CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
JAIRO DE LIMA SOUZA

SISTEMA DE FRENAGEM AUTOMOTIVO: AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS MULTIVARIADOS PARA PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE FLUÍDOS DE FREIOS EM BANCADA DE ENSAIOS

São Bernardo do Campo
2026

JAIRO DE LIMA SOUZA

SISTEMA DE FRENAGEM AUTOMOTIVO: AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS MULTIVARIADOS PARA PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE FLUÍDOS DE FREIOS EM BANCADA DE ENSAIOS

Tese de Doutorado apresentada ao Centro Universitário FEI para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, orientada pelo Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

São Bernardo do Campo
2026

Souza, Jairo de Lima.
Sistema de frenagem automotivo: aquisição, processamento e análise de sinais multivariados para predição da qualidade de fluídos de freios em bancada de Ensaios / Jairo de Lima Souza. São Bernardo do Campo, 2026.
232 p. : il.

Tese - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz.

1. Freios. 2. Disco de Freio. 3. Combinação Multivariada. 4. Pastilhas. 5. Fluído de freios. . I. Thomaz, Carlos Eduardo, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

APRESENTAÇÃO DE TESE
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica

Doutorado

PGE-10

Aluno(a): Jairo de Lima Souza **Matrícula:** 522302-9

Título do Trabalho: SISTEMA DE FRENAGEM AUTOMOTIVO: AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS MULTIVARIADOS PARA PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE FLUÍDOS DE FREIOS EM BANCADA DE ENSAIOS

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Imagens

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Data da realização da defesa: 28/09/2026

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

A defesa de tese do aluno Jairo Souza iniciou-se com a sua apresentação oral que foi extensa, com duração de 60 minutos. A seguir, cada examinador fez sua arguição individualmente, questionando o aluno sobre o desenvolvimento multidisciplinar da bancada de ensaios, os protocolos experimentais adotados e os resultados obtidos. O aluno respondeu adequadamente todas as questões levantadas, mostrando pleno conhecimento sobre o trabalho desenvolvido. Ao final, os examinadores fizeram sugestões de melhorias, principalmente de redação, incluindo um texto sobre limitações da tese, para serem incorporadas na versão final do trabalho. O aluno foi aprovado por unanimidade.

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta

Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga

Prof. Dr. André de Souza Mendes

Prof. Dr. Salvador Pinillos Gimenez

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Dedico este trabalho primeiramente a DEUS pela provisão de saúde e aos meus falecidos pais Isabel e Eufrásio. Uma dedicação especial à minha amada esposa Adriana e aos meus filhos Amanda e Bruno.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde relativa e pela dádiva da perseverança e sabedoria para vencer diversos momentos difíceis desta escalada tão íngreme que é o processo de inovação. Agradeço a minha família pelo apoio incondicional nesta trajetória.

É com imensa gratidão que expresso reconhecimento à Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros, na pessoa do Padre Theodoro Peters, cujo apoio inestimável fortaleceu o desenvolvimento acadêmico e científico deste projeto.

Meu sincero agradecimento ao Prof. Dr. Vagner Bernal Barbeta, atual Reitor, e ao Prof. Dr. Gustavo Henrique Bolognesi Donato, seu antecessor, pelo compromisso e dedicação à educação, além das valiosas orientações do Vice-Reitor Prof. Dr. Ricardo Belchior e Prof. Dr. Ronaldo Gonçalves, que contribuíram significativamente para a concretização desta iniciativa.

Ao Coordenador do Curso de Mecânica, Prof. Dr. Sandro Luis Vatanabe, seu antecessor Prof. Dr. Marko Ackermann e ao Coordenador do Programa de Pós-Graduação de Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica, Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz, a minha profunda gratidão pelo suporte administrativo, técnico e intelectual, fundamentais para cada etapa desse trabalho.

Também quero reconhecer a dedicação dos colegas da AGFEI, Superintendência, Inspetoria, Manutenção Elétrica e Mecânica, cujo empenho e parceria foram essenciais para tornar esta pesquisa uma realidade.

A parceria com o Centro de Laboratórios Mecânicos foi crucial para o desenvolvimento da nova bancada de Pesquisa e Desenvolvimento para Sistemas de Frenagem Automotivos, proporcionando avanços tecnológicos e científicos que impulsionarão novas descobertas na área.

Uma menção especial à Marcela Gomes do CLM e aos alunos dos diversos grupos de pesquisas tanto na graduação, quanto na pós-graduação dos Departamentos de Engenharia Mecânica e dos pesquisadores do Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica Fabriccio Cerdan, Lucca Perchon, Renan Araújo e Jessé Damião, que, ao longo de quatro anos, contribuíram para que este projeto se materializasse.

Uma menção honrosa e agradecimento às empresas parceiras: Grupo Alubar, Ceross Equipamentos Industriais Ltda, Grupo Siemens, Tirreno, Valmar, Vilage Marcas e Patentes cujo apoio e comprometimento foram indispensáveis para que este projeto ganhasse forma.

Um agradecimento especial ao Sr. Valdemir Marcos, sócio proprietário da Valmar Manutenções Industriais, ao Sr. William Castro, empresário e proprietário da Ceross

Equipamentos Industriais Ltda, ao Sr. Paulo Bernardo, engenheiro da Ceross Equipamentos Industriais, ao Sr. Julio Maria de Faria, sócio proprietário da Asdeug Serviços Elétricos, ao Sr. Salgueiro da Manutenção Elétrica da FEI, ao Sr. Anderson Souza da Siemens, ao Sr. Gilverton Chbane diretor da Vilage Marcas e Patentes, ao Daniel Scuzzarelo CEO da Divisão de Softwares da Siemens e finalmente ao COO do Grupo Alubar, André Kishi, que não mediram esforços para apoiar este projeto.

RESUMO

Frente às novas demandas de segurança viária originadas pela coexistência de múltiplos modais de transporte nos grandes centros urbanos e à introdução de sistemas de frenagem autônoma, a confiabilidade analítica dos componentes automotivos tornou-se crítica. O sistema de frenagem opera sob uma rígida interdependência dinâmica entre condutos, eletroválvulas, calipers, discos, pastilhas e o fluido hidráulico, exigindo que suas variáveis funcionem de forma integrada e dentro de limites que são determinantes para assegurar a máxima eficiência. A prática global da indústria adota a substituição do fluido de freio por intervalos de tempo predeterminados, estabelecidos com base em experimentos laboratoriais e experiências acumuladas em campo, método que difere da avaliação em tempo real da degradação física e química gerada pela absorção de umidade e os riscos da redução do ponto de ebulição. A literatura científica corrente concentra-se no impacto dessa contaminação, não havendo modelos preditivos baseados no monitoramento integrado dessas variáveis. Esta tese preenche essa lacuna por meio de um método de pesquisa integradora inédita, viabilizado pelo desenvolvimento de uma bancada de ensaios inovadora para a execução de todas as suas fases, da concepção à execução dos ensaios definitivos para tomada de dados. Os experimentos replicaram fisicamente a arquitetura veicular para capturar a multivariação simultânea e as interações combinadas de sinais de temperaturas, rotações, pressões, torques e velocidades angulares e lineares sob condições controladas. A partir do processamento estatístico e da redução de dimensionalidade dos sinais obtidos, implementou-se um arcabouço de aprendizado que utiliza componentes principais combinadas com discriminantes lineares para a classificação de padrões via K-Nearest Neighbors (KNN). Esta abordagem permitiu a identificação da resposta dinâmica integrada do sistema de freios. O arcabouço de aprendizado proposto viabilizou algoritmos que podem ser embarcados em arquiteturas veiculares para a predição do estado do fluido a partir do comportamento multivariado do sistema hidráulico, assegurando respostas rápidas e mitigando riscos à segurança viária.

Palavras-chave: freios; disco de freio; combinação multivariada; pastilhas; fluído de freio.

ABSTRACT

In response to the new road safety demands arising from the coexistence of multiple transportation modes in large urban centers and the introduction of autonomous braking systems, the analytical reliability of automotive components has become critical. The braking system operates under a strict dynamic interdependence among lines, solenoid valves, calipers, discs, brake pads, and hydraulic fluid, requiring all variables to function in an integrated manner and within limits that are decisive for ensuring maximum efficiency. The global automotive industry practice adopts brake fluid replacement at predetermined time intervals, established on the basis of laboratory experiments and accumulated field experience. This approach differs from real-time assessment of the physical and chemical degradation caused by moisture absorption and the associated risks resulting from a reduction in the fluid's boiling point. Current scientific literature is primarily focused on the effects of such contamination, while predictive models based on the integrated monitoring of these variables remain absent.

This thesis addresses this gap through an unprecedented integrative research methodology, enabled by the development of an innovative test bench designed to support all stages of the study, from conceptualization to the execution of the definitive experiments for data acquisition. The experiments physically replicated vehicle architecture in order to capture simultaneous multivariate behavior and the combined interactions of temperature, rotational speed, pressure, torque, and angular and linear velocity signals under controlled conditions. Through statistical processing and dimensionality reduction of the acquired signals, a learning framework was implemented using Principal Component Analysis (PCA) combined with Linear Discriminant Analysis (LDA) for pattern classification via the K-Nearest Neighbors (KNN) algorithm. This approach enabled the identification of the integrated dynamic response of the braking system.

The proposed learning framework enabled the development of algorithms that can be embedded within vehicle architectures to predict brake fluid condition based on the multivariate behavior of the hydraulic system, thereby ensuring rapid responses and mitigating road safety risks.

