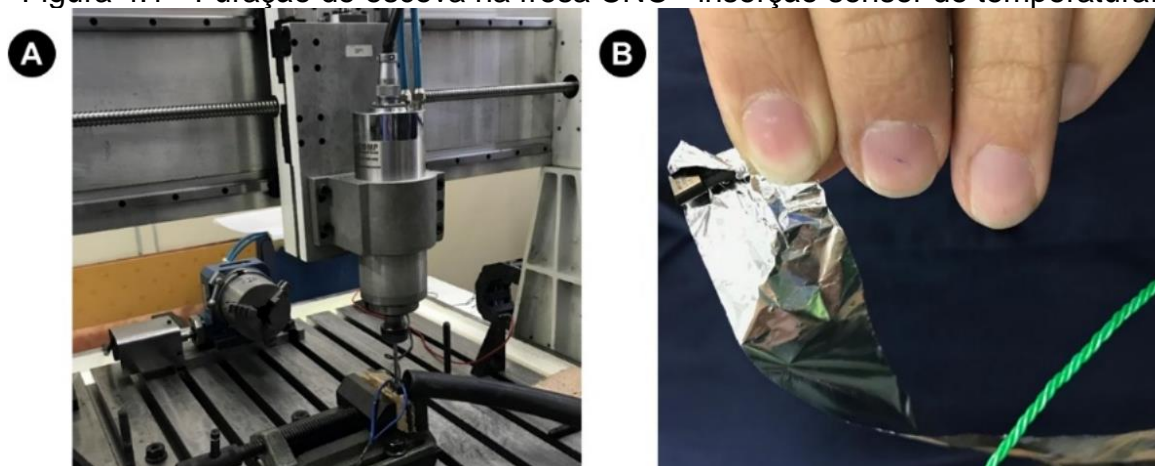
Fonte: Adaptado de RAYTEK (2003, p. 17)

4.1.2 Procedimento para a medição da temperatura no contato

Pela extrema dificuldade de medir o campo de temperatura no contato seco, formado pelos chamados *hot spots*, fundamentais no entendimento físico dos processos da comutação, optou-se por realizar a medição direta da temperatura no contato. Apesar disso, tendo como base a curva de coeficiente de atrito em função da temperatura, apresentada por ARIZA (1977), pode-se considerar que os critérios propostos pelo autor estejam sendo atendidos, permitindo, portanto, uma comparação de resultados.

Para realizar a inserção do sensor, garantindo que o desgaste natural das escovas não levaria ao contato desse componente com a pista, danificando o comutador, executou-se a furação controlada, através de uma fresa CNC, mantendo uma distância de segurança de 5 mm da face, conforme é mostrado na Figura 4.1A.

Figura 4.1 - Furação de escova na fresa CNC - inserção sensor de temperatura.

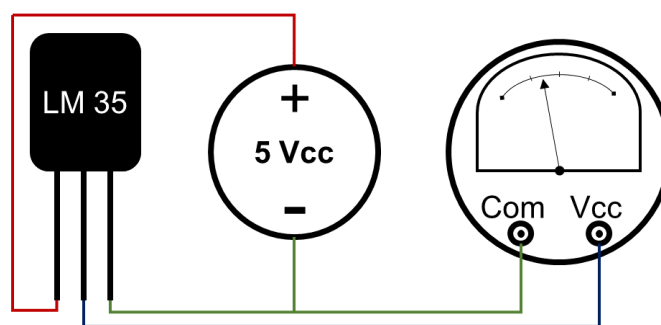


Fonte: AUTOR (2019)

O elevado volume dos termopares disponíveis impossibilitou a compatibilização com as dimensões das escovas. Além disso, o isolamento eletromagnético dos condutores do par termoelétrico, que é bastante complicado, seria necessário, já que a presença de ruídos poderia comprometer as medições. Utilizou-se então, conforme exibido na Figura 4.1B, um circuito integrado (CI) LM35 para a medição da temperatura.

A simplicidade de ligação, apresentada na Figura 4.2, e tamanho reduzido do CI LM35 foram cruciais para a inserção, acompanhada de pasta térmica, no interior das escovas. Assim, foi possível executar inclusive uma pequena blindagem, ilustrada na Figura 4.1B, no corpo do CI e nos condutores de alimentação e sinal, utilizando papel alumínio, protegendo o conjunto mecanicamente com espaguete termo retrátil.

Figura 4.2 - Esquema de ligação do CI LM35 - medição de temperatura.



Fonte: AUTOR (2022)

Para a medição direta da temperatura, utilizou-se o CI especificado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificação CI LM35 - medição direta da temperatura.

Marca	Tipo	Range	Alimentação	Ganho	Precisão
TEXAS	LM35	-50 a +150 °C	4 a 30 V cc	10 mV/°C	± 0,5 °C

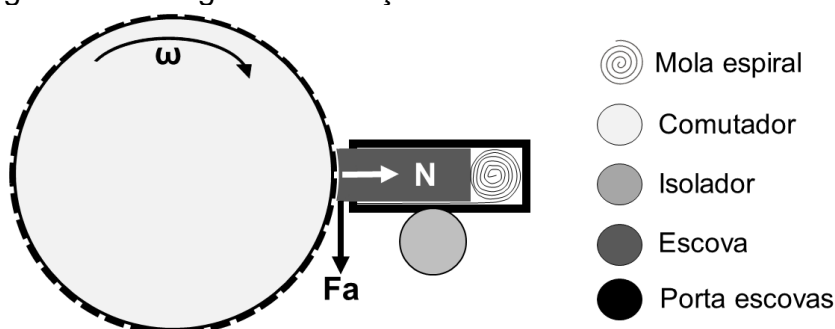
Fonte: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS (2017, p. 1)

4.1.3 Procedimento para a medição da força de atrito

No caso do conversor eletromecânico o contato escova-comutador opera praticamente em velocidade constante (1800 rpm) excetuando a partida, a parada e as pequenas oscilações de giro com a inserção ou retirada de carga do barramento. Assim, considerando que, em geral, é nula a aceleração, conclui-se que a força de aceleração da máquina se iguala à somatória das forças de atrito do conjunto, sendo a força de atrito cinético no contato escova-comutador relevante para este estudo.

Para a medição do coeficiente de atrito cinético, é necessário conhecer a força normal e a variação da força de atrito em função da temperatura. No caso da comutação, como é possível observar na Figura 4.3, a normal (\vec{N}) possui mesmo módulo, porém sentido inverso à força da mola, responsável pela pressão no contato escova coletor; já a força de atrito (\vec{F}_a), perpendicular à normal, surge nas escovas assim que há movimentação da pista na forma de velocidade angular (ω), no sentido tangencial ao coletor, tentando contrapor seu giro.

Figura 4.3 - Diagrama de forças no contato escova comutador.



Fonte: AUTOR (2022)

Admitindo que não há aceleração no porta escovas, conclui-se que o somatório de forças é nulo, sendo assim, as forças de atrito e de reação do porta escovas são iguais em módulo e direção, porém, com sentidos contrários. Portanto, conforme exposto no método do elemento elástico de restrição, a amplitude do atrito deve ser medida como a reação do porta escovas, que impede que o mesmo entre em movimento junto com o comutador. Assim, a reação poderia ser estimada a partir de medidas de deformação (relacionadas a tensão local) via extensometria, utilizando por exemplo *strain gauges*.

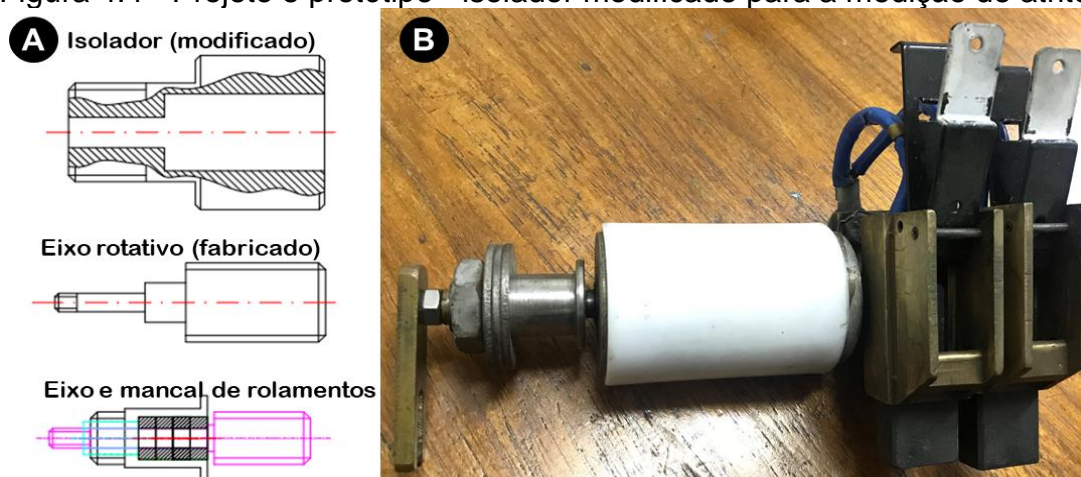
Nos conversores o porta escovas é fixado na ponta de um isolador, constituído de um composto polimérico e revestido com uma capa de teflon para proteção mecânica; esse conjunto é fixado rigidamente na carcaça da máquina. Para medir a força de atrito, os *strain gauges* poderiam, por exemplo, ser fixados nos isoladores; contudo, esses sensores seriam submetidos a diversas forças de cisalhamento que poderiam interferir na medição, sendo necessário no futuro, uma análise mais aprofundada.

O dispositivo de medição proposto neste estudo de caso apreende mecanicamente a força de atrito, isolando-a das demais. Para tal, utiliza-se do momento gerado pela força de atrito no sentido de rotacionar o porta escovas. O torque é, então, extraído para fora da máquina e medido com o braço de alavanca adequado, por meio de um dinamômetro digital (equipamento notadamente desenvolvido para medição de força).

Adaptação do porta escovas original

Inicialmente, conforme o projeto e o protótipo exibidos, respectivamente, na Figura 4.4 A e na Figura 4.4B, utilizando mancais de rolamentos, eixos e buchas, criou-se a possibilidade de rotacionar todo o porta escovas em torno da fixação do isolador. A adaptação do porta escovas original, porém, não proporcionou medições consistentes, já que a própria força das molas imprimia ao sistema um torque no sentido contrário àquele criado pela força de atrito, resultando em medições subtrativas e que nunca retornavam a zero após a parada do comutador.

Figura 4.4 - Projeto e protótipo - isolador modificado para a medição de atrito.



Fonte: AUTOR (2019) - software AutoCAD

Para anular a influência direta da normal na medida, propôs-se deslocar o eixo de rotação para o centro de massa das escovas, fazendo com que qualquer momento gerado fosse unicamente devido à ação da força de atrito. O dinamômetro digital seria posicionado através de um braço de alavanca com comprimento igual a distância entre o centro de massa e a face das escovas. Tal configuração, construtivamente mais complexa que a anterior, permitiria medir o valor instantâneo da força de atrito no tempo, de forma que a mesma fosse anulada assim que cessasse o movimento.

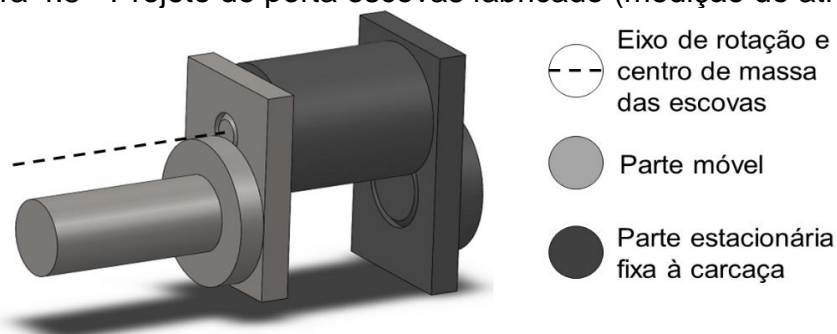
Fabricação de um porta escovas especial

Por uma questão construtiva, para deslocar o eixo de rotação do dispositivo de medição, seria impossível manter o isolador na fixação mecânica entre carcaça e porta escovas. Ao invés de uma simples adaptação, tal qual exibido na Figura 4.4B, foi necessário, portanto, projetar uma nova peça, conforme ilustrado na Figura 4.5.

O mecanismo foi projetado em aço *SAE (Society of Automotive Engineers) 1020*, que apesar de não ser isolante, possui resistência mecânica adequada, apresenta baixo

custo e possui excelentes usinabilidade e soldabilidade. Para garantir a rotação com o mínimo de interferência na medição, leia-se com as mínimas perdas por atrito, o dispositivo conta com o apoio de quatro mancais de rolamento em paralelo.

Figura 4.5 - Projeto do porta escovas fabricado (medição do atrito).



Fonte: AUTOR (2022) - software *SolidWorks*

Conforme salientado, o material utilizado na fabricação deste dispositivo de rotação possui muitas vantagens no ponto de vista mecânico, contudo, por ser metálico, não se pôde manter a isolação entre porta escovas e carcaça. Apesar disso, mediu-se a tensão induzida e a corrente de fuga de ambos os porta escovas para a carcaça, resultando na escolha do porta escovas do lado da caixa terminal, com potencial praticamente nulo em relação à massa. Por questão de segurança, acoplou-se o ponto escolhido à carcaça, ligando o conjunto à malha de aterramento do galpão da oficina. Observando a Figura 4.6, destaca-se o porta escovas fabricado, sem isolação para a massa, à esquerda e o porta escovas original, com o isolador preservado, à direita.

Figura 4.6 - Porta escovas fabricado (medição do atrito) e original.



Fonte: AUTOR (2019)

Com o giro da máquina, apareceria um momento no sentido de rotacionar o porta escovas, tal movimentação seria impedida pela ponteira do dinamômetro que, se aproveitando desse contato, seria capaz de medir a força de atrito. A regulação de zero seria feita utilizando a rosca da ponteira, fixando-a, ao final, com a contraporca.