Keywords: brakes; brake disc; multivariate combination; brake pads; brake fluid.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	*Anti-lock Braking System* (Sistema de Freio Antitravamento)
CFD	*Computer Fluid Dynamics*
CLP	Controle Lógico Programável
DOT	Departamento de Transporte Americano
ECE	*Economic Commission for Europe*
FFT	Transformadas de Fourier
KNN	*K-Nearest Neighbors*
LDA	*Linear Discriminant Analysis* (Análise Discriminante Linear)
PCA	*Principal Component Analysis* (Análise de Componentes Principais)
SBR	Elastômeros do tipo estireno butadieno
SVM	*Support Vector Machines*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de contato – pastilha e disco (m^2)
A	Representação de uma matriz de dados
a	Vetor
Ac	Área do pistão da pinça (m^2)
A_F	Área frontal do veículo (m^2)
$A_{pistão}$	Área do pistão do cilindro mestre (m^2)
Aro	Aro da roda (")
B_b	Braço de força da célula de carga (m)
C_X	Coeficiente de forma do veículo
D	Matriz de desvios
EK	Energia cinética do veículo
F	Força hidráulica (N)
f_a	Força no pedal de freios (N)
f_b	Força resultante do momento da alavanca do pedal de freios (N)
f_c	Força no êmbolo do cilindro mestre (N)
$F_{aplicada}$	Força de aplicação do condutor (N)
F_c	Força célula de carga (N)
F_D	Força dinâmica do veículo
$F_{efetiva}$	Força de frenagem efetiva (N)
F_{FH}	Força de frenagem traseira
F_{FV}	Força de frenagem dianteira
F_G	Força peso
F_{QH}	F_{QH} Força normal de reação traseira
F_{QV}	Força normal de reação dianteira
F_R	Coeficiente de resistência a rolagem
F_{RA}	Força de resistência aerodinâmica
F_{RP}	Força de rampa no eixo X
F_{RRH}	Força de resistência à rolagem traseira
F_{RRV}	Força de resistência a rolagem dianteira
g	Número de grupos ou classes para definir limite de autovetores
I	Relação de transmissão entre os 3 pinhões do eixo primário e a 3 coroas do

	eixo secundário
k	Autovetores associados aos maiores autovalores para construção da matriz de transformação do subespaço reduzido
L	Distância entre eixos
L	Matriz de projeção definida no LDA
Larg	Largura roda/pneu (mm)
L_H	Distância entre vetor reação da força peso em Y e o ponto A
L_V	Distância entre vetor reação da força peso em Y e o ponto B
M	Massa do veículo
M	Número total de frenagens na operação do vetor
m	Dimensionalidade total do vetor
M_B	Momento nos apoios traseiros
N	Número de amostras por ensaio no vetor
n	Número de amostrado das classes ω
P	Pressão hidráulica
P	Matriz ortonormal de projeção
p	Espaço reduzido de dimensão
P_B	Potência de frenagem do veículo
P_B	Particulada com 30-45 microns
Perf	Altura da parede lateral do pneu (%)
P_F	Potência de frenagem
P_S	Particulada com 10-20 microns
P_{SW}	Limalha Comprimento: 1-2 mm, diâmetro: 50 mícrons
P_{TOT}	Potência total de frenagem
Q	Fluxo de calor – atrito entre pastilhas e disco de freios
$R_{Dinamico}$	Raio dinâmico de rodagem do pneu (m)
RPM	Rotação do eixo primário
r	Raio dinâmico do pneu
R_{eff}	Raio efetivo de atuação da força de frenagem
R_T	Tempo de resposta de frenagem
S	Matriz de covariância
S_b	Matriz de variância entre classes
S_w	Matriz de variância dentro das classes

T	Operador de transposição de vetor
T	Torque de frenagem (N·m)
t	Tempo de frenagem
t	Número de temperaturas analisadas na operação com o vetor
T_w	Momento inicial do ensaio
T_x	Momento em que a luz de freio do veículo líder é acesa, sinalizando frenagem
T_y	Momento no qual o pé do condutor do veículo que seguem na traseira toca o pedal do freio
T_z	Momento em que o condutor do veículo na traseira retira o pé do freio
V	Velocidade linear (m/s)
v_r	Velocidade relativa entre o veículo e o ar
V_k	Subespaço reduzido
W	Força peso
W	Decomposição espectral direta de uma matriz combinada não-singular
X	Estrutura matricial global qualquer
x_i	Amostra do vetor de médias
Y	Resultado da transformação linear entre a matriz de dados e a matriz de projeção
Λ	Matriz diagonal resultante de uma operação entre a matriz de projeção e a matriz de covariância
λ	Autovalores extraídos da decomposição espectral direta
μ	Coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco
μ_j	Vetor de médias
ρ_a	Densidade do ar
ØPneu	Diâmetro do pneu (m)
ω	Classes de um espaço amostral

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização dos principais componentes do sistema de freios. 33
Figura 2 – Sistema de Freios a disco 34
Figura 3 – Sistema de Freios a tambor 35
Figura 4 – Sistema de Freios (Principais Componentes). 36
Figura 5 – Definição das forças atuantes em um automóvel durante frenagem 37
Figura 6 – Distribuição das forças de frenagem em rampa 40
Figura 7 – Sequência de carga adicionada através de passageiros 41
Figura 8 – Fluxo de calor e temperatura no disco de freios 43
Figura 9 – Simulações de temperatura no disco de freios 43
Figura 10 – Temperatura de frenagem em movimento direto-eixo dianteiro 44
Figura 11 – Temperatura de frenagem em movimento direto-eixo traseiro 45
Figura 12 – Estrutura da Pastilha de freios (detalhe da Figura 2). 47
Figura 13 – Classificação dos materiais de atrito (Pastilhas de freio). 49
Figura 14 – Discos de freio sólido. 54
Figura 15 – Disco de freio ventilado. 54
Figura 16 – Discos de freios ventilados. 55
Figura 17 – Modelo de utilidade experimental para análise quantitativa de emissões de particulados. 57
Figura 18 – Três níveis ascendentes mais altos de temperatura - ligante orgânico. 58
Figura 19 – Número total de partículas versus a temperatura média do disco - ligante inorgânico. 59
Figura 20 – Esquema geral de um sistema de freios automotivo com destaque para fontes de calor. 60
Figura 21 – Contaminação acumulada por umidade versus quilometragem do veículo. 64
Figura 22 – Variação do ponto de ebulição do fluido de freio versus quilometragem do veículo nas condições de ensaio. 64
Figura 23 – Curvas de desaceleração e Fade em função do Coeficiente de atrito. 69
Figura 24 – Temperaturas máximas atingidas pelas pastilhas e discos de freios. 70
Figura 25 – Esquema do equipamento de ensaio de ruído e vibrações de freio. 71
Figura 26 – Histórico de tempos de aceleração para os ciclos de desempenho durante o ciclo de frenagem. 73
Figura 27 – Gráficos plotados a partir das Transformadas de Fourier (FFT) no domínio do tempo

para os ciclos de desempenho de frenagem e suas frequências de vibrações. 74
Figura 28 – Simulador desenvolvido pelos pesquisadores (esquerda), vista do automóvel líder projetado na tela do simulador (à direita). 76
Figura 29 – Processo experimental. 78
Figura 30 – Processo experimental - A relação entre o tempo de resposta de frenagem, a força média de frenagem e a distância média entre veículos. 78
Figura 31 – Tempo de resposta de frenagem e taxa de desaceleração a 50km/h. 79
Figura 32 – Bancada de Ensaios de Freios: Conceito (a) vs modelo físico (b). 86
Figura 33 – Bancada de Ensaios de Freios em vista lateral por seção. 87
Figura 34 – Kit coroa, pinhão e corrente (sistema de transmissão da bancada) – Kit de transmissão fornecedor Allen, modelo 80357, Fazer 150 14-1045, material da coroa e do pinhão SAE 1045, quantidade de dentes da coroa 41, quantidade de dentes do pinhão 14, quantidade de elos da corrente 126. 88
Figura 35 – Vista da montagem do flange do rolamento (eixo secundário da bancada). 88
Figura 36 – Vista da montagem da parte frontal do eixo secundário. 89
Figura 37 – Vista da montagem da região superior da bancada. 89
Figura 38 – Disco de freios VW Polo Highline e TCross (Código HF81C diâmetro ext.276 mm). 90
Figura 39 – Pastilhas de freios VW Polo Highline e T-Cross 1.0 TSI - Código 0986BB0178. 90
Figura 40 – Vista frontal e lateral em corte da bancada (em fase de concepção). 91
Figura 41 – Vista frontal da bancada (projeto a esquerda e execução final a direita). 91
Figura 42 – Vista superior da bancada (projeto a esquerda e execução final a direita). 92
Figura 43 – Perspectiva da bancada (projeto a esquerda e execução final a direita). 92
Figura 44 – Vista do painel para alimentação elétrica da bancada. 93
Figura 45 – Motor elétrico WEG AL132M 21 kW @ 2950 rpm. 94
Figura 46 – Componentes da parte superior no painel de controle. 95
Figura 47 – Painel de controle (componentes da parte intermediária). 96
Figura 48 – Painel de controle (componentes da parte inferior). 97
Figura 49 – IHM Delta (tela de controle operacional da bancada). 98
Figura 50 – Painel com sistema pneumático e hidráulico. 99
Figura 51 – Esquema para visualização geral do sistema pneumático e hidráulico. 100
Figura 52 – Encoder incremental para tomada de dados e monitoramento da rotação – Fabricante Omron; modelo E6B2-CWZ5B; tensão de alimentação 12 – 24V;