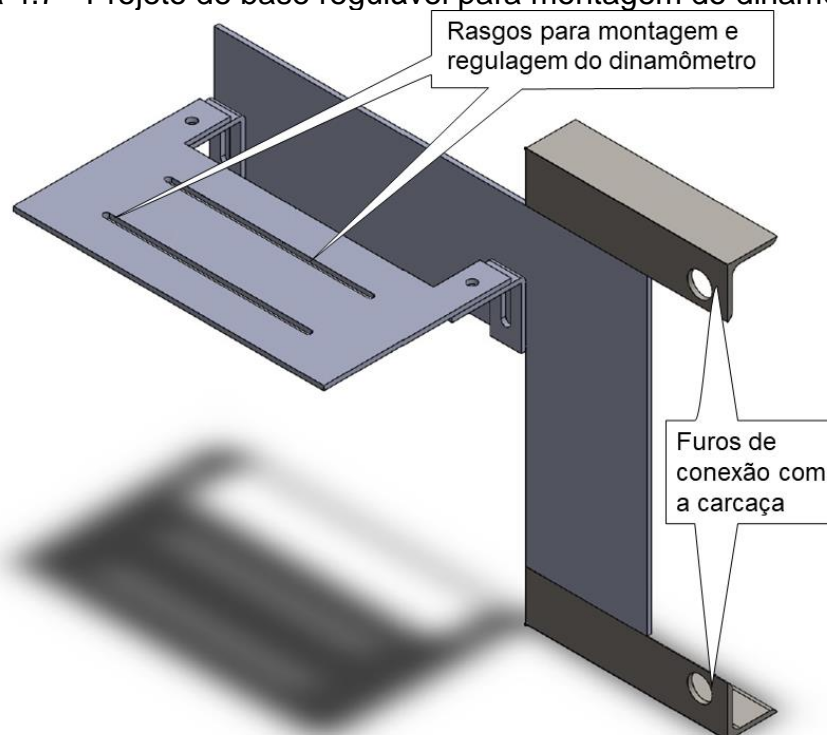
Após os primeiros testes, percebeu-se a necessidade de incluir, no dispositivo de medição de atrito, conforme se observa na Figura 4.6, um batente, responsável por

impedir qualquer movimento contrário ao gerado pela força de atrito, possibilitando um ajuste zero mais fidedigno e conferindo maior robustez ao sistema mecânico.

Fabricação da base de fixação do dinamômetro

Para garantir medições mais consistentes e com o mínimo de oscilação, bem como evitar falhas mecânicas durante o processo, montou-se o dinamômetro rigidamente ao estator da máquina. Para tal, projetou-se um dispositivo, exibido na Figura 4.7, regulável por meio de furos oblongos, que foi posteriormente fabricado em chapa aço SAE 1020 e soldado a cantoneiras para aumentar sua rigidez mecânica.

Figura 4.7 - Projeto de base regulável para montagem do dinamômetro.



Fonte: AUTOR (2019) - software *SolidWorks*

Nos testes iniciais foi constatada instabilidade na base de montagem do dinamômetro durante a aceleração da máquina; em uma certa faixa de velocidades, o sistema entrava em ressonância e vibrava o aparelho, piorando as medições. A solução encontrada foi soldar outra cantoneira na parte traseira da base e inserir uma espécie de mão francesa, conferindo ao mecanismo um terceiro ponto de conexão à carcaça.

Na medição da força de atrito, utilizou-se o dinamômetro especificado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Especificação dinamômetro - medição da força de atrito.

Marca	Tipo	Range	Resolução	Precisão
IMPAC	IP-90DI-50	0,5 a 50 N	0,01 N	± 0,5 %

Fonte: Adaptado de IMPAC (2014, p. 4 e 5)

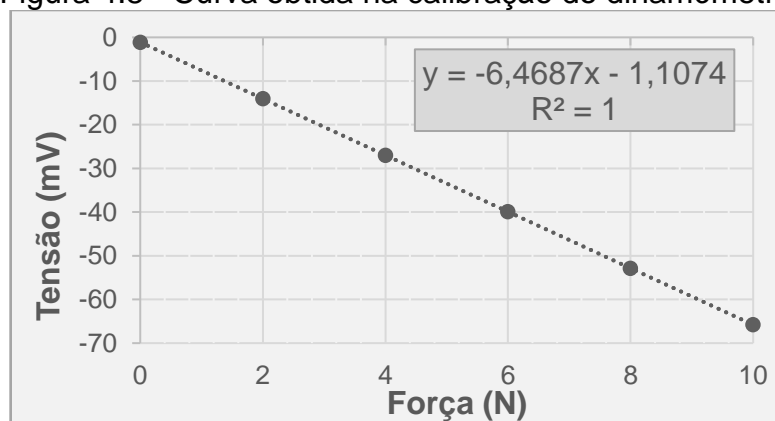
4.1.4 Procedimento para a aquisição de dados e calibração

Todas as melhorias relacionadas no item 4.1.3 foram fundamentais para o ganho de rigidez mecânica do sistema, porém, nas medições prévias, a força de atrito continuava oscilando, impedindo qualquer conclusão assertiva sobre sua variação de amplitude em função da temperatura. Uma forma para resolver o problema seria aumentar a taxa da amostragem, registrando centenas de medições por segundo e, posteriormente, tratando os dados num computador. Porém, o dinamômetro citado não possui saída analógica que possibilite a aquisição de dados. Para solucionar esse problema, analisou-se o circuito eletrônico do equipamento a partir da célula de carga, até encontrar a última saída dos amplificadores operacionais antes da conversão AD (analógico digital); por meio de cabos auxiliares, sem interferir no circuito do dinamômetro, extraiu-se o sinal de tensão tendo como referência o terra da placa.

Para a interface com o computador, utilizou-se um *hardware* de aquisição de dados da *National Instruments* (DAC). Esse equipamento recebe, através de entradas analógicas, os sinais de tensão relacionados à força e à temperatura, convertendo-os em sinais digitais e enviando-os para o computador. A calibração da temperatura foi feita com base no ganho do CI LM35 (10 mV/°C); multiplicando-se os valores de tensão (em mV) pela constante 100 obtém-se o valor da temperatura no CI (em °C). Por exemplo, a uma temperatura igual a 20 °C o CI envia um sinal de tensão de 200 mV que multiplicado pelo ganho 100 é interpretado como 20 °C na saída.

Para realizar a calibração relacionada a medição do atrito houve a necessidade de estimar a curva de tensão em função da força aplicada, ilustrada na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Curva obtida na calibração do dinamômetro.

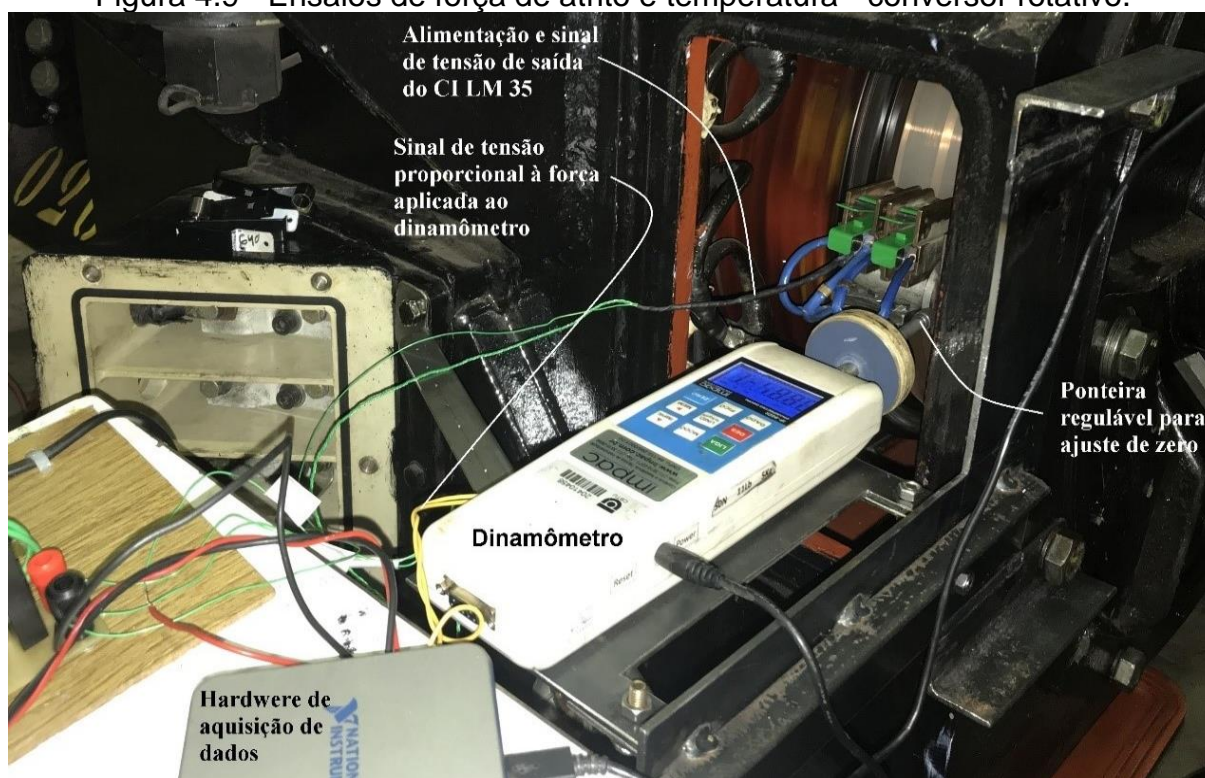


Fonte: AUTOR (2022)

Através do ajuste da rosca da ponteira do dinamômetro, aplicaram-se incrementos de força (0 a 10 N) e mediram-se valores de tensão relacionados (-1,107 a -65,795 mV), fazendo a média da tensão a cada ajuste. Assim, obteve-se curva de tensão em função da força, dada pela expressão $V = -6,4687 F - 1,1074$, com componente quadrática unitária, que demonstra o rigor das medições adotadas na regressão linear.

Na Figura 4.9 é mostrado o arranjo final da medição em bancada; nela, todos os equipamentos e dispositivos descritos até aqui apresentam-se instalados na máquina.

Figura 4.9 - Ensaio de força de atrito e temperatura - conversor rotativo.



Fonte: AUTOR (2019)

4.1.5 Procedimento padrão para a energização do conversor

Finalizada a calibração dos medidores, para realizar os testes em bancada, escolheu-se o conversor rotativo N° 026, que passou por todas as etapas de manutenção, incluindo a troca dos mancais de rolamento e o reperfilamento do comutador. Na sequência, mediram-se os valores de temperatura e força de atrito, procurando manter a velocidade constante em 1800 rpm e buscando os mesmos padrões de aceleração e carregamento da máquina, porém, dado o ajuste manual da fonte por meio de um

potenciômetro, nas trocas de carga é possível que tenha havido alguma variação na velocidade, sendo toleráveis alterações não previstas na temperatura.

Em todas as curvas de temperatura e força no tempo, acelerou-se o MCVR até a velocidade nominal, excitando-o somente por meio do campo série e respeitando seu limite de corrente (máximo 19 A), obtendo, após a estabilização do giro, a corrente na faixa dos 8 A, chamada de meia carga. Nessa faixa, a máquina comuta conforme a densidade de corrente média de operação, sendo esse o ponto mais relevante na escolha do *grade* e da pressão das molas que melhorem o desempenho da coleta.

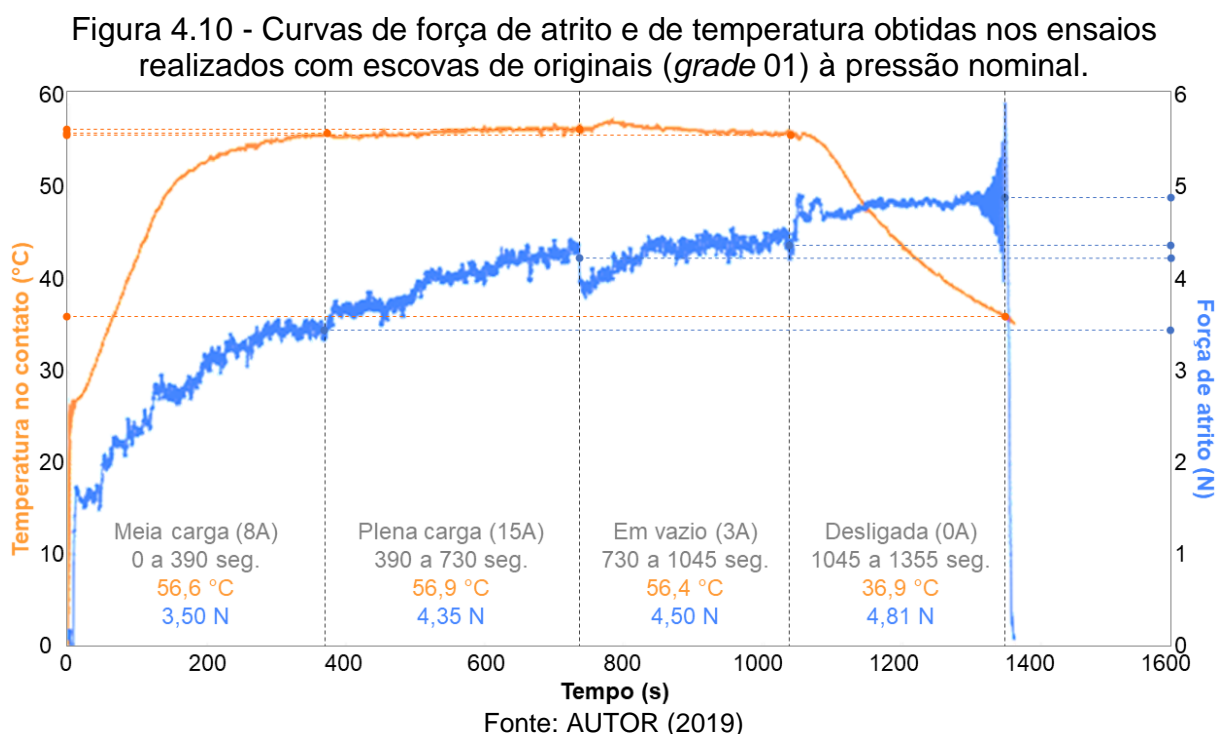
Posteriormente, inseriu-se carga no alternador, sendo necessário incrementar o ajuste de potência na fonte de alimentação para impedir a queda na velocidade. Esse ajuste eleva a corrente para a faixa dos 15 A, que simula o carregamento total da máquina quando em operação no trem. Em seguida, desconectou-se a carga e implementou-se, quase instantaneamente, a corrente de campo shunt; essa inserção proporcionou o aumento do fluxo polar que elevou os níveis de tensão de velocidade, fazendo com que a corrente de armadura caísse para valores na faixa dos 3 A, que simulam o carregamento da máquina operando a vazio no TUE.

Em todas as medições, os patamares de corrente foram mantidos até que a temperatura se estabilizasse, sendo assim, procedeu-se a troca de carregamento até que a máquina já tivesse comutado nas três condições descritas. A princípio, esses passos seriam executados contemplando dois tipos distintos de escovas em quatro regimes diferentes de condução: *grade* 01 (original) e *grade* 02 (em teste) combinados com as pressões nominais (331 a 404 gf/cm²) e reduzida a valores confiáveis (210 a 260 gf/cm²). Porém, seguindo recomendação do fabricante, os ensaios e testes da escova original com valores reduzidos de pressão não foram realizados.

4.1.6 Resultados das medições em bancada

Seguindo rigorosamente os procedimentos descritos no item 4.1.5 e utilizando os dispositivos especialmente desenvolvidos para este estudo de caso, mostrados nos itens 4.1.2 e 4.1.3, obtiveram-se as seguintes curvas de força de atrito e temperatura no tempo:

Exibe-se, na Figura 4.10, as curvas da configuração original da máquina: escovas do tipo 01 (original) comutando à pressão de molas nominal (331 a 404 gf/cm²).