1000 pulsos por rotação. 101
Figura 53 – Sensor de temperatura do fluido de freios no cilindro mestre – Fabricante Resispar; Termopar Tipo J com baioneta; tipo de medição Pt100; faixa de temperatura -20 a 350ºC (+/- 1,5ºC). 102
Figura 54 – Sensor de temperatura do fluido de freios na voluta da pinça de freio – Fabricante IFM electronic; modelo TS2759; precisão DIN EN60751; classe A+/- (0,15 + 0,002 x |t|) ºC; alcance de medição -30 a 180ºC; cabo com 2m revestido com silicone; conexão M12. 102
Figura 55 – Sensor de temperatura do disco de freios – Fabricante Safiratec; Termopar tipo K com haste de 6mm; tipo de medição PT100; faixa de temperatura 0ºC a +400ºC (+/- 1,1ºC; comprimento 1m. 103
Figura 56 – Sensor de pressão do fluído de freios no cilindro mestre e pinça do disco de freios – Fabricante Gefran; modelo KSNEEB25DMV2130X000U00; faixa de medição 0 a 250 bar; faixa de incerteza +/-0,5% FS típico; sinal de saída 0 a 10 Vcc; grau de proteção IP65. 103
Figura 57 – Célula de carga tipo Z para medição de tração da força de frenagem – Capacidade 1000kg, fluência (30 min): <+/-0,02% da escala completa; não linearidade: <0,02% da escala completa; histerese <0,02% da escala completa; Faixa de temperatura: operacional -20ºC a +60ºC; faixa de temperatura compensada -10ºC a+50ºC; sobrecarga segura 120% da capacidade; impedância de entrada: 400+/-10 Ohms; impedância de saída 350 +/- 5 Ohms; impedância de isolamento >5000 MOhms; excitação: recomendação 10Vcc/CA; excitação máxima 20Vcc/CA. 104
Figura 58 – Instalação física (Bancada de Ensaios de Freios). 105
Figura 59 – Estrutura das telas para interface com o usuário. 106
Figura 60 – Amostras DOT3 – exemplos 1% e 5% (%m/m) contaminação por umidade. 107
Figura 61 – Amostras DOT4LV – exemplos 1% e 5% (%m/m) contaminação por umidade. 108
Figura 62 – Amostras DOT5.1 – exemplos 1% e 5% (%m/m) contaminação por umidade. . 108
Figura 63 – Reservatório de fluído de freios branco com tampa na cor preta. 109
Figura 64 – Válvula de sangria. 110
Figura 65 – Painel de controle da bancada em modo manual mostrando a pressão hidráulica 111
Figura 66 – Válvula de sangria desrosqueada no início do flushing (lado esquerdo) e totalmente retirada no final do flushing e drenagem (lado direito). 113

Figura 67 – Volume morto do reservatório – extração de fluído com seringa e mangueira de borracha natural. 113
Figura 68 – Localização Física da Instrumentação. 114
Figura 69 – Espaço de coordenadas baseado no PCA. 120
Figura 70 – Passos visualizados para calcular um subespaço de menor dimensão da técnica LDA. 125
Figura 71 – Comparação visualizada entre os dois subespaços de menor dimensão que são calculados usando três classes diferentes. 126
Figura 72 – Projeção da matriz de dados no espaço de menor dimensão do LDA. 128
Figura 73 – Fluxograma do tratamento dos dados. 130
Figura 74 – Válvula manual reguladora de pressão. 134
Figura 75 – Tela do sistema de controle da bancada – demonstrando 25 bar de pressão hidráulica. 135
Figura 76 – Tela do sistema de controle da bancada – demonstrando 15 bar de pressão hidráulica. 136
Figura 77 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0% e 3% de umidade. 141
Figura 78 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0% e 3% de umidade. 142
Figura 79 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0% e 5% de umidade. 143
Figura 80 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0% e 5% de umidade. 143
Figura 81 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT3 com 0% e 5%. 144
Figura 82 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 145
Figura 83 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 146
Figura 84 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 147
Figura 85 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 148
Figura 86 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido

DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 149
Figura 87 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 149
Figura 88 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 150
Figura 89 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 151
Figura 90 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de treino com 80% dos dados. 152
Figura 91 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de teste com 20% dos dados. 153
Figura 92 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT4 com 0% e 3% de umidade. 156
Figura 93 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0% e 5% de umidade. 157
Figura 94 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade. 158
Figura 95 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0% e 3% de umidade. 159
Figura 96 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0% e 5% de umidade. 159
Figura 97 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT4 com 0% e 5%. 160
Figura 98 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 161
Figura 99 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 162
Figura 100 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 163
Figura 101 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 164
Figura 102 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido

DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 165
Figura 103 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 166
Figura 104 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade. 167
Figura 105 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de treino com 80% dos dados. 167
Figura 106 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de teste com 20% dos dados. 169
Figura 107 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT4 com 0% e DOT4 LV com 5% de umidade. 171
Figura 108 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0% e DOT4LV com 5% de umidade. 172
Figura 109 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT4 com 0% e DOT4LV com 5% de umidade. 173
Figura 110 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade. 174
Figura 111 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade. . 175
Figura 112 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade. 176
Figura 113 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade. 177
Figura 114 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade. 178
Figura 115 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade. 178
Figura 116 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade..... 179
Figura 117 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade..... 180
Figura 118 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA

no Fluído para DOT4 0%, DOT4 3% e DOT4LV 5% de umidade – Matriz de treino com 80% dos dados. 181
Figura 119 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 0%, DOT4 3% e DOT4LV com 5% de umidade – Matriz de teste com 20%. 182
Figura 120 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT5.1 com 0% e 3% de umidade. 184
Figura 121 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0% e 3% de umidade. 186
Figura 122 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT5.1 com 0% e 5% de umidade. 187
Figura 123 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0% e 5% de umidade. 188
Figura 124 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT5.1 com 0% e 5%. 189
Figura 125 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 190
Figura 126 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 191
Figura 127 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 192
Figura 128 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 192
Figura 129 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 193
Figura 130 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 194
Figura 131 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 195
Figura 132 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade. 195
Figura 133 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de treino com 80% dos dados. 196

Figura 134 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de teste com 20% dos dados. 197
Figura 135 – Interface gráfica de monitoramento do fluído em etapas. 202
Figura 136 – Protótipo inicial de integração com placa de circuito. 202
Figura 137 – Bancada com interações homem-máquina, além do sistema de freios. 203

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do veículo.....42
Tabela 2 – Propriedades físico-químicas (Resina fenólica) 50
Tabela 3 – Ligas de Ferro Fundido Cinzento - Composição Química Típica (% massa) 55
Tabela 4 – Experimentos para Frenagem e Medição Subsequente de Ruído e Vibração 73
Tabela 5 – Matriz de confusão média para o fluido DOT 3 após 50 interações. 154
Tabela 6 – Matriz de confusão média para o fluído de freio DOT 4 após 50 interações. 170
Tabela 7 – Matriz de confusão média para o fluído de freio DOT4 e DOT4 LV 5% após 50 interações. 183
Tabela 8 – Matriz de confusão média acumulada para o fluido DOT 5.1 após 50 interações. 198

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 26
1.1 OBJETIVO 28
1.2 CONTRIBUIÇÕES 29
1.3 ESTRUTURA DA TESE 30
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS 31
2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS E MODELAGEM DO SISTEMA DE FRENAGEM AUTOMOTIVO 31
2.1.1 Transmissão e amplificação de força (princípio de pascal) 31
2.1.2 Determinação da força de frenagem 31
2.1.3 Dissipação térmica e interface de atrito 32
2.1.4 Controle eletrônico (ABS/EBD) 32
2.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE FREIO 32
2.3 MODELAGEM DAS FORÇAS DE FRENAGEM 37
2.4 CONCEITOS TIPOLOGIAS E COMPONENTES 46
2.4.1 Pastilhas de freios e seus materiais 46
2.4.1.1 Materiais Semimetálicos 50
2.4.1.2 Materiais cerâmicos 51
2.4.1.3 Materiais orgânicos Não Asbestos (NAO) 51
2.4.1.4 Materiais de baixo conteúdo metálico 51
2.4.1.5 Materiais com estrutura de carbono 52
2.4.1.6 Materiais sinterizados 52
2.4.1.7 Conclusão da seção 53
2.4.2 Discos de freios e seus materiais 53
2.4.3 Fluídos de freios e suas características físico-químicas 60
3 VARIAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTAS DOS SISTEMAS DE FREIOS ... 66
3.1 DEFINIÇÃO DE TEMPO DE RESPOSTAS DE FRENAGEM 66
3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZADA 75
3.2.1 Tempo de Resposta dos Sistemas de Freios 75
3.2.2 Os Fatores Humanos na Frenagem de Emergência 75
3.3 TRABALHOS RELACIONADOS 79
4 MATERIAIS E MÉTODOS 82
4.1 BANCADA DE ENSAIOS DE FREIOS 82

4.1.1 Sistemas e componentes mecânicos funcionais da bancada 83
4.1.2 Sistemas e componentes elétricos e eletrônicos funcionais da bancada 93
4.1.3 Sistemas hidráulicos, pneumáticos da bancada 98
4.1.4 Sistemas e equipamentos de medição, monitoramento e aquisição de dados ... 101
4.1.5 Instalações laboratoriais e descrição geral de funcionamento 104
4.1.6 Funcionamento e lógica de programação da bancada 105
4.2 ENSAIOS QUIMICOS, LABORATORIAIS E DE BANCADA – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE FLUÍDO DE FREIOS 107
4.2.1 Processo e método - abastecimento e flushing do sistema hidráulico para ensaios 107
4.2.2 Processo e método - abastecimento do sistema hidráulico para ensaios 109
4.2.3 Processo e método – flushing do sistema hidráulico para trocas de fluídos 111
4.2.4 Ensaios na bancada de freios 114
4.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS MULTIVARIADOS 115
4.3.1 Sinais Multivariados 116
4.3.2 Representação e codificação multivariadas 118
4.3.3 Análise de Componentes Principais (PCA) 119
4.3.4 Análise de Discriminantes Lineares (LDA) 121
4.3.5 Fluxograma do tratamento dos dados 129
5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS 132
5.1 ESPECIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS ENSAIADOS 132
5.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE BANCADA 133
5.3 ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE MULTIVARIADA DOS SINAIS 138
5.4 ANÁLISE MULTIVARIADA - SINAIS COLETADOS - FLUIDOS DOT3, DOT4, DOT4 LV E DOT 5.1 139
5.4.1 Fluído DOT3 140
5.4.2 Fluído DOT4 155
5.4.3 Fluído DOT4LV 170
5.4.4 Fluído DOT5.1 184
6 CONCLUSÃO 200
REFERÊNCIAS 205
APÊNDICE A – ARQUIVOS COM OS DADOS MEDIDOS DOS FLUÍDOS. 217

APÊNDICE B – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT3 DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO. 219

APÊNDICE C – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT4 DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO. 222

APÊNDICE D – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT4LV DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO..... 225

APÊNDICE E – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT5.1 DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO. 228

ANEXO A – DOCUMENTOS DAS PATENTES DA BANCADA E DOS ALGORITMOS E PROTOCOLO..... 231

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a segurança no ecossistema da mobilidade, seja esse em ambientes urbanos ou rodoviários, tem sido abordado e discutido por diversos atores das sociedades no que tange à segurança no tráfego, redução dos impactos ambientais e a proteção à vida (*United Nations*, 2020).

A Resolução A/RES/74/299, de 31 de agosto de 2020, da Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu o período entre os anos de 2021 e 2030 como a "Década de Ações pela Segurança Viária", com o objetivo de reduzir em pelo menos 50% as mortes e feridos no trânsito até 2030 (United Nations, 2020). Um ano após o lançamento dessa resolução, a ONU declarou que "mais de 3,5 mil pessoas morrem diariamente nas vias do planeta, o que equivale a quase 1,3 milhão de mortes evitáveis e cerca de 50 milhões de pessoas lesionadas a cada ano, tornando-se a principal causa de morte de crianças e jovens em todo o mundo. Neste cenário, os acidentes de trânsito devem causar mais 13 milhões de mortes e deixar 500 milhões de pessoas lesionadas durante a próxima década, especialmente em países de baixa e média renda" (United Nations, 2021).

A importância do tema para os diversos países fez com que ele permeasse ao longo de diversos fóruns de maneira que os temas segurança veicular, incluindo a confiabilidade dos sistemas de frenagem, têm figurado como centro de discussões e pauta para a formulação de políticas públicas futuras para a segurança da mobilidade moderna, inteligente e conectada (United Nations, 2023). O Brasil, como signatário do pacto global pela segurança viária da ONU e por sua liderança estratégica no mercado regional para a indústria automotiva, tem tomado as medidas necessárias para contribuir com a melhoria da segurança e eficiência no ecossistema da mobilidade na região em consonância com as políticas estabelecidas pela ONU. Por consequência, os veículos e suas arquiteturas estão passando por profundas mudanças conceituais em suas diferentes formas de aplicação a fim de otimizar a eficiência e segurança.

Estudos científicos para a evolução dos sistemas de segurança veicular, como os sistemas de freios automotivos, que são objetos centrais de requisitos regulatórios de segurança, demandam métodos de ensaios, recursos físicos e laboratoriais para garantir a confiabilidade, comparabilidade e a reprodutibilidade dos resultados científicos. A padronização experimental é um fator importante para o desenvolvimento robusto de soluções e tecnologias de segurança que serão submetidas ao arcabouço legislatório.

Ensaios de bancada bem estruturados permitem validar modelos computacionais, identificar falhas sistêmicas e acelerar ciclos de desenvolvimento, contribuindo para a

maturidade tecnológica de sistemas avançados, assim como com a integração entre diferentes centros de pesquisa, promovendo interoperabilidade metodológica e ampliando o impacto científico dos estudos multinacionais.

As pesquisas realizadas para a avaliação dos parâmetros funcionais e de falhas disponíveis na literatura (Kao et al., 2006; Meng; Zhang; Yu, 2015; Abi et al., 2017; Sejkorová et al., 2018; Mladenov; Damyanov; Valkovski, 2021; Caban et al., 2021; Yin et al., 2021) se concentram na discretização de parâmetros funcionais dos componentes do sistema de freios para o seu monitoramento. Estes estudos não abordam os tipos, limites e efeitos da contaminação dos fluídos nos padrões funcionais como a variação de pressão e eventuais vibrações nos condutos do sistema. Por exemplo, os estudos de (Jegadeeshwaran; Sugumaran, 2015; Newase, 2021; Ma; Wang, 2023) se concentram na avaliação dos efeitos das vibrações, materiais e desgaste de componentes do sistema de freios (ou de fricção como em embreagens) através de diferentes técnicas de pesquisa e tratamento de dados para a caracterização e classificação de padrões.

Segundo (Souza, 2006), em seus primeiros estudos sobre sistemas de acionamento de embreagem por fluídos de freio DOT4 e DOT5.1, concluía-se que as características e propriedades destes fluídos tem um papel importante para o bom funcionamento do sistema de freios. A Tesla, conhecida como líder mundial em automação veicular prevê em seus manuais de proprietários que caso haja qualquer vibração ou variação do curso do pedal do freio, o proprietário deve procurar uma empresa especializada para efetuar a troca do fluido de freio (Tesla, 2024).

Nesta tese, propõe-se o desenvolvimento de um laboratório inovador com o propósito de conectar conhecimentos anteriores como aqueles desenvolvidos por (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021) ao endereçar caminhos e apresentar alternativas tecnológicas de âmbito internacional, para os futuros requisitos de organismos reguladores e entidades multilaterais como a ONU, por meio do Fórum Mundial para Harmonização de Regulamentos Veiculares através do *Working Party* (WP.29), que estabelece diretrizes técnicas que orientam a avaliação de sistemas de segurança e incentivam a adoção de procedimentos padronizados entre os países signatários do pacto global de segurança veicular. Na América do Norte, de forma complementar, o Departamento de Transportes dos Estados Unidos (USDOT) e sua agência especializada, a *National Highway Traffic Administration* (NHTSA), publicam normas e relatórios técnicos que enfatizam a necessidade de ensaios laboratoriais reprodutíveis para validar tecnologias emergentes, como sistemas de frenagem automática e detecção de pedestres.

Este trabalho de forma específica propõe, desenvolve e implementa um novo conceito

de bancada de freios para ensaios multivariados, desenvolve uma nova abordagem metodológica para avaliar a influência da contaminação química dos fluidos de freio através de algoritmos integradores que identificam a contaminação do fluído por umidade partir do processamento estatístico e da redução de dimensionalidades dos sinais obtidos, e por fim, apresenta uma proposta de integração do algoritmo na arquitetura veicular.

Por meio de métodos de ensaios padronizados na bancada concebida e construída nesta tese, correlaciona-se os padrões de comportamento em condições pré-estabelecidas para avaliar os parâmetros combinatórios e multivariados de pressão, temperatura, força, tempo de frenagem e vibrações decorrentes da instabilidade química do fluido de freio contaminado por umidade.

Com a utilização de técnicas para processamento de sinais e reconhecimento de padrões estatísticos utilizando Componentes Principais Discriminantes (PCA) e Discriminantes Lineares Principais (LDA) para a classificação de padrões multivariados por meio de *K-Nearest Neighbors* (KNN) desenvolve-se de forma inovadora uma abordagem que permitiu a identificação de componentes discriminantes representativos da resposta dinâmica integrada do sistema de freios.

Portanto, a abordagem proposta nesta tese por meio de experimentos laboratoriais, permite fazer previsões realísticas sobre o comportamento do sistema de freio e, consequentemente, da segurança do ecossistema da mobilidade em situações de frenagem de emergência. Um benefício adicional da metodologia proposta pode ser a definição de padrões para manutenção preventiva dos sistemas de freio bem como a criação de modelos discretos para sensoriamento e supervisão dos sistemas de freios automotivos.

1.1 OBJETIVO

Esta tese tem por objetivo geral investigar a influência das contaminações do fluido de freio sobre o comportamento, responsividade e segurança do sistema de freios de forma a identificar padrões principais e discriminantes do processo de frenagem.

A pesquisa se restringe a mapear as condições de funcionamento do sistema através de ensaios em bancada própria por meio do monitoramento ativo dos parâmetros funcionais do conjunto. Os parâmetros determinantes de eficiência de frenagem estudados poderão conduzir ao desenvolvimento de parametrizações inteligentes que poderão ser embarcadas nos veículos.