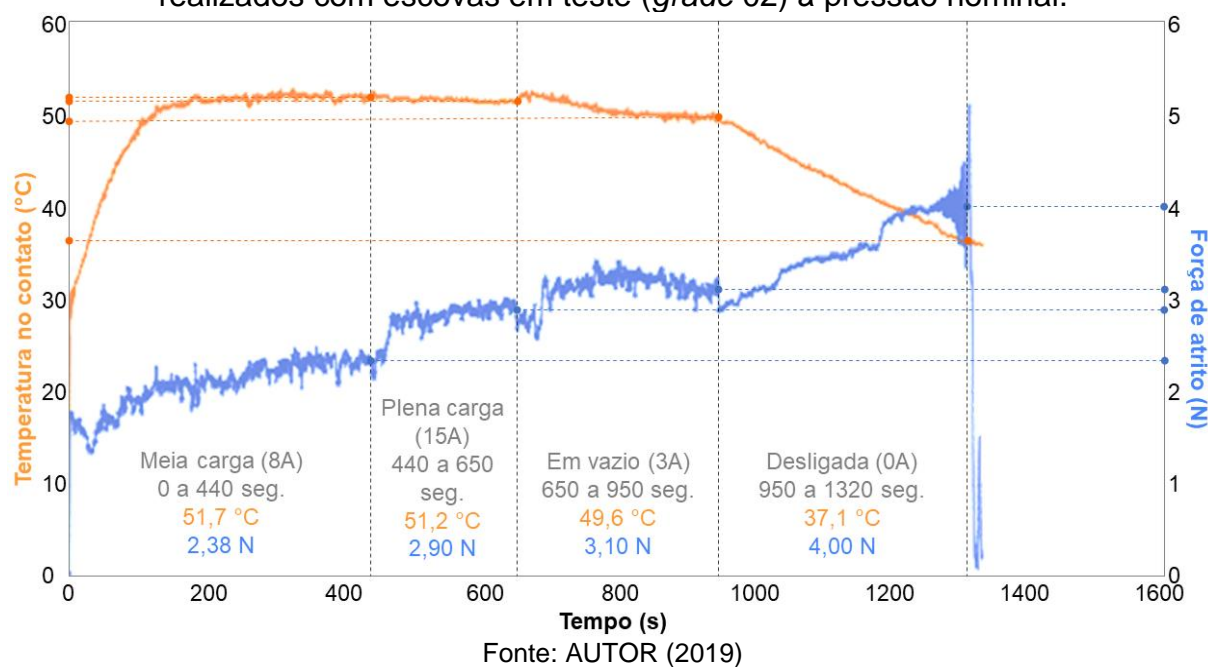
Observando a curva de temperatura, percebeu-se, como na carga de um capacitor, uma subida característica de um sistema de primeira ordem, estabilizando-se em 56,6 °C após 390 segundos de energização com 8 A; juntamente com a temperatura, a força de atrito demonstra a mesma forma de crescimento, se estabilizando em 3,5 N.

Ao inserir carga, no intervalo de 390 a 730 segundos, ocorre um acréscimo na temperatura, justificado pela elevação de corrente de 8 A para 15 A, porém esse acréscimo é muito menor que o esperado, levando as escovas a 56,9 °C e fazendo a máquina comutar com uma força de atrito de 4,35 N, demonstrando uma variação considerável da força de atrito em relação ao aumento da densidade de corrente.

Retirando a carga observou-se, no intervalo de 730 a 1045 segundos, um pequeno crescimento da temperatura devido à aceleração do conversor, assim que houve a estabilização mediu-se 56,4 °C, uma temperatura mais baixa que as duas primeiras, dada ao afundamento da densidade de corrente, e uma força de atrito de 4,5 N, maior até mesmo que a verificada quando em maior carregamento.

Exibe-se, na Figura 4.11, as curvas da máquina, ainda operando com valores originais de pressão, porém, utilizando escovas do tipo 02, impregnadas e tratadas.

Figura 4.11 - Curvas de força de atrito e de temperatura obtidas nos ensaios realizados com escovas em teste (*grade 02*) à pressão nominal.



A curva de temperatura apresentou o mesmo crescimento característico percebido na Figura 4.10, porém a estabilização aconteceu em 51,7 °C após 440 segundos de operação à meia carga, valor 8,7 % menor que com o *grade 01*. A força de atrito atingiu um patamar também inferior, 2,38 N que retratam a queda de 32 % na força de atrito para as mesmas condições de carregamento e pressão.

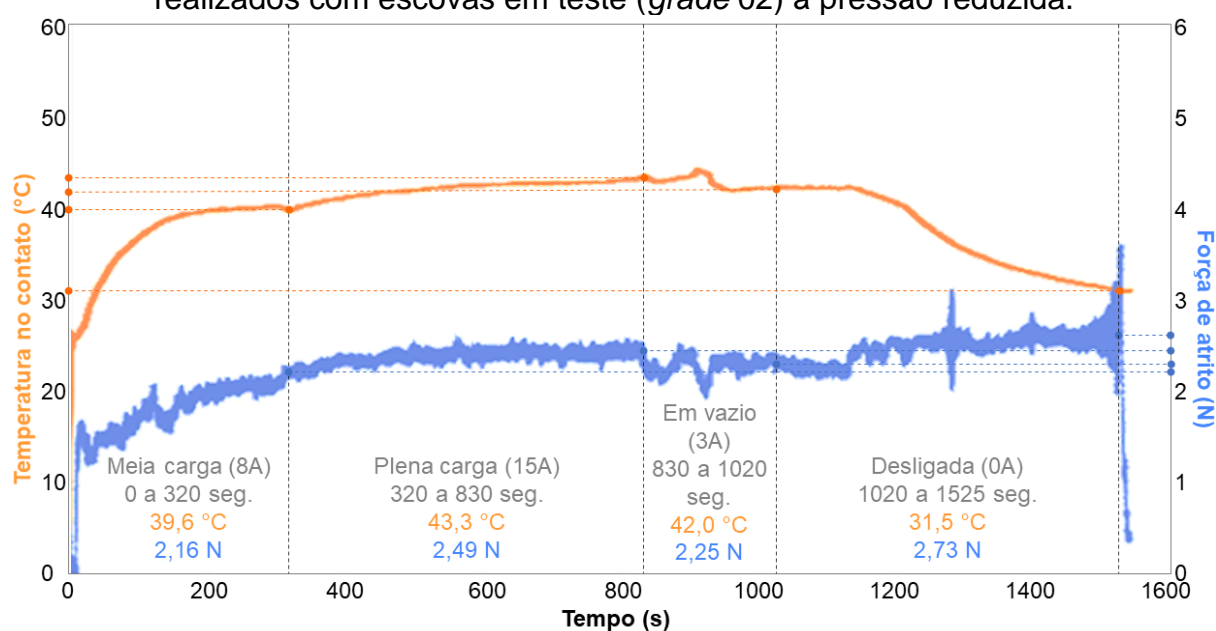
Inserindo o carregamento máximo, a temperatura se estabilizou nos 51,2 °C, no intervalo de 440 a 650 segundos, que demonstra um decréscimo pequeno, porém inesperado. Essa queda pode ser explicada pela baixa na rotação da máquina no momento do carregamento, que naturalmente diminui as perdas mecânicas. Entretanto, como percebido numa variedade de medições efetuadas neste estudo de caso, o atrito tem maior sensibilidade à variação de corrente do que às pequenas mudanças de temperatura causadas por ela, sendo assim, o patamar de 2,9 N para a força de atrito em 15 A é franco, caracterizando uma queda de 33 % em relação ao *grade 01* operando nas mesmas condições.

Comutando a vazio, no intervalo de 650 a 950 segundos, houve pequena queda na temperatura para 49,6 °C, seguramente devido à diminuição substancial da densidade de corrente. Como na primeira medição, houve um incremento no atrito que atingiu com o equilíbrio 3,1 N de força, entretanto, esse patamar caracterizou uma redução de 31 % na força de atrito quando comparado ao *grade 01* operando da mesma forma.

Relacionando as curvas da Figura 4.10 e da Figura 4.11, sobretudo na faixa de carregamento a vazio, constatou-se que ocorre o aumento da força de atrito apesar da redução da densidade de corrente e, conseqüentemente, da temperatura do contato. Esse fato é justificado pela baixa na formação do filme, que passa a contar com apenas $0,615 \text{ A/cm}^2$ para efetuar a eletrodeposição. Ainda observando essas curvas, vale ressaltar, também, a consistência da redução proporcional, 32 % em média, das forças de atrito do *grade* 01 para o *grade* 02, submetidos sequencialmente aos mesmos carregamentos; isso evidencia que, ao menos por comparação, as características da escova proposta aparentam ser mais adequadas ao perfil de operação da máquina do que as características da escova original.

Exibe-se, na Figura 4.12, as curvas da máquina comutando com pressões reduzidas a valores confiáveis (210 a 260 gf/cm^2) com escovas do tipo 02 (polidoras).

Figura 4.12 - Curvas de força de atrito e de temperatura obtidas nos ensaios realizados com escovas em teste (*grade* 02) à pressão reduzida.



Fonte: AUTOR (2019)

Sob condição de pressão reduzida das molas, partiu-se a máquina a meia carga encontrando o crescimento característico e estabilidade na temperatura igual a $39,6 \text{ °C}$ aos 320 segundos de medição com 8 A. Exceto por um pequeno surto, a força de atrito seguiu a crescente da temperatura estabilizando-se nos 2,16 N, valor que demonstra uma redução de 38 % quando comparados à qualidade e pressão originais.

Inserindo a totalidade das cargas, no intervalo de 320 a 830 segundos, encontrou-se um crescimento bastante amenizado da força de atrito quando comparado ao

comportamento das outras duas curvas, exibidas na Figura 4.10 e na Figura 4.11, ambas obtidas à pressão nominal. No referido intervalo, o equilíbrio foi observado nos 2,49 N, valor de força 43 % menor que o observado em condições originais de *grade* e pressão, após o crescimento concatenado com a temperatura que atingiu 43,3 °C.

Trazendo o carregamento para próximo do vazio, no intervalo de 830 a 1020 segundos, houve uma pequena disparada da máquina na saída da carga, assim como foi observado nas demais curvas; o aumento das perdas fez subir a temperatura de comutação e, ao contrário do observado à pressão nominal das molas, a força de atrito caiu conforme o crescimento da temperatura. Na sequência percebeu-se o decréscimo e a estabilização da temperatura em 42,0 °C, desenvolvendo 2,25 N de força de atrito, metade do valor observado em condições originais de *grade* e pressão; contudo, o valor de estabilização a vazio foi menor que no carregamento máximo, o que difere dos resultados anteriormente apresentadas.

A partir das curvas exibidas na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12, considerando a estabilização final das medições de força e temperatura, elaborou-se a Tabela 4.4. A partir do compilado de dados das medições em bancada, relativo a cada um dos quatro regimes de carregamento, realiza-se uma análise comparativa dos resultados.

Tabela 4.4 - Patamares de temperatura e força de atrito - medições em bancada das escovas original e em teste sob diferentes pressões no contato.

TIPO DE CARREGAMENTO	MEIA CARGA 8A		PLENA CARGA 15A		EM VAZIO 3A		DESLIGADA 0A	
	Temp. (°C)	F. Atrito (N)	Temp. (°C)	F. Atrito (N)	Temp. (°C)	F. Atrito (N)	Temp. (°C)	F. Atrito (N)
<i>Grade</i> 01 (original) pressão nominal	56,6	3,50	56,9	4,35	56,4	4,50	36,9	4,81
	0 a 390 seg.		390 a 730 seg.		730 a 1045 seg.		1045 a 1355 seg.	
<i>Grade</i> 02 (teste) pressão nominal	51,7	2,38	51,2	2,90	49,6	3,10	37,1	4,00
	0 a 440 seg.		440 a 650 seg.		650 a 950 seg.		950 a 1320 seg.	
<i>Grade</i> 02 (teste) pressão reduzida	39,6	2,16	43,3	2,49	42,0	2,25	31,5	2,73
	0 a 320 seg.		320 a 830 seg.		830 a 1020 seg.		1020 a 1525 seg.	

Fonte: AUTOR (2022)

Considerando as curvas do ensaio em bancada, conclui-se que a baixa carga de comutação, apesar de constatada na operação dos conversores, não é a principal responsável pelo filetamento, posto que a variação da densidade de corrente tem pequena influência na temperatura de contato. O MCVR é alimentado em 3 kV, nível de tensão cc incomum para uma máquina com apenas 50 kW, que leva a valores ínfimos de corrente de armadura. Portanto, a curva genérica de coeficiente de atrito em função da temperatura, exibida na Figura 2.23, não contempla a operação dos

conversores. Provavelmente, ARIZA (1977) obteve a referida curva utilizando máquinas com densidades de corrente mais elevadas, bem mais comuns na indústria, de forma que seria possível encontrar as temperaturas na faixa dos 85 a 110 °C.

Assim que a máquina foi desligada, percebeu-se em todas as curvas apresentadas, exibidas na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12, o declínio da temperatura em função da anulação das perdas elétricas e a redução das perdas mecânicas com a queda de velocidade. Por outro lado, notou-se uma crescente na força de atrito, uma vez que ausência eletrodeposição de carbono, fenômeno notadamente dependente da eletrólise, torna a superfície do comutador cada vez menos lubrificada.

Nos instantes finais, com a redução da velocidade, as medições de força de atrito foram contaminadas por surtos mecânicos, possivelmente em decorrência de algum fenômeno de ressonância do dispositivo de medição que não possui mecanismos de retorno ao batente e/ou amortecimento para não interferir nas medições. Todavia, buscando isonomia nas análises apresentadas, em todas as curvas de temperatura e força, destacaram-se os valores mais representativos de cada intervalo final; porém, adverte-se que, dada a ausência de corrente, os mesmos não são o foco deste estudo.

Percebeu-se uma certa consonância, no que diz respeito ao perfil de crescimento da temperatura e do atrito, entre as curvas levantadas à pressão de molas nominal. Contudo, ficou claramente demonstrando que a escova modificada (*grade 02*), impregnada e tratada, oferece condições mais adequadas para a operação da máquina em diferentes situações de carga, já que apresenta menor coeficiente de atrito que a escova original (*grade 01*), ambas comutando à pressão nominal.

Observou-se, também, a mudança no perfil das curvas de temperatura e de atrito, quando se altera a força das molas. Nesse caso, tanto a queda no contato quanto as deformações elásticas e plásticas das asperezas, geradas nas áreas reais de contato, relacionam-se intimamente com a variação da pressão, alterando, respectivamente, as perdas elétricas e mecânicas do contato seco. Tendo em mente as equações de coeficiente de atrito, era esperada a redução na força de atrito dada a diminuição da normal (força das molas) em 36 %, porém, havia suspeita sobre a manutenção do coeficiente de atrito, dada a mudança das condições mecânicas do contato. Ao final, constatou-se que, a redução da pressão de molas para valores confiáveis de fato atenua a força de atrito por meio da queda da normal, isso sem elevar de maneira descontrolada o coeficiente de atrito graças a ausência de centelhamento.