Os seguintes objetivos específicos podem ser elencados:

a) concepção, desenvolvimento, construção da bancada inédita para ensaios de freios e aquisição de sinais multivariados;

b) determinar a correlação e interdependência entre os diferentes padrões de frenagem com os diferentes tipos e quantidades de contaminação do fluído de freios por umidade;
c) desenvolver um algoritmo com classificações representativas para correlacionar a variância combinatória dos parâmetros em estudo para a classificação e diagnóstico dos fluídos de freios;

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Nesta pesquisa são desenvolvidos equipamentos, metodologias, experimentos e resultados inéditos, com destaque para as inovações tecnológicas e formação de recursos humanos, como se segue:

a) Depósito de Patente junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) para o modelo de utilidade inovador denominado: "***Bancada para Pesquisas e Desenvolvimento de Sistemas de Frenagem Automotivos com Funcionalidades para Pesquisas da Interação Condutor-Máquina através do Monitoramento dos Biopotenciais em Situações de Emergência Durante o Processo de Tomada de Decisão através da Variação Aleatória dos Parâmetros Funcionais do Sistema de Freios Automotivo e das Funções Neuro-Cognitivas, Saúde e de Alerta dos Seres Humanos – Processo BR10 2024 015978 0 em 05/Agosto/2024*** ";
b) Depósito de Patente Internacional no Patent Cooperation Treaty (PCT): ***"Bancada de ensaios para simulação e monitoramento de sistemas de frenagem automotiva e comportamento do condutor – Processo BR2025/050527 em 18/Novembro/2025"***;
c) Depósito de Patente junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) para o modelo de utilidade inovador denominado: "***Sistema e método para determinação do estado de contaminação de fluídos hidráulicos a partir do comportamento dinâmico de sistemas hidráulicos – Processo BR10 2026 015875 5 em 24/Junho/2026"***;
d) Criação e disponibilização de laboratório inovador e inédito para a comunidade acadêmica do Centro Universitário FEI, parceiros acadêmicos e indústria para futuras pesquisas avançadas no campo dos materiais de atrito com a finalidade de promover a redução de emissões de particulados de sistemas de freios (discos e pastilhas) automotivos.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em capítulos nos quais o tema da pesquisa é abordado através de uma ordem cronológica a fim de promover o entendimento do desafio e os passos que foram seguidos até as conclusões gerais. Isto posto, esta tese está dividida em 6 capítulos, conforme descrito abaixo:

O capítulo 2 é dedicado para a apresentação dos conceitos fundamentais sobre o sistema de freios, discorrendo sobre o seu funcionamento, seus componentes e funcionalidades bem como os aspectos físico-químicos relevantes para que o sistema apresente confiabilidade e estabilidade de funcionamento.

O capítulo 3 é dedicado para uma abordagem aos problemas e desafios inerentes aos sistemas de frenagem automotivos através do estado da arte e da literatura disponível relacionados a confiabilidade e estabilidade para os componentes e sistemas de frenagem automotivos.

No capítulo 4 são discutidos materiais e métodos sobre os seguintes assuntos: a bancada de ensaio, ensaios funcionais para a reprodução das condições operacionais e de falhas para a coleta de dados na bancada para o processamento dos sinais de rotação, torque da bancada e a análise multivariada por ferramentas computacionais utilizadas para a determinação dos padrões discriminantes e mais representativos do processo de frenagem automotivo.

O capítulo 5 trata sobre os experimentos e resultados para tópicos como os materiais escolhidos para o estudo, a determinação da taxa de amostragem do sinal do torque e outros parâmetros funcionais na bancada. Neste capítulo também são apresentados os resultados alcançados para os sinais do fluído de freio e a variação dos fatores de pressão na linha de alimentação para o conjunto do *caliper* nas condições mais severas de operação encontradas nos experimentos, com a avaliação da combinação de diversos fatores concomitantes e multivariados prevendo-se a aquisição dos dados. Fechando o capítulo faz-se uma análise sobre a previsibilidade da confiabilidade do sistema de freios através dos parâmetros estudados, propondo-se um modelo representativo do fenômeno em estudo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões com uma análise crítica dos principais fatores discutidos na tese bem como a apresentação de um *display* de interface com o usuário a ser embarcado no painel do veículo. O capítulo é encerrado através da apresentação de linhas futuras de pesquisas que poderão ser desenvolvidas a partir das inovações tecnológicas e novo conhecimento e gerados nesta tese.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais relacionados ao sistema de freios automotivos por acionamento hidráulico com foco na investigação dos seus respectivos fatores de funcionamento, bem como a influência da reologia do fluido de freio para garantir frenagens com respostas rápidas em emergências.

2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS E MODELAGEM DO SISTEMA DE FRENAGEM AUTOMOTIVO

O sistema de frenagem automotiva constitui um mecanismo de segurança ativa baseado na dissipação da energia cinética do veículo sob a forma de energia térmica, por meio do atrito entre superfícies. Seu funcionamento é descrito por fundamentos da hidráulica, da termodinâmica e da mecânica clássica.

2.1.1 Transmissão e amplificação de força (princípio de pascal)

O processo de acionamento tem início com a aplicação de uma força pelo condutor $F_{aplicada}$ sobre o pedal de freio. Essa força é inicialmente amplificada pelo mecanismo de alavanca do pedal e, em seguida, intensificada pelo servofreio. Conforme descrito por Day (2014), a pressão hidráulica P gerada no cilindro mestre é transmitida integralmente pelo fluido, em concordância com o Princípio de Pascal em que $A_{pistão}$ representa a área do pistão do cilindro mestre. Essa pressão é então propagada até os pistões das pinças de freio, onde é convertida em força de fixação (*clamping force*), responsável pela atuação do sistema de frenagem.

$$P = \frac{F_{aplicada}}{A_{pistao}} \tag{1}$$

2.1.2 Determinação da força de frenagem

A força de frenagem efetiva $F_{efetiva}$ desenvolvida em cada roda é função da pressão hidráulica do sistema, das propriedades geométricas do conjunto de freio e do coeficiente de atrito entre os materiais em contato. Conforme estabelecido na literatura de engenharia de chassis, notadamente em Reimpell et al. (2021) e Limpert (2022), a força de frenagem para sistemas a disco pode ser expressa por:

$$F_{efetiva} = \frac{2 \cdot P \cdot A_c \cdot \mu \cdot R_{eff}}{r} \quad (2)$$

Na fórmula acima:

a) P corresponde à pressão hidráulica no sistema (N/m^2);
b) A_c denota a área do pistão da pinça (m^2);
c) μ representa o coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco;
d) R_{eff} é o raio efetivo de atuação da força de frenagem (m);
e) r refere-se ao raio dinâmico do pneu (m).

2.1.3 Dissipação térmica e interface de atrito

De acordo com Day (2014), com reforço de evidências mais recentes como em Sahoo et al. (2023), a interface de contato entre pastilha e disco configura um ambiente severo, no qual o coeficiente de atrito μ apresenta dependência com a temperatura, não podendo ser considerado constante. A energia térmica gerada no processo de frenagem está associada à taxa de conversão da energia cinética do sistema. Em condições de gestão térmica inadequada, pode ocorrer o fenômeno de *fading*, caracterizado pela redução significativa da eficiência de frenagem.

2.1.4 Controle eletrônico (ABS/EBD)

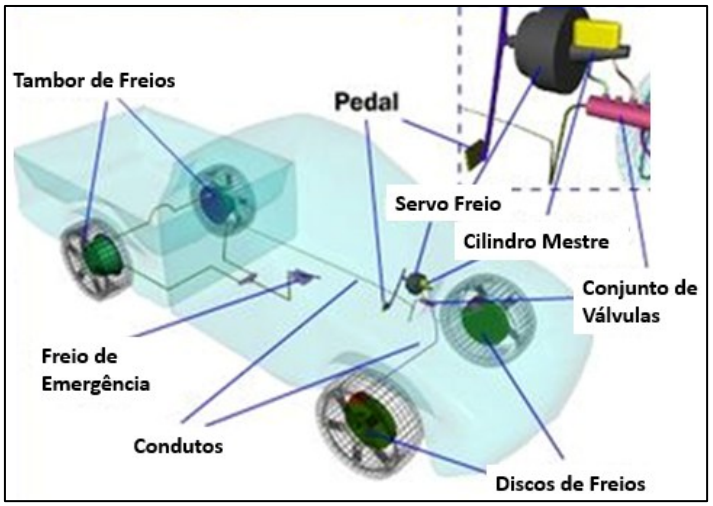
Sistemas contemporâneos de frenagem incorporam estratégias de controle baseadas em algoritmos que monitoram continuamente a velocidade angular das rodas. Conforme discutido por Haldar (2022), a atuação eletrônica ocorre por meio da modulação individual da pressão hidráulica P em cada roda, com o objetivo de manter o escorregamento do pneu dentro de faixas ótimas, assegurando a estabilidade direcional do veículo.

2.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE FREIO

O sistema de freios para veículos automotores é composto de uma série de componentes que são montados na região inferior da carroceria. Os componentes do sistema de freios estão distribuídos ao longo do assoalho, geralmente na sua parte inferior. A interface com o condutor se dá através dos pedais que ficam localizados abaixo do painel de instrumentos e da coluna de direção, onde se encontra a placa de pedais de comando do veículo como: acelerador, pedal de

freio e de embreagem. A distribuição dos principais componentes dos sistemas de freios automotivos é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Localização dos principais componentes do sistema de freios.



Fonte: Autor "adaptado de" *How Stuff Works*, 13 fev. 2024.

A resolução do governo brasileiro através do Conselho Nacional de Trânsito na resolução 915, dispõe sobre os procedimentos para avaliação dos sistemas de freios de veículos e sobre a obrigatoriedade do uso do sistema antitravamento das rodas (ABS) e/ou frenagem combinada das rodas (Conselho Nacional de Trânsito, 2022). Esta autoridade reguladora do governo federal do Brasil, dispõe no 4º artigo da resolução 915 de 28 de março de 2022 que todo veículo novo, nacional ou importado, deve atender aos requisitos mínimos de desempenho do sistema de freios estabelecidos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10966-1, NBR 10966-2, NBR 10966-3, NBR 10966-4, NBR 10966-5, NBR 10966-6, NBR 10.966-7 e NBR 16.068, ou pelas suas sucedâneas, consoante o tipo de veículo.

A norma ECE R131 da comunidade europeia define que o sistema de freios automotivos é composto pelo conjunto de peças cuja função é reduzir progressivamente a velocidade de um veículo em movimento ou pará-lo, ou mesmo mantê-lo parado (UN ECE R13, 2016)[1].

Com relação ao balanço energético de movimento do veículo, o regulamento europeu define que o sistema de freio deve gerar forças opostas ao movimento do veículo através do atrito entre os componentes do sistema. Tais componentes são descritos como componentes que apresentam movimentos relativos entre eles e que através do acionamento de um conjunto de componentes hidráulicos e mecânicos promovem a redução de energia de movimento de forma

[1] Norma ECE R13 Sistemas de Freios Veículos Categorias M, N e O, 2016.