Finalmente, verificou-se que a operação com pressão de molas reduzida atenua as variações bruscas de atrito nas mudanças de carregamento, tornando mais robusta a comutação à vazio e à plena carga. Além disso, independente da carga, notou-se uma redução nas forças de atrito, o que, além de gerar a confiabilidade necessária para a execução do consequente teste operacional, deve refletir num menor desgaste.

4.2 MEDIÇÕES NA OPERAÇÃO

Na via permanente, a coleta de corrente nos MCVR's encontra um ambiente bastante desafiador; em geral, a comutação é submetida à vibração, à umidade excessiva ou escassa e às contaminações, por poeira de minério da ferrovia de carga e vazamentos de graxa dos mancais. Apesar disso, os conversores raramente têm apresentado falhas; assim, especialmente no caso destes testes, os cuidados foram intensificados, já que esses são equipamentos imprescindíveis ao funcionamento do trem.

4.2.1 Procedimento para a medição do desgaste em operação

Algumas medidas devem ser tomadas para a realização de testes de escovas: o comutador deve estar livre de imperfeições (sem rebarbas nas lâminas, mica saliente, ovalização e/ou excentricidade exacerbada), os porta escovas devem apresentar bom funcionamento (com as pressões das molas corretas e com as folgas dimensionais dentro das tolerâncias) e, caso a pista tenha operado com outro material, o filme existente deve ser retirado para o teste do novo *grade*. Por fim, as escovas devem ter sua face de contato lixada de maneira que o chanfro criado propicie a essas o contato elétrico adequado, favorecendo assentamento e a formação da pátina (ARIZA, 1977).

Neste estudo, além de avaliar o desempenho da coleta de corrente a partir do desgaste das escovas, examinaram-se também a ausência de centelhamento, a uniformidade do filme, o trabalho silencioso e o mínimo desgaste do comutador, aferindo especificamente a progressão da ovalização e a excentricidade da pista.

Limite de desgaste das escovas

A grande maioria das escovas apresenta um limite de desgaste no qual o fabricante garante o correto funcionamento. Em geral, esse limite de perda de material é de no máximo 75 % para escovas radiais (ângulo de ataque menor que 15°) e 70 % para inclinadas (ângulo maior ou igual a 15°). A fim de evitar falhas pelo excesso de desgaste, que pode gerar faiscamento e/ou levar ao contato de partes metálicas (cordoalha, rebite, terminais e até molas) com a pista, os fabricantes fazem traços, em baixo relevo ou pintados, sobre uma das faces laterais do carvão (BRANÇAN, 1987).

Para evitar a operação de escovas com comprimento inferior ao limite de desgaste assinalado, nas manutenções/inspeções preventivas a variação dimensional das escovas, seja nas máquinas de tração ou nos MCVR's, é sempre contabilizado. O valor do desgaste médio no intervalo entre medições é calculado a partir da variação do comprimento das escovas (em mm) pelas respectivas distâncias percorridas pelo trem (em km). Nesse caso, um menor desgaste das escovas em teste é apreciável desde que não sejam sacrificados outros fatores essenciais à boa comutação.

Supressão de escovas

A troca de escovas em função do desgaste natural seguramente aumenta as chances de faiscamento e, portanto, de falhas. Além da robustez operacional proporcionada pela condução paralela das escovas, a densidade de corrente tem pouca ou nenhuma influência na temperatura de contato, conforme apontado pelos resultados das medições em bancada e, portanto, praticamente não interfere na amplitude das forças de atrito. Assim, também na operação comercial dos MCVR's, visando atenuar ou eliminar o desgaste anormal, a proposta de condução em pista única não se justifica.

Máquinas escolhidas para o teste

A partir das recomendações propostas, para que houvesse igualdade nas comparações, procedeu-se a manutenção completa das 6 máquinas consideradas neste teste. Os conversores, que possuem os números de série 008, 009, 019, 020, 039 e 046, passaram por uma gama de ensaios elétricos e mecânicos para averiguar seu estado, foram desmontados, lavados com solvente dielétrico (25 kV), secos em estufa com temperatura controlada (120 °C por 24 horas), impregnados com verniz isolante (classe H) e repintados. Os comutadores desses 6 MCVR's foram reperfildados; além disso, nos casos necessários, houve a substituição dos mancais de

rolamentos e dos anéis de vedação de graxa. Por fim, realizaram-se todos os ensaiados elétricos e mecânicos para a verificação das melhorias.

Por fim, tendo como base os ensaios em bancada, concluiu-se que os três regimes de condução abordados seriam adequados para a realização do teste em operação. Isso, pois, as duas configurações propostas apresentaram um desempenho melhor que o arranjo original, que operou por décadas sem falhas significativas na comutação. Assim, o referido teste foi executado conforme descrito na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Configurações propostas para o teste operacional dos conversores.

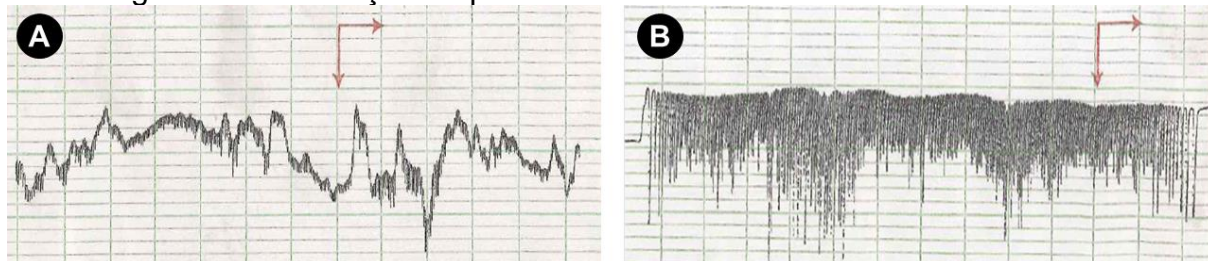
Nº Conversor	008	009	019	020	039	046
TUE-Carro	16-RB	06-RB	06-RA	03-RA	16-RA	01-RA
Pressão das molas (gf/cm ²)	210 a 260	331 a 404	331 a 404	331 a 404	210 a 260	331 a 404
Tipo de escova (<i>grade</i>)	02	01	02	02	02	01

Fonte: AUTOR (2019)

Medição da ovalização do comutador

No período de teste das seis máquinas, as medições da progressão da ovalização foram feitas utilizando o medidor de perfil miligráphe. Esse aparelho eletromecânico acompanha as variações, na ordem de μm , do raio do comutador e, através de um sensor de deslocamento com uma ponta esférica, gera a curva em escala no tempo utilizando uma agulha eletrificada sob um papel condutivo à base de prata. Ilustra-se, na Figura 4.13A, a medição de perfil de um comutador irregular utilizando o miligráphe; por outro lado, na Figura 4.13B, é exibido o perfil do mesmo comutador após o reperfilamento, descrito no item 2.3.1.

Figura 4.13 - Medição do perfil do comutador - usado e recondicionado.



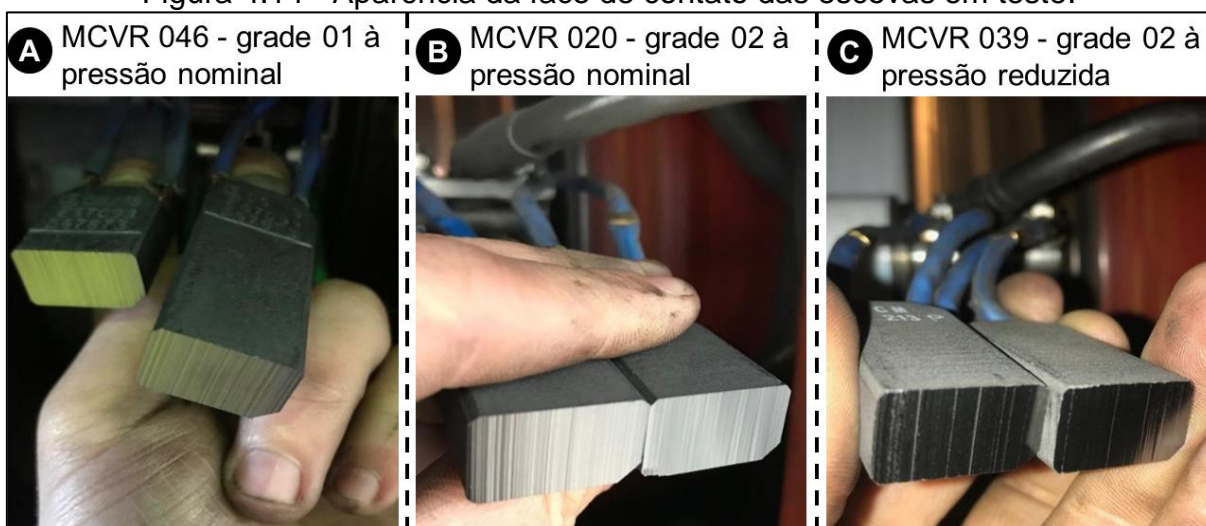
Fonte: AUTOR (2021)

No caso do conversor rotativo, a tolerância de ovalização e/ou excentricidade (em μm) recomendada pelo fabricante é limitada ao máximo de distorção dependendo da percentagem de lâminas consecutivas atingidas pela irregularidade: até 10 μm em 3 %, até 40 μm em 10 % ou até 80 μm em 100 % das lâminas (COBRASMA, 1984).

4.2.2 Análise de falhas e inspeção visual das escovas testadas

Durante o período de avaliação do desempenho das configurações de escovas e pressões das molas propostas, não foram observados crescimentos consideráveis na ovalização e/o excentricidade de nenhuma das máquinas designadas para o teste. Além disso, nenhuma falha de comutação foi registrada nos MCVR's desde o início do teste; as pátinas mostraram-se consistentes e não houve quebras ou centelhamento aparente na face de contato das escovas, como é possível perceber na Figura 4.14. Entretanto, com pouco tempo de operação, a máquina 020 apresentou ruído, provavelmente por problemas no mancal de rolamentos; sendo essa, a única avaria observada no período de teste em operação.

Figura 4.14 - Aparência da face de contato das escovas em teste.



Fonte: AUTOR (2019)

Percebeu-se, nos três arranjos em teste, um certo nível de raiamento (superfície S5) ou, dependendo da iluminação, um leve filetamento inicial (superfície S7). Como visto, esse tipo de desgaste riscado é suscitado pela baixa densidade de corrente e/ou presença de contatos perigosos na atmosfera de comutação (MORGAN AM&T, 1998). Entretanto, conforme mostra a experiência adquirida em manutenções anteriores, são necessários alguns anos de operação até que a o comutador de um MCVR recém recondicionado e raiado passe a apresentar uma aparência filetada, semelhante àquela exibida na Figura 3.5, naturalmente relacionada à superfície S9.

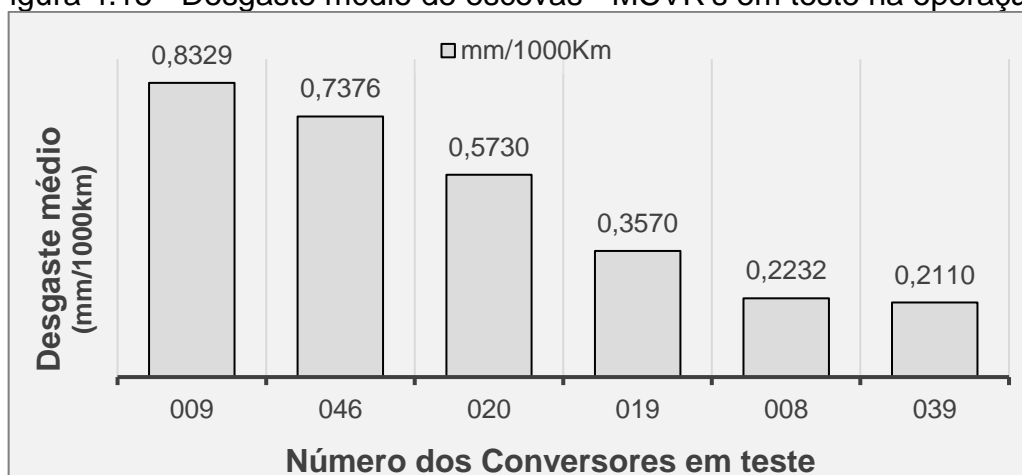
Portanto, em função do intervalo relativamente curto do teste, a partir da simples observação das faces de contato das escovas, não se pôde afirmar que o raiamento progrediria para o filetamento. Apesar disso, percebeu-se uma maior uniformidade no filme e a ausência de espelhamento da face das escovas que operavam com pressão de molas reduzidas, tal qual se observa na Figura 4.14C.

4.2.3 Resultados das medições de desgaste em operação

De forma generalizada, durante a compilação dos dados de perda de material das escovas, observou-se um desgaste pronunciado nos primeiros dias de operação dos seis conversores em teste. Esse fenômeno, pode ser explicado como o desgaste maior das escovas até que houvesse a formação e consolidação do filme; com a pátina estabilizada, atenua-se o coeficiente de atrito, propiciando assim taxas menores de desgaste. À vista disso, para o cálculo do desgaste médio, foram utilizadas quase todas as medidas obtidas no teste, desconsiderando apenas àquelas relacionadas ao desgaste inicial exacerbado.

Finalmente, o cálculo do desgaste característico de cada configuração (tipo de escova e pressão das molas) foi realizado através da média, calculada de três formas diferentes, dos valores colhidos em cada uma das inspeções. Assim, tendo em conta que o procedimento de medição e cálculo foi rigorosamente seguido para as 6 máquinas, obtiveram-se os valores de desgaste médio exibidos na Figura 4.15.

Figura 4.15 - Desgaste médio de escovas - MCVR's em teste na operação.



Fonte: AUTOR (2019)

Observando a Figura 4.15, nota-se que os valores de desgaste das máquinas 009 e 046 (*grade* 01 à pressão nominal) apresentaram somente 11,4 % de dispersão, sendo esse um patamar de consumo bastante confiável para essa configuração; o mesmo raciocínio pode ser empregado no caso das máquinas 008 e 039 (*grade* 02 à pressão reduzida) que, tendo o mesmo arranjo, apresentaram apenas 5,5 % de dispersão.

Por outro lado, as máquinas 019 e 020 (*grade* 02 à pressão nominal) apresentaram uma dispersão de 37,7 % nos valores de desgaste; muito provavelmente, dado o problema nos mancais de rolamento, que elevam a vibração e pioram muito a comutação, o conversor 020 tenha apresentado um desgaste tão diferente da máquina 019, que operava nas mesmas condições. Portanto, buscando retratar o desgaste normal dessa configuração (*grade* 02 à pressão nominal), numa análise final, entende-se ser necessário desconsiderar os valores de desgaste do MCVR 020.

Assim, a troca das escovas originais (*grade* 01) pelas escovas em teste (*grade* 02), mantendo o ajuste original das pressões das molas, representa uma redução média de no desgaste das escovas em 54,5 %. Se, também, houver a diminuição da pressão das molas para valores confiáveis, a redução será de 72,4 %.