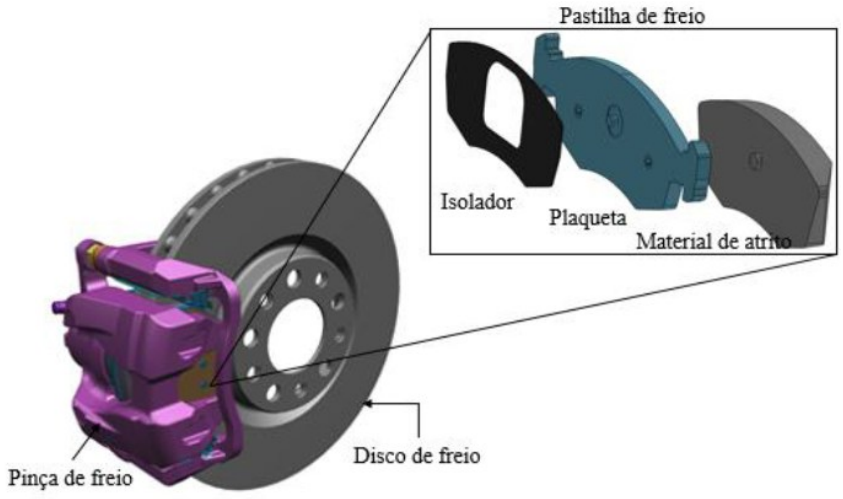
gradativa e controlada, ou até mesmo levando o veículo para a condição estática.

Os sistemas de freios modernos contam com duas tecnologias de frenagem por atrito nas rodas dos veículos: a primeira utiliza o conceito de freio a disco e a segunda de freio a tambor. As soluções, ilustradas nas Figuras 2 e 3, trazem diferentes propriedades técnicas que de uma forma geral podem se tornar complementares, conforme descrito a seguir.

Segundo (Ferreto, 2018), a grande vantagem do sistema de freio a disco é a eficiência térmica, uma vez que o disco tem uma alta resistência à fadiga térmica, podendo chegar a temperaturas de trabalho de 800 °C em veículos de passeio e comerciais. Outra vantagem nominada pelo autor é a propriedade de dissipação de calor para um ambiente uma vez que a dilatação do disco provoca o aumento da espessura do disco e com isto proporcionando maior resistência ao "fade" da pastilha no consumo volumétrico do sistema. O fenômeno do "fade" é caracterizado pela perda de funcionalidade de frenagem causado por temperaturas na superfície de contato entre pastilhas e discos de freios acima dos limites dos materiais empregados.

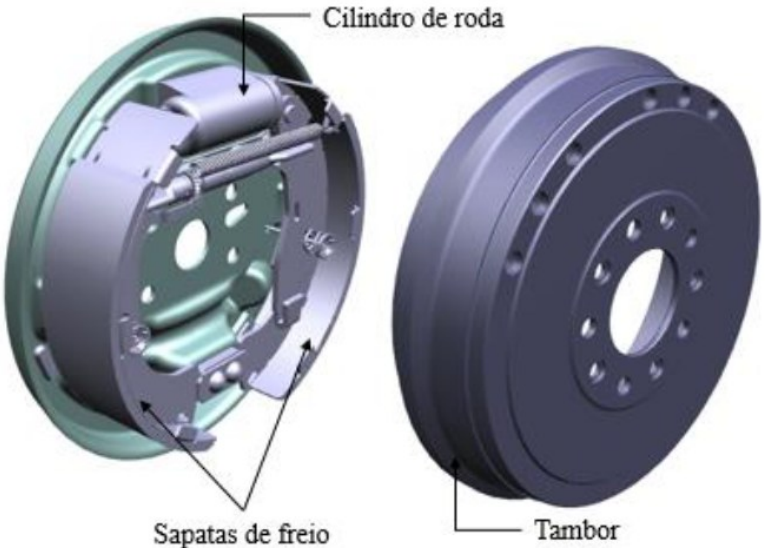
Os sistemas de frenagem a tambor são mais sensíveis à temperatura, não devendo exceder a 400 °C (Ferreto, 2018). Durante o processo de frenagem, o tambor, conforme ilustrado na Figura 3, pode ter o seu diâmetro aumentado em até 1,5 mm, o que corresponde a um acréscimo de 30 a 40% no curso do pedal de freio se comparado ao curso encontrado quando o freio está em temperatura ambiente. Soma-se a isto que a dilatação do tambor gera um contato irregular entre as lonas e o mesmo, gerando picos de pressão em áreas de contato reduzido entre as sapatas de freio e o tambor, o que pode ocasionar variação de torque e trepidação (Ferreto, 2018).

Figura 2 – Sistema de Freios a disco.



Fonte: Ferreto, 2018.

Figura 3 – Sistema de Freios a tambor.



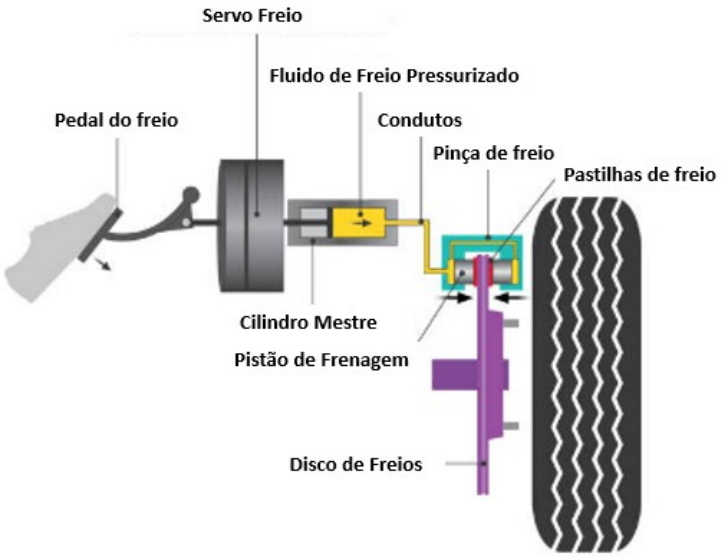
Fonte: Ferreto, 2018.

Portanto, de uma forma holística, pode-se descrever o funcionamento global dos sistemas de freios como uma série de eventos que ocorrem de forma ordenada. Em outras palavras, os comandos para o sistema são conduzidos através do pedal de freios, o qual deve fornecer a condição progressiva e graduada, livre de vibrações ou variações durante o processo de frenagem através do controle da força adicionada pelo condutor ao pedal do freio (UN ECE R13, 2016).

Para uma frenagem controlada e contínua de acordo com a pressão e força necessária aplicada entre os componentes do sistema a norma define que um fluido de freio é submetido há uma pressão na linha de distribuição do sistema de freios de forma que a energia acumulada através da pressão do fluído seja transmitida de forma rápida e uniforme, de acordo com as condições estabelecidas no projeto entre todos os pontos de apoio do veículo no solo.

A Figura 4 ilustra um sistema de freio automotivo que é constituído pelo pedal de freios, servo freio, cilindro mestre, fluído de freios, condutos, pistão de frenagem, pinça e pastilhas de freios.

Figura 4 – Sistema de Freios (Principais Componentes).



Fonte: Autor “adaptado de” Depositphotos, 13 fev. 2024.

O acionamento do sistema de frenagem dos veículos automotores é iniciado através do pedal de freios que é a interface de comando do motorista para o sistema. Ao acionar o pedal de freios, o servo freio, que tem a função de agente multiplicador da força aplicada no pedal de freios, promove a compressão do fluido que se encontra armazenado dentro do cilindro mestre, o qual também é provido de reservatório para manter tanto o cilindro quanto os condutos do fluído livres de bolhas para a boa manutenção das propriedades de incompressibilidade do fluído, a fim de proporcionar as respostas desejadas pelos comandos do motorista. O fluído é pressionado numa rede de condutos e válvula que tem a função de regular e balancear as pressões do fluido dentro da pinça de freio.

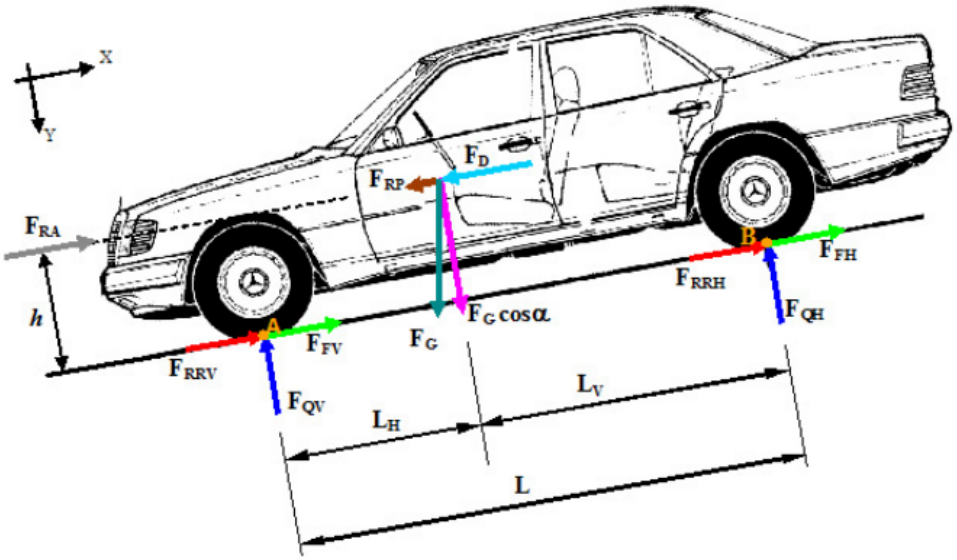
A pinça de freio, por sua vez, tem a função de prover fixação e interface entre os elementos estáticos do sistema de frenagem e os componentes rotativos do sistema. Na sua estrutura, a pinça tem uma rede de condutos e alojamentos para a instalação dos pistões de frenagem, os quais têm a função de transferir a pressão exercida pelo fluído para o conjunto de pastilhas de freio, que por sua vez tem a função de comprimir o disco de freio através de materiais de fricção, os quais geram energia de frenagem através do atrito contra a superfície dos discos de freios.

Para a delimitação do escopo desta tese, o estudo se concentrará na condição de maior criticidade para o regime de energético para o sistema, em que as temperaturas segundo (Ferreto, 2018) podem chegar a 800 °C. Portanto, o ambiente e os componentes do sistema de frenagem por atrito entre disco e pastilha de freios serão os objetos centrais nesta pesquisa.

2.3 MODELAGEM DAS FORÇAS DE FRENAGEM

Segundo modelagem para estudos de fluxo de calor através da computação e processamentos de dados em software Computer Fluid Dynamics (CFD) desenvolvidos por (Belhocine et al., 2017), as forças de frenagem e consequentemente a energia rejeitada a partir do atrito das pastilhas de freios contra a superfície dos discos é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 – Definição das forças atuantes em um automóvel durante frenagem.



Fonte: Belhocine et al., 2017.

A partir dela, pode-se desenvolver um modelo de equilíbrio de forças de frenagem para um veículo na condição de descida de rampa. Este modelo foi desenvolvido por (Belhocine et al., 2017) para o estudo do balanço de forças e energia atuantes no sistema veicular conforme a seguir:

$$\sum F_X = 0 \Rightarrow F_{RRV} + F_{FV} + F_{RRH} + F_{FH} + F_{RA} - (F_{RP} + F_D) = 0 \quad (3)$$

$$F_{FV} + F_{FH} = F_{RP} + F_D - F_{RRV} - F_{RA} - F_{RRH} \quad (4)$$

$$F_F = F_{RP} - F_{RF} - F_{RR} - F_{RA} \quad (5)$$

Em que:

a) F_{RA} é a força de resistência aerodinâmica;

b) F_{RRV} é a força de resistência a rolagem dianteira (N);
c) F_{FV} é a força de frenagem dianteira (N);
d) F_{RP} é a força de rampa no eixo X (N);
e) F_D é a força dinâmica do veículo (N);
f) F_{RRH} é a força de resistência à rolagem traseira (N);
g) F_{FH} é a força de frenagem traseira (N).

Onde:

$$F_F = F_{FV} + F_{FH} \tag{6}$$

$$F_{RR} = F_{RRV} + F_{RRH} \tag{7}$$

Em que:
a) F_F é a força de frenagem global (N);
b) F_{RR} é a força de resistência a rolagem global (N).

Para as forças verticais, eixo Y na Figura 5, (Belhocine et al., 2017) continuam o desenvolvimento do raciocínio matemático para o balanço das forças, como demonstrado abaixo.

$$\sum F_Y = 0 \Rightarrow F_G \cdot \cos\alpha - \left(F_{QV} + F_{QH}\right) = 0 \tag{8}$$

$$F_{QH} = F_G \cdot \cos\alpha - F_{QV} = 0 \tag{9}$$

$$\sum M_B = 0 \Rightarrow F_{QV} \cdot L + F_{RA} \cdot h - h \cdot (F_{RF} + F_{RP}) - h \cdot F_G \cdot \sin\alpha \tag{10}$$

$$F_{QV} = \frac{[(F_{RF} + F_{RP}) \cdot h + F_G \cdot L_H - F_{RA} \cdot h]}{L} \tag{11}$$

Em que:
a) F_G é a força peso (N);
b) F_{QV} é a força normal de reação dianteira (N);

c) F_{QH} é a força normal de reação traseira (N);
d) M_B é o momento nos apoios traseiros (Nm);
e) L é a distância entre eixos (m).

A partir do centro de gravidade do veículo:
a) L_H é a distância entre vetor reação da força peso em Y e o ponto A;
b) L_V é a distância entre vetor reação da força peso em Y e o ponto B.

A força de resistência a rolagem nos pneus automotivos, depende diretamente do coeficiente de atrito com o solo e da pressão de calibragem dos pneus. No desenvolvimento do modelo (Belhocine et al., 2017) menciona que o coeficiente de resistência para pneus calibrados com altas pressões pode-se utilizar um coeficiente de 1,5% no cálculo da força de resistência a rolagem (F_R) segundo a equação (10) e o coeficiente de força aerodinâmica é dado por (11):

$$F_{RP} = F_G \cdot F_R \cdot \sin\alpha \tag{12}$$

$$F_{RA} = C_X \cdot A_F \cdot {v_r}^2 \cdot \frac{\rho_a}{2} \tag{13}$$

Em que:
a) C_X é o coeficiente de forma do veículo;
b) A_F é a área frontal do veículo (m^2);
c) F_R é o coeficiente de resistência a rolagem;
d) ρ_a é a densidade do ar (kg/m^3);
e) v_r é a velocidade relativa entre o veículo e o ar (m/s).

Portanto, segundo (Belhocine et al., 2017), a potência total de frenagem de um veículo pode ser definida pelas equações no domínio do perfil de velocidades (**υ**), massa (m) e aceleração (a) abaixo:

$$P_R = \sum F_R \cdot v = (F_{RR} + F_{RP} + F_{RA}) \cdot v = 0 \tag{14}$$

$$P_F = \sum F_F \cdot v = (F_{FV} + F_{FH}) \cdot v = 0 \tag{15}$$

$$(F_{FV} + F_{FH}) = F_{FH} = m \cdot a \tag{16}$$

$$P_{TOT} = P_F = m \cdot a \cdot v \tag{17}$$

Em que:

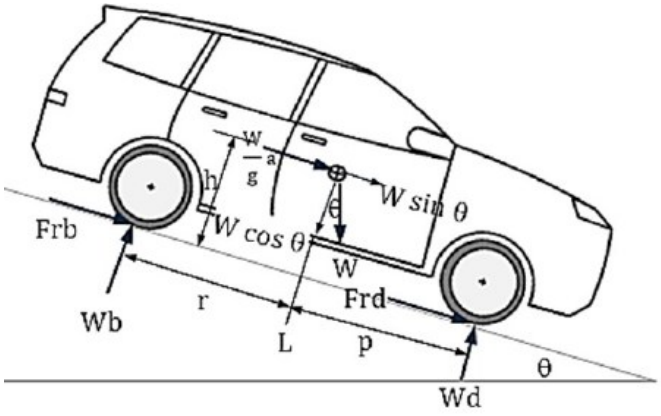
a) P_{TOT} é a potência total de frenagem (W);
b) P_F é a potência de frenagem (W);
c) m é a massa do veículo (kg).

A definição matemática dada por (Belhocine et al., 2017) para a distribuição de forças de frenagem em um veículo é corroborada pelos estudos de (Siregar et al., 2020) que por sua vez analisa a influência da distribuição da frenagem nas rodas do veículo com diferentes fatores de carga e velocidades no estudo de causas raízes para os acidentes no seu estudo de caso.

Segundo este mesmo autor, em seus estudos, 27,2% dos acidentes que tiveram identificados falhas no sistema de frenagem apresentaram problemas de baixo nível de fluído de freio no sistema, outros 22,5% dos acidentes foram causados por temperaturas excessivas no conjunto do sistema de freio e finalmente 13,4% foram classificados como outras causas raízes não identificadas.

Para suas simulações, (Siregar et al., 2020) utilizam o mesmo modelo matemático da Figura 5 (Belhocine et al., 2017) para o cálculo da potência de frenagem conforme ilustrado na Figura 6, em que além da força peso (W) na rampa inclinada, o autor adiciona o fator tempo e a área de contato entre pastilha e disco para o cálculo do fluxo de calor do sistema.

Figura 6 – Distribuição das forças de frenagem em rampa.



Fonte: Siregar et al., 2020.

Portanto, segundo (Siregar et al., 2020), a potência de frenagem por unidade de tempo pode ser calculada através da seguinte equação:

$$P_b = \frac{EK}{\tau} \tag{18}$$

$$Q = \frac{P_b}{A} \tag{19}$$

Em que:

a) P_B é a potência de frenagem do veículo (W);
b) EK é a energia cinética do veículo (J);
c) τ é o tempo de frenagem (s);
d) Q é o fluxo de calor – atrito entre pastilhas e disco de freios (W);
e) A é área de contato – pastilha e disco (m^2).

Para simulações dinâmicas do fluxo de calor gerado por atrito entre disco e pastilhas de freio durante o processo de frenagem a partir de diferentes velocidades, (Siregar et al., 2020) utilizou-se do cenário de plena carga de um veículo com 5 passageiros e um motorista, através da adição de cargas, conforme ilustrado na Figura 7 e na tabela 1:

Figura 7 – Sequência de carga adicionada através de passageiros.



Fonte: Siregar et al., 2020.

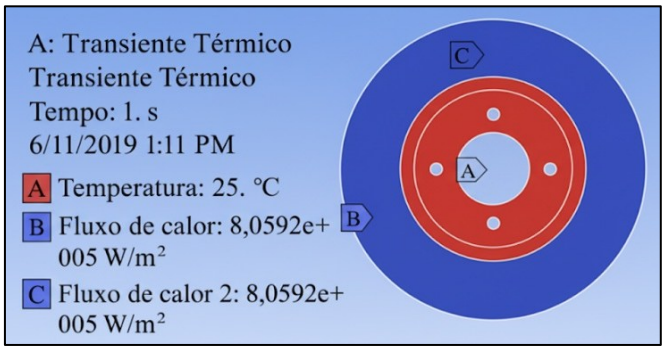
Tabela 1 – Parâmetros do veículo.