Essa melhoria de desempenho, assim como a garantia de uma operação com o mínimo risco de falhas, foi, de certa forma, antecipada pelas medições em bancada, conforme exibido na Tabela 4.4. Nota-se, portanto, que a diminuição do desgaste se relaciona intimamente à atenuação das forças de atrito, que favorece na manutenção do filme e, por consequência, leva à operação da máquina com menos chances de danos ao comutador.

Salienta-se, por fim, que a redução significativa do desgaste das escovas gera economia não só na compra desse consumível, mas também na mão de obra para a realização das trocas. De maneira correlata, a diminuição das trocas de escovas reduz as chances de falha da máquina, melhorando os índices de disponibilidade de trens.

Contudo, a diminuição do desgaste não necessariamente garante que os arranjos propostos em detrimento do original poderão atenuar ou eliminar o filetamento. O procedimento mais indicado para esse tipo de análise consiste em avaliar a deposição de partículas de cobre na face de contato das escovas testadas. Algumas técnicas relacionadas a esse tipo de análise são abordadas a seguir.

4.3 ANÁLISE DE DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS DE COBRE NAS ESCOVAS

A inspeção visual da pátina, principalmente no que diz respeito à uniformidade, é uma das ferramentas essenciais na avaliação do desempenho da coleta de corrente. Além disso, é comum que se observe a condição das escovas, especialmente a superfície de contato. Nesse contexto, principalmente quando o suposto problema na coleta de corrente não atingiu seu estágio final, a avaliação visual da superfície de contato das escovas é bastante complicada, podendo levar a interpretações precipitadas.

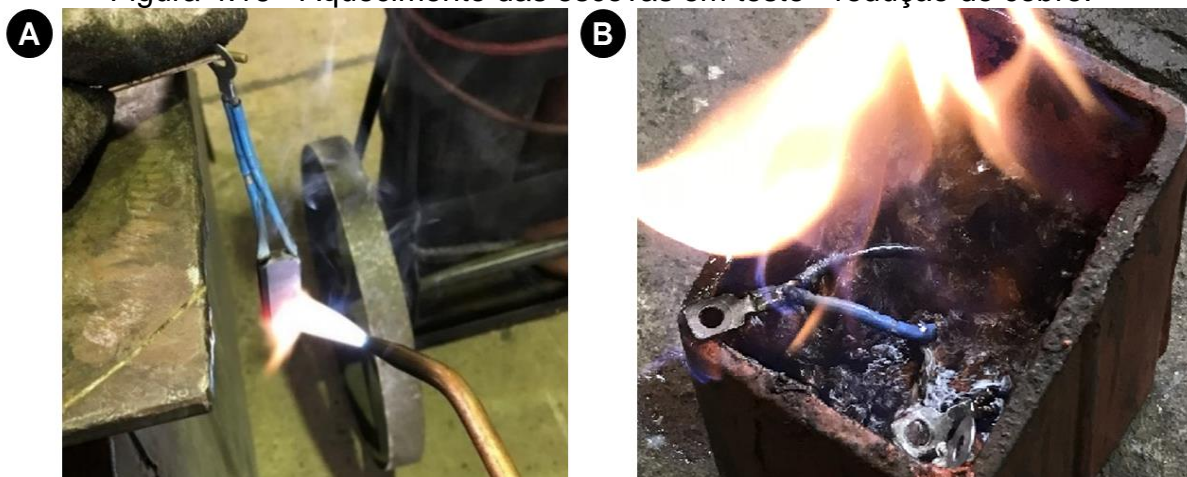
Dentre as superfícies de contato típicas, as levemente raiadas (S3), levemente filetadas (S5) e filetadas (S7) diferem apenas em amplitude de desgaste, sendo a interpretação muito subjetiva. Assim, mesmo com pouco tempo de operação, é esperado que exista cobre encrustado na face de contato das escovas, alimentando o processo de filetamento. Nesse caso, propõe-se a utilização de duas técnicas, que buscam avaliar o nível de deposição de cobre à face. Em ambos os casos, almeja-se, com tempo reduzido de operação, um diagnóstico acerca do filetamento, definindo, assim, o desempenho das três configurações (*grades* e *pressões*) testadas.

4.3.1 Procedimento de aquecimento e redução

A olho nu, tal qual exibido na Figura 4.14, a superfície de contato das escovas se mostra extremamente polida, com um caráter vítreo e escuro, que impossibilita a visualização das partículas de cobre, oxidado e de tonalidade semelhante ao carbono, que eventualmente tenham se depositado. Entretanto, caso haja a suspeita de estar havendo o filetamento, utilizando um maçarico, é possível identificar a presença do cobre aquecendo a escova suspeita ao rubro, mergulhando-a em seguida num recipiente metálico contendo álcool. Esse procedimento, proposto por BRUNI (1984), possibilita a redução das partículas de cobre depositadas, eliminando a oxidação, revelando-as em cores claras. Contudo, em função do elevado risco de incêndio, a experiência só deve ser executada num local seguro e isolado, utilizando recipiente metálico, o que elimina a chance de derretimento ou rupturas por choque térmico.

Assim, tal qual ilustrado na Figura 4.16A, utilizou-se um conjunto oxiacetileno (maçarico), elevando a temperatura das escovas em teste para valores próximos a 1000 °C. As medições de temperatura, utilizando pirômetro digital RAYTEK MX2 DT, especificado na Tabela 4.1, foram realizadas com o intuito de garantir o mesmo nível de aquecimento para todas as escovas e, além disso, assegurar que a temperatura das peças não se aproximasse do ponto de fusão do cobre (1085 °C).

Figura 4.16 - Aquecimento das escovas em teste - redução do cobre.



Fonte: AUTOR (2019)

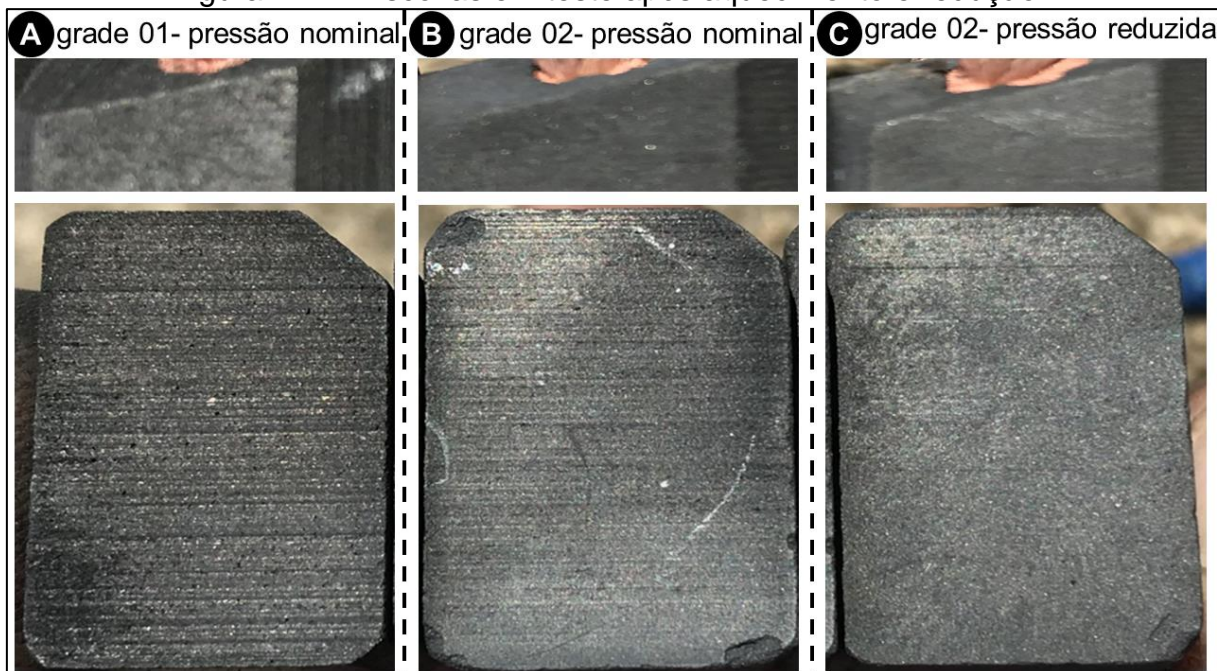
Conforme recomendado, utilizou-se um recipiente metálico para garantir a integridade do vasilhame, mitigando as chances de incêndio. Porém, esse estava com sua superfície coberta por tinta, conforme exibido na Figura 4.16B, quimicamente isolado com relação à oxidação. Ao aquecer as escovas ao rubro e mergulhá-las no álcool, a revelação não ocorreu em nenhuma das três primeiras peças; provavelmente, a redução do cobre encrustado só pode acontecer se houver a oxidação de outro metal, no caso do recipiente de aço. Então, procedeu-se a limpeza da camada de tinta do recipiente e repetiram-se os procedimentos descritos com outros três exemplares de escovas (em final de vida útil) retiradas das mesmas máquinas em teste.

4.3.2 Resultados do procedimento de aquecimento e redução

Na Figura 4.17, observa-se as escovas após a execução do procedimento de revelação. Percebe-se que, para cada configuração testada, foram apresentadas duas vistas das faces reveladas; as imagens inferiores reproduzem a superfície do contato,

foco deste estudo, enquanto as superiores, chamadas de controle negativo, por questão de comparação, retratam as faces laterais do corpo dessas mesmas escovas.

Figura 4.17 - Escovas em teste após aquecimento e redução.



Fonte: AUTOR (2019)

Salienta-se que, apesar de aquecidas à mesma temperatura da face de contato, as arestas laterais nunca tocaram o comutador e, portanto, através do mecanismo do filetamento, é impossível que tenham partículas de cobre ancoradas aos poros do carvão. Sendo assim, a única possibilidade de haver cobre revelado na lateral das escovas é se, eventualmente, o metal for inserido durante o processo de fabricação.

Analisando atentamente a Figura 4.17A, tomando de base a superfície lateral do *grade* 01, que aparentemente não contém cobre em sua composição, constata-se a flagrante deposição de partículas de metal na face de contato dessa peça; é possível perceber que existem pedaços consideráveis de cobre depositados nos poros, livres de oxidação e dourados devido à redução. Observando a Figura 4.17B e a Figura 4.17C, verifica-se que as escovas de *grade* 02 também apresentam pontos dourados na face de contato, porém, estes são bem menores e também são percebidos nas arestas laterais, que sugerem a existência de pó metálico na confecção desse tipo de escova.

Realizado o aquecimento, em comparação com o *grade* 01, percebeu-se uma maior fragilidade das escovas do tipo 02 (em teste), como é possível perceber nas marcas à face e nas pequenas fissuras, concentradas principalmente nas arestas laterais. Entretanto, após o referido procedimento, todas as peças foram descartadas, já que

o aquecimento altera as características de fabricação, impedindo o reaproveitamento para a coleta de corrente. Por outro lado, depois da execução do procedimento de redução, que eliminou o polimento e o caráter vítreo escuro das amostras, percebeu-se uma menor incidência ranhuras na face, inicialmente, com a substituição do *grade* 01 pelo 02 e, complementarmente, com a redução das pressões das molas.

4.3.3 Procedimento de análise microestrutural

Mesmo com um tempo relativamente curto de teste em operação, recorrendo ao procedimento de aquecimento e revelação, foi possível constatar, tal qual exibido na Figura 4.17A, a deposição de partículas de cobre na face de contato das escovas do tipo 01 (originais) operando à pressão nominal. No entanto, esse procedimento, apesar de extremamente simples e útil, é visual e qualitativo, o que abre margem para interpretações e não define a quantidade de metal depositado à face. Assim, buscando uma análise mais criteriosa sobre o nível de porosidade e a consequente presença de cobre depositado em cada escova testada na operação, recorre-se à microscopia eletrônica de varredura, utilizando a análise por EDS (*energy disperse spectroscopy*) no diagnóstico químico de pequenas porções de maior interesse.

Os microscópios ópticos (convencionais) iluminam, através de lentes, a amostra com luz visível ou ultravioleta. Em função do elevado comprimento de onda irradiado, os efeitos da difração acabam limitando a resolução desses equipamentos, restringindo as ampliações ao máximo de 2.000 vezes. Em contrapartida, ao invés de fótons, o microscópio eletrônico de varredura utiliza um feixe de elétrons, que possui comprimento de onda extremamente curto, resolvendo assim o problema do limite de resolução e possibilitando a geração de imagens com elevado nível de ampliação (cerca de 300.000 vezes). Normalmente, para gerar o feixe de elétrons, esse equipamento utiliza um filamento de tungstênio aquecido, que opera com elevada diferença de potencial (tensão de aceleração de 1 a 50 kV) em relação ao anodo; após gerado, o feixe de pequeno diâmetro é então focalizado por bobinas de deflexão, varrendo a superfície analisada segundo uma malha retangular. Ao interagir com a

amostra, o feixe emite elétrons e fótons que, se capturados por detectores adequados, podem ser convertidos em sinal de vídeo (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

Ambos aparelhos utilizados neste estudo (MEV e EDS) podem ser especificados por meio das informações exibidas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Especificação MEV e EDS - análise de deposição de cobre.

Aparelho	Marca	Tipo	Modelo	Resolução ou Detecção	Tensão de aceleração	Pressão de vácuo
MEV	Philips	XL30 PW	6800/70	3,5 nm a 30 kV e 25 nm a 1 kV	0,2 a 30 kV	0,5 mPa
EDS	Oxford	INCA x-sight	7509	até 10 mm ² 133 a 5900 eV	-	-

Fonte: Adaptado de FEI COMPANY (2022, p. 2 a 4)

O software utilizado nesses equipamentos é compatível com programas e aplicativos *Windows*, que podem ser usados no desenvolvimento de relatórios. De maneira ilustrativa, exibe-se, na Figura 4.18, ambos os equipamentos utilizados na análise.

Figura 4.18 - MEV e EDS utilizados no estudo.



Fonte: AUTOR (2022)

Quando a amostra sob análise é bombardeada pelo feixe de elétrons, oriundo do MEV, ocorre a ionização das camadas mais profundas dos átomos, emitindo, além de elétrons retroespalhados, responsáveis pela formação da imagem, a radiação X utilizada na EDS. Dependendo do comprimento de onda e da energia emitida por cada partícula pertencente à porção analisada, é possível identificar o número atômico e determinar, através de uma análise semiquantitativa, a composição de pontos específicos do corpo (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007) e (CRUZ *et al.*, 2006).

Tentando mitigar a contaminação, as amostras foram coletadas das máquinas em teste, numeradas, segundo mostrado na Tabela 4.7, e embaladas individualmente.

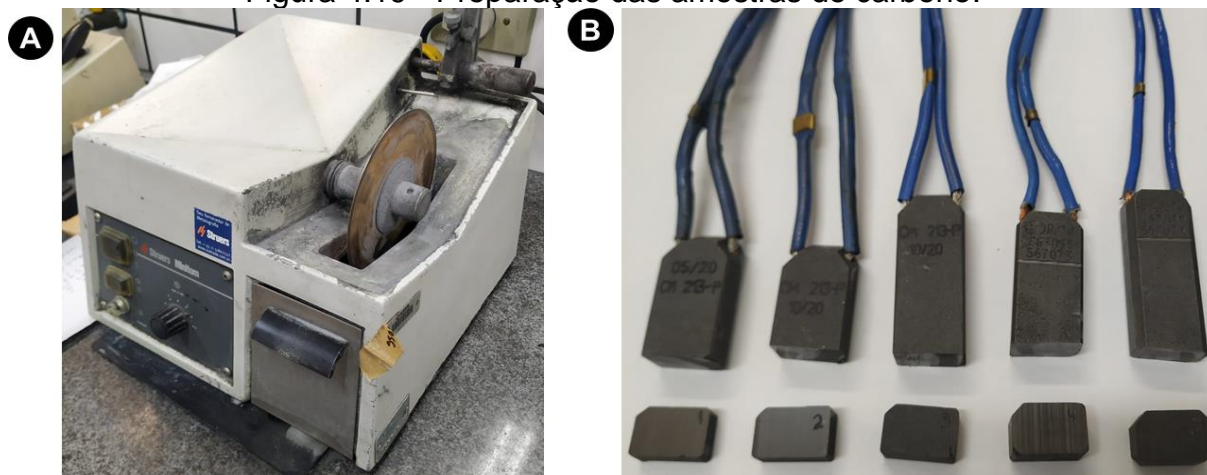
Tabela 4.7 - Amostras de escovas - análise MEV e EDS.

N° amostra	Grade	Tipo de operação	N° MCVR	TUE-Carro
1	2 (sugerido)	Pressão reduzida (210 a 260 gf/cm ²)	008	16-RB
2	2 (sugerido)	Pressão nominal (331 a 404 gf/cm ²)	019	06-RA
3	2 (sugerido)	Escova nova	-	-
4	1 (original)	Pressão nominal (331 a 404 gf/cm ²)	046	01-RA
5	1 (original)	Escova nova	-	-

Fonte: AUTOR (2022)

Na sequência, utilizando uma máquina de corte de precisão, mostrada na Figura 4.19A, seccionou-se a face de contato das 5 escovas, tal qual exibido na Figura 4.19B, de forma que estas pudessem ser inseridas na câmara de amostras do MEV.

Figura 4.19 - Preparação das amostras de carbono.



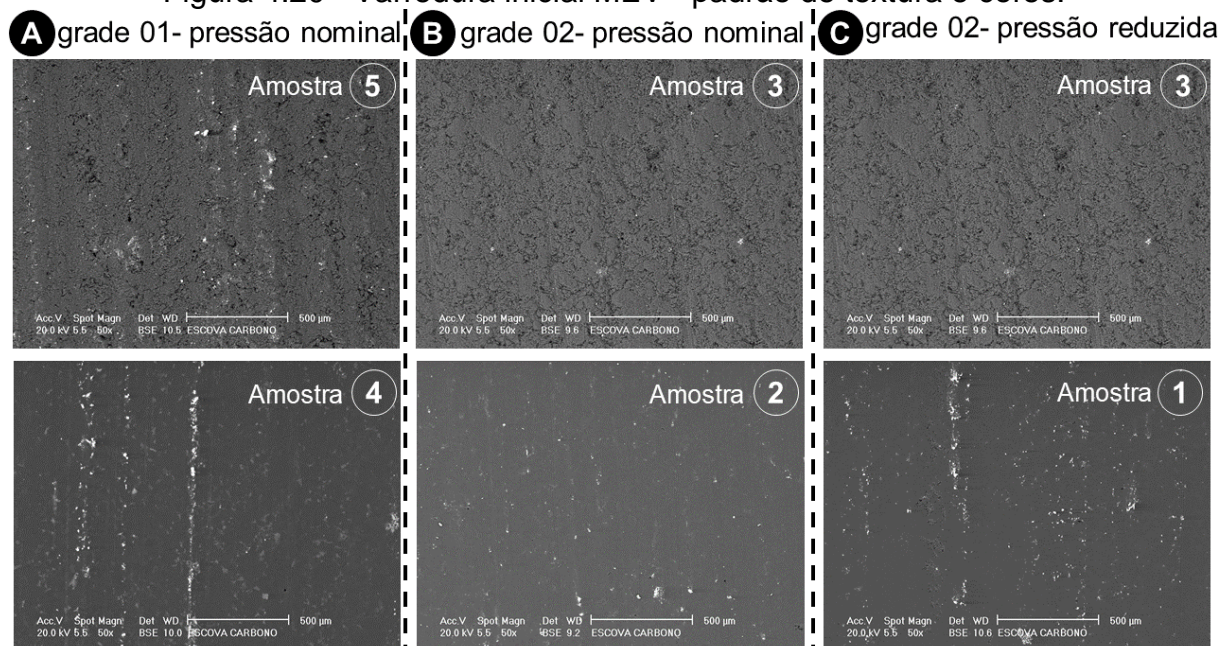
Fonte: AUTOR (2022)

Apesar dos cuidados no manuseio e preparação das escovas, é importante ressaltar, no entanto, que durante as inspeções, preventivas, corretivas e demais manutenções nos trens, é possível que tenha havido contaminações, que não tem nenhuma relação com a deposição cobre, das amostras coletadas (face das escovas usadas no teste em operação). Ademais, no transporte, recebimento e armazenamento é plausível que as escovas novas, utilizadas como referência (controle negativo), também possam ter sido contaminadas. Apesar disso, a inspeção microestrutural proposta, incrementada pela análise química semiquantitativa, pretende substanciar o diagnóstico obtido nos itens 4.1.6, 4.2.3 e 4.3.2, que apresenta um encaminhamento positivo para a troca do material das escovas, juntamente com a redução da pressão das molas.

4.3.4 Resultados da análise microestrutural

Numa varredura inicial com o MEV, observou-se a superfície das 5 amostras e, em todos os casos, conforme exibido na Figura 4.20, percebeu-se um padrão de textura e cores, contido numa área bem maior que àquela analisada posteriormente na EDS.

Figura 4.20 - Varredura inicial MEV - padrão de textura e cores.



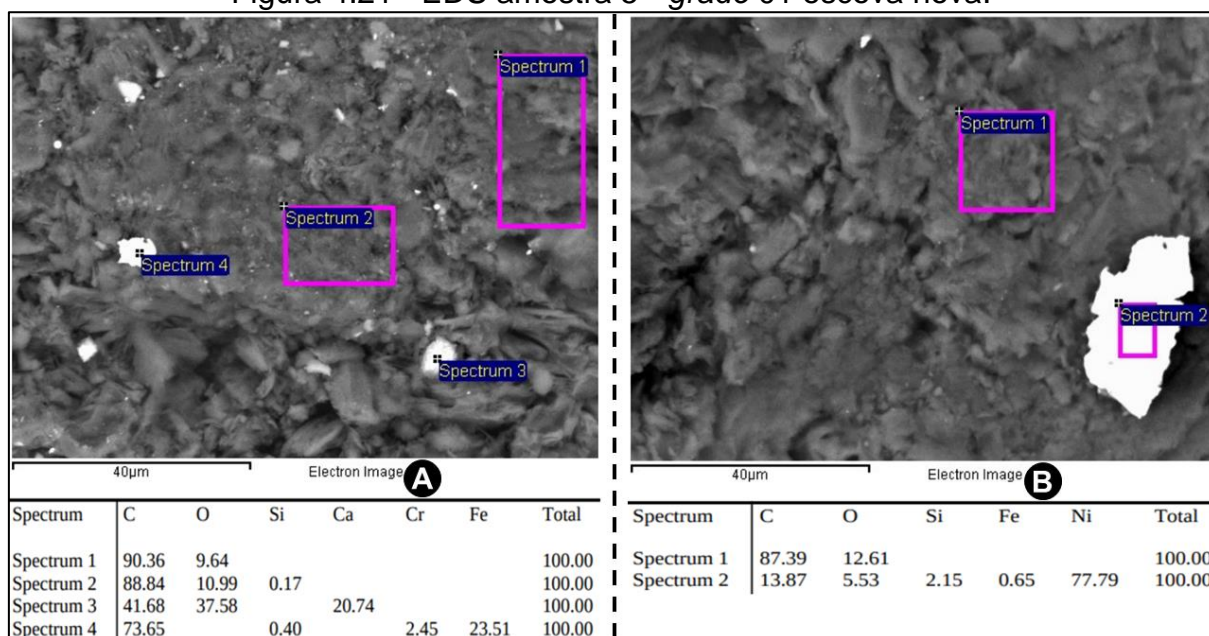
Fonte: AUTOR (2022) - Microscópio Philips XL30 PW 6800/70

Observando a Figura 4.20, percebe-se nitidamente a diferença entre a textura das imagens superiores (escovas novas) e inferiores (escovas testadas na operação); as amostras novas, não tendo sido submetidas a nenhuma espécie de assentamento, possuem aspereza bem mais acentuada que as amostras atritadas contra a pista. Além disso, numa análise qualitativa e visual do padrão de cores, ressalta-se que, das três configurações testadas na operação, o *grade 02* submetido à pressão nominal, exibido na Figura 4.20B, é o que apresenta maior uniformidade e menores áreas claras, que representam, num primeiro momento, algum tipo de contaminação.

Esse diagnóstico inicial contraria a análise proposta no item 4.3.2, que exhibe, na Figura 4.17C, uma maior uniformidade na superfície da escova de *grade 02* com pressão reduzida; contudo, é importante ressaltar que a área inspecionada pelo MEV possui apenas 2,473 mm², que representa pouco mais de 1 % da superfície de contato das escovas. Além disso, é necessário avaliar a composição química das regiões

suspeitas, investigando a percentagem de cobre dessas manchas claras. Para tal, recorre-se a uma maior ampliação das zonas de interesse, cerca de 33.333 vezes, que acarreta numa área observável com apenas 0,003 % da total. A partir dessas imagens com índices tão grandes de ampliação, seleccionam-se áreas ainda menores, chamadas de espectros, com dimensões que variam em função do padrão observado. A primeira EDS, exibida na Figura 4.21, apresenta duas zonas de interesse (A e B), obtidas da escova original (*grade 01*) nova, totalizando 6 espetros analisados.

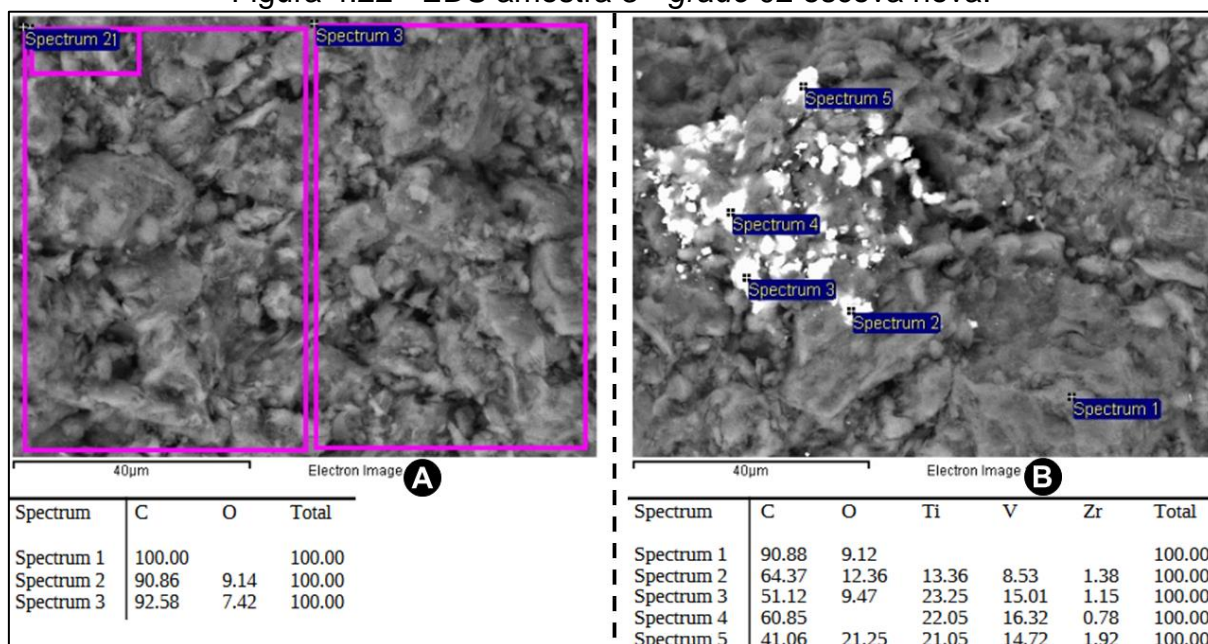
Figura 4.21 - EDS amostra 5 - *grade 01* escova nova.



Fonte: AUTOR (2022) - Microscópio Philips XL30 PW 6800/70

Analisando a EDS exibida na Figura 4.21, percebe-se que os espectros 1A, 2A e 1B dão enfoque às áreas escuras que possuem percentuais, significativos e bastante próximos, de carbono e oxigênio; no entanto, nessas zonas é nula ou desprezível a existência de outros elementos, sejam nas formas de contaminantes ou de aditivos (agregados intencionalmente na fabricação do *grade*). Assim, entende-se que a composição química semiquantitativa dessas três fases retrata de maneira fidedigna o material base da qualidade 01. Por outro lado, atentando-se às zonas mais claras da EDS, identifica-se pontos ricos em cálcio (espectro 3A) e ferro (espectro 4A), além de uma área significativamente grande com alto teor de níquel (espectro 2B); em pequena proporção, também foram observados os elementos cromo e silício.

Na Figura 4.22, apresenta-se a espectroscopia de duas áreas de interesse (A e B), obtidas de uma escova nova do *grade 02*, analisando o total de 8 espetros distintos.

Figura 4.22 - EDS amostra 3 - *grade 02* escova nova.

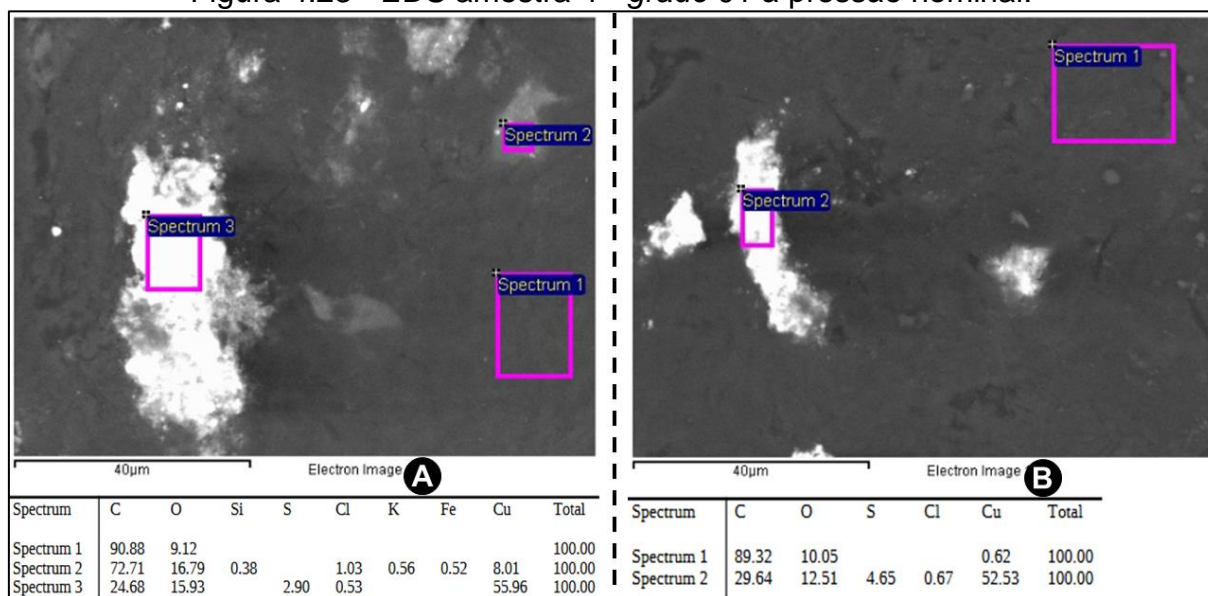
Fonte: AUTOR (2022) - Microscópio Philips XL30 PW 6800/70

A partir da EDS exibida na Figura 4.22, identifica-se que os espectros 1A, 2A, 3A e 1B concentram-se nas áreas escuras que possuem percentuais equiparados de carbono e oxigênio; nessas zonas negras, assim como observado na Figura 4.21 (*grade 01* novo), é nula ou desprezível a existência de outros elementos contaminadores ou adicionados na fabricação. Portanto, entende-se que a composição dessas quatro fases retrata de maneira bastante precisa o material base da qualidade 02. Em contrapartida, observando as zonas claras da EDS, identificam-se pontos ricos em titânio e vanádio, além de uma pequena quantidade de zircônio. Exceto pela pequena variação percentual, os espectros 3B, 4B e 5B têm praticamente a mesma composição no que diz respeito aos elementos de dopagem; já o espectro 2B apresenta esses mesmos elementos, porém, em menor quantidade.

Por fim, salienta-se que, em todos os 14 espectros analisados, apresentados na Figura 4.21 e na Figura 4.22, evidencia-se a ausência do elemento cobre. Esse fato reforça a proposição de tratar as amostras novas, sejam elas do *grade 01* ou do *grade 02*, como referência para o controle negativo. Neste estudo, portanto, adota-se como premissa não a comparação semiquantitativa da composição química entre amostras, que depende da escolha das áreas de interesse e da consequente representatividade dos espectros obtidos, mas da comparação do tipo de contaminação observada, tendo como referência o material base e os aditivos (dopagem) das escovas que nunca foram usadas na operação.

Nesse sentido, apresenta-se, na Figura 4.23, a EDS de duas zonas de interesse (A e B), obtidas da escova original que foi testada na operação com pressão nominal (331 a 404 gf/cm²), totalizando 5 espectros analisados em pontos distintos.

Figura 4.23 - EDS amostra 4 - *grade* 01 à pressão nominal.



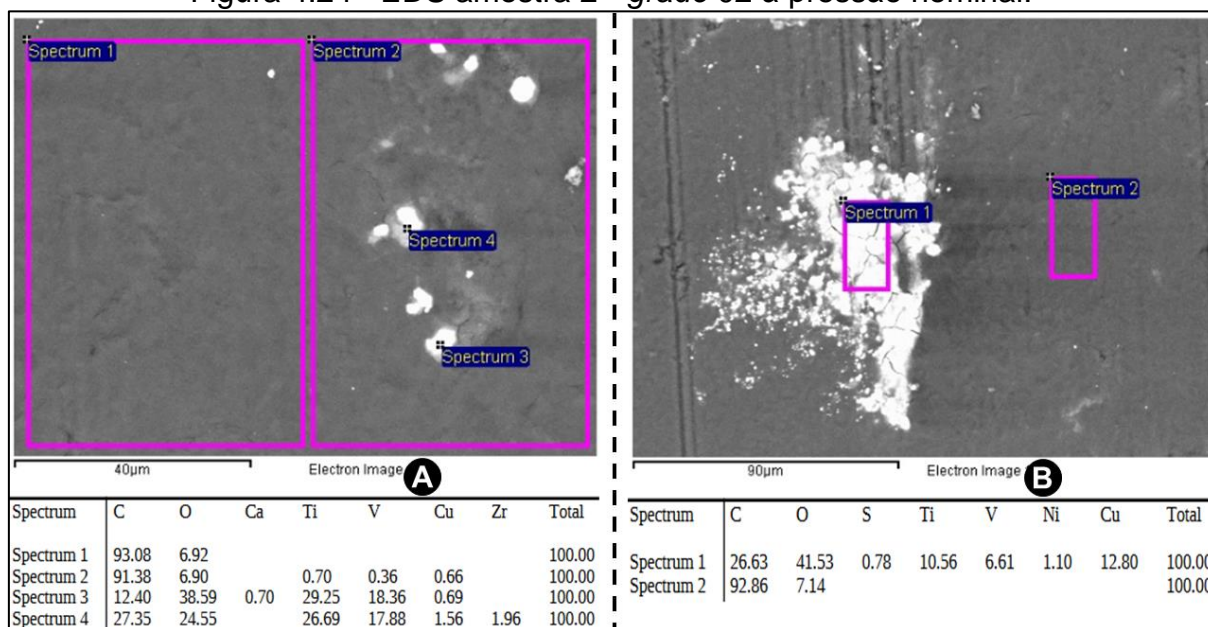
Fonte: AUTOR (2022) - Microscópio Philips XL30 PW 6800/70

Observando a EDS da Figura 4.23 e tendo como base a espectroscopia da amostra nova de mesmo *grade*, exibida na Figura 4.21, destacam-se algumas considerações. Tratando da análise das regiões escuras, percebe-se que, exceto por uma pequena contaminação de cobre, os espectros 1A e 1B são rigorosamente equivalentes àqueles apresentados anteriormente (espectros 1A, 2A e 1B da amostra 5) como sendo representativos do material base das escovas de qualidade 01 (cerca de 90 % de carbono e 10 % de oxigênio).

Por outro lado, ao avaliar a composição química das áreas claras, identifica-se a existência de diversos elementos de contaminação que não haviam sido observados na amostra 5, como é o caso do enxofre, do cloro, do potássio e do cobre, foco deste estudo, que se destaca tanto no ponto de vista dimensional quanto pela concentração, principalmente nos espectros 3A e 2B. Portanto, considerando a operação do *grade* 01 à pressão nominal é possível confirmar, mesmo com pouco tempo de teste, que existem partículas de cobre, com concentrações elevadas e dimensões medianas, depositadas à face de contato das escovas inspecionadas através da amostra 4.

Na Figura 4.24, apresenta-se a espectroscopia de duas áreas de interesse (A e B), obtidas da escova sugerida que foi testada na operação com pressão nominal (331 a 404 gf/cm²), totalizando 6 espectros analisados em pontos distintos.

Figura 4.24 - EDS amostra 2 - *grade 02* à pressão nominal.



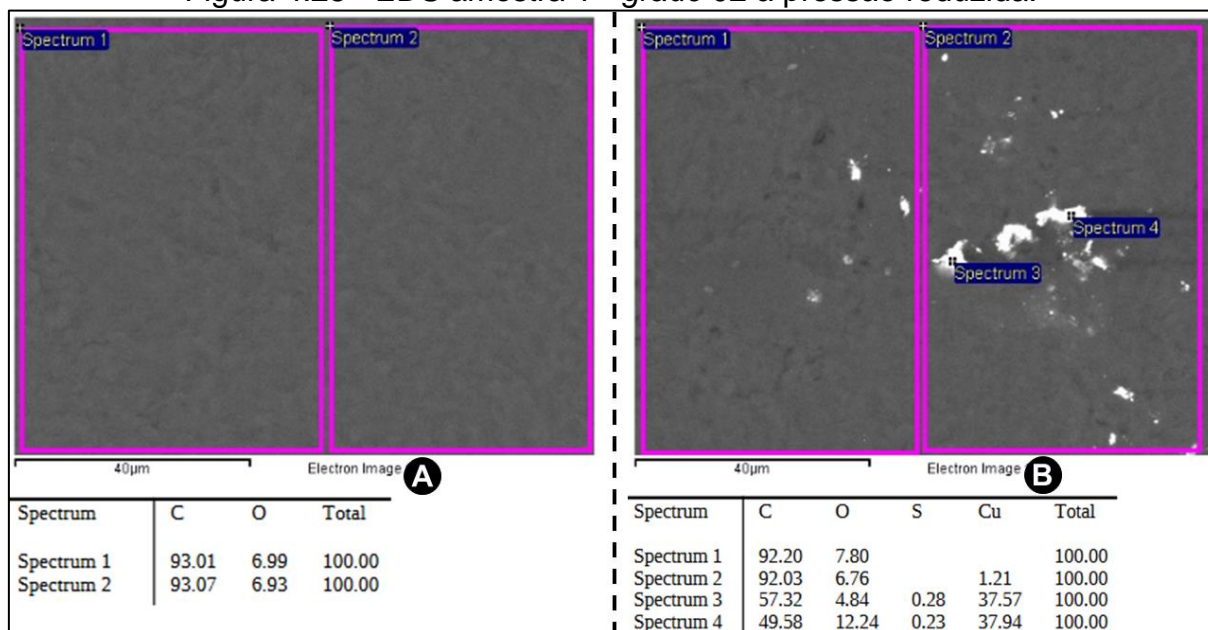
Fonte: AUTOR (2022) - Microscópio Philips XL30 PW 6800/70

Comparando a EDS apresentada na Figura 4.24 com a espectroscopia correspondente, executada numa amostra nova, exibida na Figura 4.22, é possível realizar as seguintes ponderações. Observando as análises relacionadas às regiões negras, especialmente os espectros 1A e 2B, percebe-se uma consonância entre os resultados obtidos anteriormente (espectros 2A, 3A e 1B da amostra 3), sendo definida com mais assertividade a morfologia do material base (cerce de 93 % de carbono e 7 % de oxigênio). Porém, ao avaliar a composição semiquantitativa das áreas claras, percebeu-se a presença de elementos contaminantes que não foram observados na amostra 3, tais como o cálcio, o enxofre, o níquel e o cobre.

Esse último, responsável pelo filetamento, somente apresenta concentração significativa no espectro 1B, entretanto, tendo em vista a escala adotada nas outras EDS's (40 µm), salta aos olhos a imensa área branca ocupada pelo referido espectro, que precisou de uma escala mais ampla (90 µm) para que pudesse ser completamente visualizada na Figura 4.24B. Então, considerando a operação do *grade 02* à pressão nominal é possível verificar, mesmo com pouco tempo de teste, que existem partículas de cobre, com pequenas concentrações e grandes dimensões, depositadas à face de contato das escovas inspecionadas através da amostra 2.

Por fim, apresenta-se na Figura 4.25 a EDS de duas zonas de interesse (A e B), obtidas da escova sugerida que foi testada na operação com pressão reduzida à valores confiáveis (210 a 260 gf/cm²), totalizando 6 espectros analisados em pontos distintos.

Figura 4.25 - EDS amostra 1 - *grade* 02 à pressão reduzida.



Fonte: AUTOR (2022) - Microscópio Philips XL30 PW 6800/70

Assim como feito na análise de contaminação da amostra 2, adota-se como base a EDS feita em uma escova nova da qualidade 02, conforme exibido na Figura 4.22. A partir dessa comparação depreendem-se as seguintes apreciações. Nas zonas puramente negras, os espectros 1A e 2A reforçam a composição do material base do *grade* 02 (cerca de 93 % de carbono e 7 % de oxigênio); além disso, os espectros 1B e 2B, que também contemplam cerca de 50 % da área observada, apesar de apresentarem algumas manchas claras, demonstram apenas um pequeno grau de contaminação por cobre. Tendo como foco as manchas brancas, caracterizadas pelos espectros 3B e 4B, percebeu-se a presença de elementos contaminantes que não foram observados na amostra 3, tais como o enxofre e o cobre. Esse último, foco deste estudo, apresenta concentração mediana e dimensões bastante reduzidas quando comparado à contaminação observada nas amostras 4 (Figura 4.23) e 2 (Figura 4.24). Tendo como base as EDS's realizadas nas escovas novas (amostras 3 e 5), definiu-se o material base de cada *grade*. A partir desses resultados, ao longo deste item, comparou-se a contaminação por partículas de cobre em cada uma das configurações testadas; o compilado dessas análises comparativas é exibido na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Compilado das análises comparativas de contaminação por cobre

Nº amostra	Arranjo utilizado no teste operacional	Contaminação por partículas cobre	
		Concentração	Dimensão
1	<i>Grade 02</i> à pressão reduzida	mediana	muito reduzida
2	<i>Grade 02</i> à pressão nominal	reduzida	elevada
3	<i>Grade 02</i> (escova nova)	nula	nula
4	<i>Grade 01</i> à pressão nominal	elevada	mediana
5	<i>Grade 01</i> (escova nova)	nula	nula

Fonte: AUTOR (2022)

A partir das análises microestruturais, percebeu-se que a face de contato das escovas, mesmo após o assentamento final, não possui uma aparência lisa e uniformemente distribuída. Essa visualização evidencia o fato de que toda e qualquer superfície, independente do material e do nível de polimento, é sempre permeada de asperezas.

Também, constatou-se que, diferentemente dos resultados obtidos no procedimento de aquecimento e redução, a contaminação por cobre foi observada em todas as escovas utilizadas no teste operacional (amostras 1, 2 e 4). Outra diferença relevante é que os pequenos pontos dourados, observados nas faces (laterais e de contato) das escovas do tipo 02, mostradas na Figura 4.17B e na Figura 4.17C, não são de fato cobre contido no material base, mas sim outros metais adicionados na fabricação nesse *grade*. Ressalta-se, portanto, a superioridade da EDS quando comparada à análise visual (a olho nu) de contaminação e, também, da composição da escova.

De maneira geral, considerando a inspeção visual das seis áreas de interesse relacionadas às escovas usadas no teste (amostras 1, 2 e 4), percebeu-se uma maior prevalência das zonas negras (material base) em detrimento das zonas claras (contaminantes e/ou aditivos) na amostra 1. Além disso, a partir das EDS's apresentadas, nota-se que o *grade 02* operando com pressão reduzida tende a impedir a fixação de alguns elementos contaminantes que foram observados nas amostras 2 e 4 tais como, cloro, potássio, cálcio e níquel.

Por fim, salienta-se que, na preparação das amostras, foram utilizados procedimentos de corte; à vista disso, não é possível afirmar que todos os elementos que originalmente contaminavam as amostras em teste foram mantidos após o processo. Apesar disso, salienta-se que todas as amostras, inclusive as escovas novas, passaram pelo mesmo processo, justificando assim as comparações qualitativas, dimensionais e semiquantitativas adotadas neste item.

4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo foi dividido em três seções principais, apresentadas como: medições em bancada, medições na operação e análise de deposição de partículas de cobre. Em cada uma dessas seções exibiu-se os procedimentos e, ao final desses, os resultados correspondentes, compilados na Tabela 4.9. Nesse contexto, a ausência de falhas de comutação pôde ser justificada pela progressão gradativa e concatenada dos testes, onde, a partir de cada resultado parcial, foi possível justificar o passo seguinte.

Tabela 4.9 - Compilado dos resultados dos procedimentos experimentais

Configuração		Grade 01 à pressão nominal			Grade 02 à pressão nominal			Grade 02 à pressão reduzida		
Bancada	Carregamento (A)	3	8	15	3	8	15	3	8	15
	Força atrito (N)	4,5	3,5	4,35	3,1	2,38	2,9	2,25	2,16	2,49
	Temperatura (°C)	56,4	56,6	56,9	49,6	51,7	51,2	42	39,6	43,3
Operação	Desgaste (%)	100% (0,7853)			45,46% (0,3570)			27,65% (0,2171)		
Deposição	Redução do cobre		Base	Contato	Base	Contato	Base	Contato		
			x	✓	✓	x	✓	x		
	EDS	Concentração	Elevada			Reduzida			Mediana	
	Dimensão	Mediana			Elevada			Muito reduzida		

Fonte: AUTOR (2022)

Na primeira seção, constatou-se que a troca do tipo de escova original (*grade 01*) pelo sugerido (*grade 02*) reduz, em média, considerando os três regimes de carregamento, 31,0 % da força de atrito; se, além da mudança do material, houver a redução da força de molas para valores confiáveis a atenuação da força de atrito será de 43,7 %. Além disso, nas mudanças de carregamento, observou-se que o abrandamento da pressão das molas é capaz de atenuar as súbitas oscilações da força de atrito, aumentando a robustez da comutação no consequente teste operacional.

Os resultados da segunda seção demonstraram que a mudança do material da escova (*grade 01* pelo *02*) foi capaz de reduzir, para pouco menos da metade, o desgaste em operação. Ainda, utilizando o material sugerido e reduzindo a pressão em 36 %, o desgaste se estabilizou em pouco mais de um quarto daquele observado no arranjo original. Sob a ótica do desempenho, os resultados do teste operacional coincidiram com os obtidos em bancada, comprovando a íntima relação entre o coeficiente de

atrimento e o desgaste observado em funcionamento. Salienta-se, também, que essa previsão do desempenho, propiciada pelas medições em bancada, foi essencial na mitigação das chances de falhas de comutação com o equipamento in loco.

Conjuntamente, os ensaios em bancada e o teste operacional puderam definir o comportamento das configurações propostas. Porém, a notável melhoria no desempenho da comutação, evidenciada pela redução do desgaste das escovas e pela ausência de falhas em operação, não foram capazes de comprovar a atenuação ou a eliminação do desgaste anormal. Nesse contexto, a terceira seção apresentou dois métodos para análise de deposição de partículas de cobre na face de contato.

Inicialmente, valeu-se de a técnica de aquecimento e redução das escovas utilizadas no teste operacional. Nesse caso, a inspeção visual (a olho nu) somente acusou a deposição de cobre no arranjo original (*grade* 01 à pressão nominal). Contudo, apesar de possuir uma execução bastante simples, em função do caráter puramente qualitativo da referida técnica, optou-se por utilizar ou outro procedimento que complementasse as análises.

Assim, apresentou-se o procedimento de análise microestrutural por EDS, que utiliza o MEV na obtenção de imagens com elevado nível de ampliação. A inspeção semiquantitativa por EDS constatou a inexistência de cobre nas duas amostras de escovas novas, contudo, nas três amostras de escovas testadas em operação foi percebido algum nível de contaminação. Dos três arranjos testados, porém, destacou-se o desempenho negativo do *grade* 01 à pressão nominal, que exibiu elevada concentração e dimensões medianas. Por outro lado o *grade* 02 à pressão atenuada apresentou desempenho bastante satisfatório, pois além de apresentar concentração mediana, exibiu dimensões muito reduzidas, que tendem a facilitar a vaporização, nos *hot spots*, das partículas de cobre depositadas nos poros do carvão.

À vista dos resultados desses procedimentos experimentais e conhecendo os mecanismos e especificidades que visam garantir o bom desempenho da coleta de corrente, é possível afirmar que o filetamento, que por décadas acometeu o comutador dos conversores rotativos, pode ser relacionado não à baixa densidade de corrente, mas à operação com pressão das molas excessivamente alta e com um tipo de escovas sem tratamento, incompatível com o regime de carregamento e contaminação ambiental encontrados na operação dessas máquinas.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Conforme demonstrou-se neste trabalho, a coleta de corrente é essencial ao funcionamento de diversos equipamentos, especialmente alguns de grande porte, que vêm servindo, há décadas, ao propósito para o qual foram fabricados. Utilizando novas tecnologias no desenvolvimento, fabricação e avaliação de desempenho de novos materiais, essa técnica pode ser aperfeiçoada de forma a melhorar projetos existentes e também ser aplicada à projetos inovadores.

Nesta dissertação, sobretudo na escolha da disposição e do conteúdo dos capítulos, buscou-se apresentar as implicações das investigações de forma que o texto pudesse ser aproveitado na prática, servindo de suporte para a consulta dos temas aqui elencados. Isso posto, em função da interdisciplinaridade deste trabalho, entende-se que o mesmo pode ser utilizado na melhoria de desempenho na coleta de corrente dos mais variados tipos de máquinas rotativas escovadas, mas, também, serve para demonstrar a grande aplicabilidade dos estudos dos mecanismos de desgaste.

Durante a revisão bibliográfica, apresentou-se como maior desafio a análise mecânica do contato entre escovas e comutadores. Tendo como base a literatura técnica de manutenção de máquinas rotativas, encontraram-se importantes análises descritivas dos fenômenos macro que, posteriormente, foram aclaradas pela investigação micro dos processos mecânicos da comutação. Neste contexto, entende-se, porém, que a existência de corrente elétrica no contato seco, essencial ao processo de sinterização do carbono por eletrólise, que fomenta a criação e a estabilização da pátina, propende a tornar as análises no contato ainda mais desafiadoras.

O estudo de caso constatou que o desgaste anormal dos comutadores dos MCVR's estava ligado à operação com pressão das molas inadequada e com o uso de um *grade* sem tratamento. Nessa investigação, deparou-se com significativa dificuldade na obtenção de um histórico consistente acerca do filetagem. De modo geral, esse inconveniente, fortemente atrelado a falta de registros de falhas e/ou de desempenho da máquina ao longo dos anos, é, infelizmente, bastante corriqueiro na indústria.

Em função da consonância dos resultados obtidos durante o desenvolvimento experimental, ressalta-se a eficácia dos métodos empregados nos ensaios em bancada, no teste operacional de desempenho e na verificação, qualitativa e semiquantitativa, da deposição de partículas de cobre à face das configurações testadas. De modo geral, salienta-se que os custos para a realização desses procedimentos podem ser considerados insignificantes, tendo em vista a redução do consumo de escovas e da atenuação do filetamento. Conjuntamente, ambos resultados tendem a reduzir a ocorrência de falhas, a tornar mais céleres as manutenções preventivas e, principalmente, a aumentar a durabilidade do comutador.

5.2 PROPOSTAS FUTURAS

Em função das restrições de recursos e tempo, neste trabalho, investigou-se o desempenho de apenas três configurações de escovas e pressões de mola. Assim, visando a continuidade da investigação, propõe-se a avaliação de outros grades e pressões, aumentando a amostragem e, portanto, a confiabilidade dos resultados obtidos. Além disso, no caso dos MCVR's, entende-se ser possível adaptar os porta escovas originais, utilizando escovas com menor área de seção. Assim, haverá o aumento da densidade de corrente sem ampliação da chance de falhas em operação.

Tendo em vista que os resultados das medições em bancada retrataram de maneira fidedigna o desempenho na operação das configurações utilizadas, entende-se que os dispositivos de medição de temperatura e atrito, propostos, respectivamente, nos itens 4.1.2 e 4.1.3, obtiveram êxito. Porém, salienta-se que o uso desses mecanismos, projetados e fabricados especificamente para este trabalho, é restrito aos MCVR's.

À vista disso, propõe-se o desenvolvimento de um equipamento, eventualmente patenteável, capaz de mensurar as principais grandezas tribológicas do contato, principalmente a força de atrito e a temperatura no contato, em variados tipos de máquinas escovadas. Para tal, pode-se utilizar, por exemplo, extensômetros (*strain gauges*) e sensores térmicos fixados aos porta escovas originais, comprometendo minimamente a robustez da coleta de corrente do equipamento e possibilitando a execução de ensaios embarcados.

REFERÊNCIAS

- ALZAMORA, A. M. Modelagem e implementação computacional de um motor elétrico de tração de corrente contínua aplicado a ferrovias. CEEL Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 5 a 9 de novembro de 2018.
- ALVARENGA, H. Benefícios que a cabotagem pode trazer para o país. ILOS, 31 jan. 2019. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/tag/matriz-de-transportes/>.
- ARIZA, C. F. Manutenção corretiva de máquinas elétricas rotativas. Ed. McGraw-Hill. São Paulo. Brasil. 1977.
- BATH, A. Wind Turbine Suppliers see record year for deliveries despite supply chain and market pressures. Global Wind Energy Council, 19 de maio de 2022. Disponível em: <https://gwec.net/wind-turbine-suppliers-see-record-year-for-deliveries-despite-supply-chain-and-market-pressures/>.
- BOGDANOVICH, P. N.; TKACHUK, D. V. Temperature distribution over contact area and “hot spots” in rubbing solid contact. Tribology International, v. 39, n. 11, p. 1355-1360, 2005.
- BORGES, A. N. Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da microestrutura. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BRANÇAN, E. F. Manual de escovas elétricas CARBOMECH. 1987. São Paulo, Brasil.
- BRASIL. Decreto n.º 9863, de 27 de junho de 2019. Dispõe sobre o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - Procel e sobre o prêmio nacional de conservação e uso racional da energia. Diário Oficial da União. Brasília. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/D9863.htm.
- BRENDLE, M.; COLIN, G.; The frictional and transfer behaviour of compacted solid lubricants on smooth metallic surfaces, Friction and Traction, Butterworth London, p.124, 1991.
- BRUNI, K. A. Guia para o bom desempenho de escovas e comutadores. GE Carbon Products. Toronto. Canada. 1984.

COBRASMA. Manual de manutenção do conversor DEMETRÔ. 1984. Belo Horizonte, Brasil.

CRUZ, H.; GONZALEZ, C.; JUÁREZ, A.; HERRERA, M.; JUAREZ, J. Quantification of the microconstituents formed during solidification by the Newton thermal analysis method. *Journal of materials processing technology*, v. 178, n. 1-3, p. 128-134, 2006.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdiPUCRS, 2007.

BRANDÃO, D. A. de L. Carregador veicular ultrarrápido baseado no conversor True Unit Power Factor. 2021.

DIÁRIO DO COMÉRCIO, Cemig destina mais de R\$ 13,6 mi a iniciativas do programa de eficiência energética, 10 de junho de 2022, Economia. Disponível em: <https://l1nq.com/diariodocomercio-economia-cemig>.

DORINSON, A.; LUDEMA, K. C. *Mechanics and chemistry in lubrication*. Elsevier, 1985.

FARIA, M. T. C. de. Conceitos introdutórios da teoria da lubrificação. 27 out. 2021, 23 fev. 2022. 19 p. Notas de Aula.

FEI COMPANY, Scanning electron microscope XL30 TMP. 6 p. Data Sheet. Disponível em: https://investigacion.us.es/docs/web/files/catalogo_xl30.pdf.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; KUSKO, A. *Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas*. McGraw-Hill, 1975. São Paulo. Brasil.

FLUKE CORPORATION, Clamp meters 374, 375, 376. 28 p. User Manual. July 2010.

GONZALEZ, A. União Europeia quer acabar com venda de carros até 2030 para alcançar meta do Acordo de Paris, 21 de setembro de 2018. Natureza. Disponível em: <https://tinyurl.com/V2G03>.

GROUPE CARBONE LORRAINE. Technical guide: brushes for eletrocal machines. Dumoulin. France. 2000.

HOLINSKI, R. Fundamentals of dry friction and some practical examples. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2001.

- IMPAC, Dinamômetro digital IP-90DI. 14 p. Manual do usuário. Setembro de 2014.
- LANGLADE, C.; FAYEULLE, S.; OLIER, R. New insights into adhesion and lubricating properties of graphite-based transfer films. *Wear*, v. 172, n. 1, p. 85-92, 1994.
- MENDOZA LLERENA, M. T. Identificação de parâmetros de geradores síncronos usando métodos de ajuste de curvas e ensaio em frequência. 2011. 188 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP.
- MORGANITE GEVISA. Escovas de carvão. Campinas. Brasil. 1998. 14 p.
- MORGAN AM&T. How to select carbon brushes for motors and generators. São Bernardo do Campo. Brasil. 1998. 58 p.
- NSK BRASIL. NSK bearing doctor: diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos. São Paulo, 2001. Disponível em: <https://www.nsk.com.br/upload/file/B08.pdf>.
- PINHEIRO, H. H. C. Máquinas e acionamentos elétricos. módulo1 (geradores ca) e 2 (motores ca). IFRN, 2007. 44 p. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos>
- RAYTEK, Infrared thermometer MX2 TD. 18 p. User Manual. May 2003.
- ROBERGE, R.; HERON, C. The secret to that old black magic: mastering the art of sparkless commutation. *IEEE Industry Applications*, v. 26, n. 1, p. 6-14, 2019.
- SIMÕES, F. H. Análise de dados de vida aplicada em motores de tração ferroviários. 2019.
- TAVARES, M. M. Uso do gerador de indução duplamente alimentado como gerador eólico. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- TEXAS INSTRUMENTS, LM35 Temperature Sensors. 39 p. Data Sheet. December 2017. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>.
- VAUQUELIN, A.; VILAIN, J. P.; VIVIER, S.; LABBE, N.; DUPEUX, B. A new modelling of dc machines taking into account commutation effects. In: 2008 18th International Conference on Electrical Machines. IEEE, 2008. p. 1-6.
- VARADI, K.; NEDER, Z.; FRIEDRICH, K. Evaluation of the real contact areas, pressure distributions and contact temperatures during sliding contact between real metal surfaces. *Wear*, v. 200, n. 1-2, p. 55-62, 1996.

VILLAR, G. J. de V. Máquinas e acionamentos elétricos - máquinas de corrente contínua. CEFET RN campus Mossoró. out. 2006. 33 p. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos>.

YOUNG, C. BMW's fifth-generation electric motor is a magnet-free masterpiece. Interesting Engineering, 14 de janeiro de 2022, Innovation. Disponível em: <https://interestingengineering.com/bmws-fifth-generation-electric-motor-is-a-magnet-free-masterpiece>.