No.	Item	Valor	Unid.
A	**Geometria do veículo**		
1	Peso líquido do veículo	1130	kg
2	Distância entre eixos (p + r)	2655	mm
3	Distância entre rodas dianteiras tf	1425	mm
4	Distância entre rodas traseiras tr	1435	mm
5	Diâmetro da roda	0,62	m
6	Taxa de energia cinética absorvida pelo freio	80%	-
7	Coeficiente de atrito entre pneus e solo seco	μ 0,7	-
B	**Peso de passageiros adicionados ao veículo**		
1	Motorista (+84 kg) 19%	1218	kg
2	Segundo passageiro (+83 kg) 38%	1301	kg
3	Terceiro passageiro (+82 kg) 56%	1383	kg
4	Quarto passageiro (+74 kg) 73%	1457	kg
5	Quinto passageiro (+56 kg) 86%	1513	kg
6	Sexto passageiro (+64 kg) 100%	1577	kg

Fonte: Autor “adaptado de” Siregar et al., 2020, p. 4.

Dadas as condições de contorno ilustradas na Figura 7 e definidas na Tabela 1, (Siregar et al., 2020) realizaram as simulações para o modelamento do fluxo térmico transiente com as cargas totais (veículo + passageiros) até 1577 kg em que se obteve a potência de frenagem máxima de 44110 W com a área total de frenagem de 0,05472 m² e a velocidade máxima simulada de 140 km/h. Nessas condições o fluxo de calor que é gerado entre as pastilhas de freio e a superfície do disco é de 805921 W/m² em cada lado do disco de freios, conforme ilustrado na Figura 8. Nela, a parte central da roda (A) se encontra em temperatura ambiente, sendo que os pontos de tomada de dados de temperatura (B) e (C) demonstram o fluxo de calor de 805921 W/m² na superfície de atrito com a pastilha de freios para a condição de máxima carga (massa total do veículo carregado de 1577kg para 6 passageiros) sendo esta, considerada a condição de extrema carga no caso em estudo (Siregar et al., 2020).

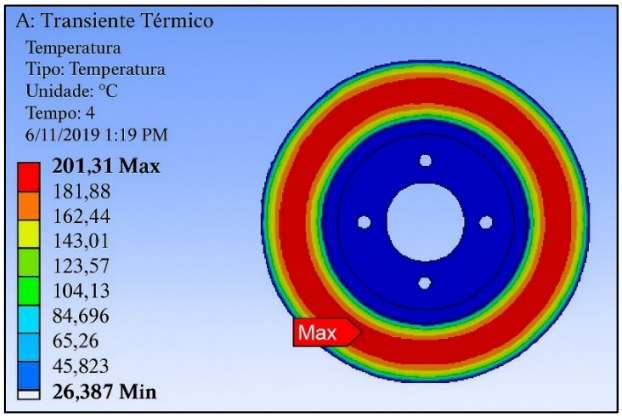
Figura 8 – Fluxo de calor e temperatura no disco de freios.



Fonte: Autor “adaptado de” Siregar et al., 2020, p. 5.

A Figura 9 ilustra os resultados obtidos por (Siregar et al., 2020) com relação às temperaturas máximas atingidas em diferentes regiões de contato entre o disco e a pastilha bem como o comportamento e distribuição do fluxo de calor através da superfície do disco de freio durante o processo de frenagem.

Figura 9 – Simulações de temperatura no disco de freios.



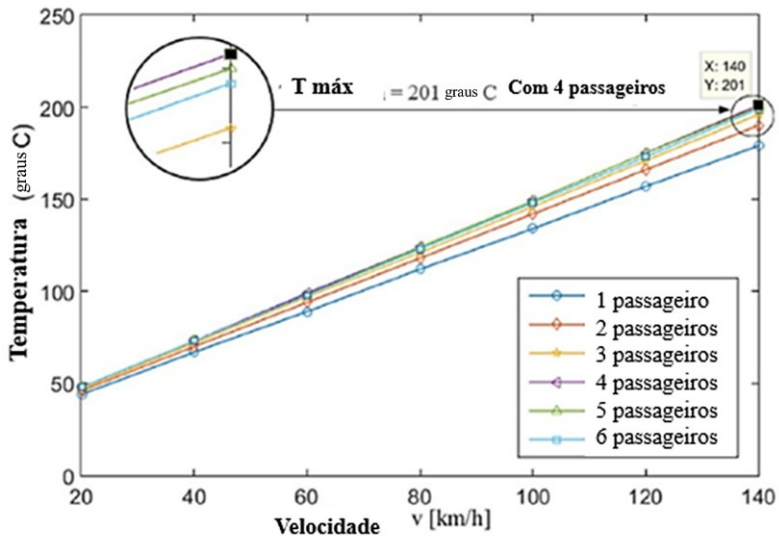
Fonte: Autor “adaptado de” Siregar et al., 2020, p. 5.

Segundo os autores, a temperatura máxima obtida de 201,31°C nas simulações ocorre na região central da pista de contato entre a pastilha e o disco de freio (região identificada como “Max” na Figura 9). As coordenadas do centro de gravidade do veículo, distâncias “L_h“ e “L_v” na Figura 5 e “p” e “r” na Figura 6, em relação aos eixos dianteiro e traseiro do veículo, juntamente com o ângulo de rampa, têm influência direta na distribuição das cargas de frenagem, sendo que de acordo com a afirmação de (Siregar et al., 2020), a aplicação da carga de frenagem nos pontos de apoio dos eixos dianteiro e traseiro são distribuídos de forma uniforme e igualitária entre os pontos de interface com o solo nos respectivos eixos. Essa

afirmação, pode ser revisitada em pesquisas específicas através do estudo da distribuição das massas dos componentes e sistemas na arquitetura do veículo em condições dinâmicas, especialmente em frenagens de emergência em curvas com aclives e declives. Contudo, para efeitos de simplificação, pode-se assumir esta afirmação como verdadeira para o caso em estudo por (Siregar et al., 2020).

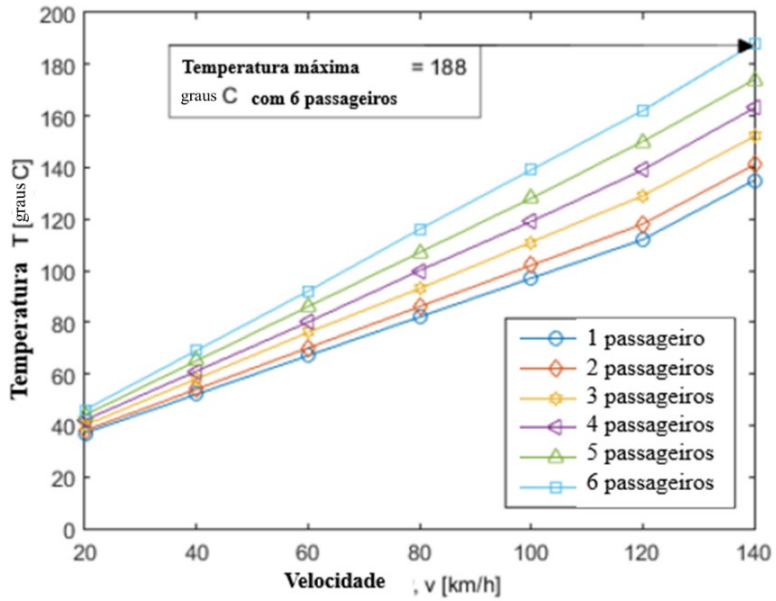
Os autores continuam o desenvolvimento de suas pesquisas ao apresentarem as Figuras 10 e 11, as quais descrevem graficamente os perfis de velocidade e temperatura para as frenagens a partir de diferentes velocidades iniciais com diferentes fatores de carga para os eixos dianteiro e traseiro para as simulações da geração de calor durante o trabalho de frenagem do veículo.

Figura 10 – Temperatura de frenagem em movimento direto-eixo dianteiro.



Fonte: Autor “adaptado de” Siregar et al., 2020, p. 6.

Figura 11 – Temperatura de frenagem em movimento direto-eixo traseiro.



Fonte: Autor “adaptado de” Siregar et al., 2020, p. 6.

Em suas conclusões os autores mencionaram que há uma nítida relação entre o incremento da temperatura proporcionalmente ao aumento de carga no veículo. A temperatura mais alta obtida na simulação ocorreu nos sistemas de frenagem do eixo dianteiro (pastilhas e discos de freio), onde as temperaturas atingiram um pico de 201 °C. Por outro lado, as temperaturas no conjunto de frenagem traseiro atingiram o pico de 188 °C.

Um dos motivos das maiores temperaturas no conjunto pastilhas e discos de freio terem ocorridos no eixo dianteiro, é explicado pela decomposição das forças na rampa, ilustrada nas Figuras 5 e 6. As cargas podem apresentar maior intensidade no eixo dianteiro em função das reações as forças de desaceleração e pela maior concentração de componentes do sistema de tração (motor caixa de câmbio e sistemas de direção) na região frontal do veículo.

Os atores finalizam suas conclusões mencionando que alguns materiais utilizados no sistema de frenagem como, por exemplo, elastômeros para a vedação dos sistemas mecânicos contra intrusão de contaminantes como o etileno-propileno-dieno, mais conhecido no mercado como EPDM, e os elastômeros do tipo estireno butadieno (SBR), suportam temperaturas de trabalho de 121 °C e 104 °C, respectivamente, o que pode culminar em falhas de vedação do sistema de acionamento das pastilhas de freio por contaminação do fluído de freios. Esta limitação será abarcada no estudo desta tese através das etapas de desenvolvimento experimental na bancada inovadora e inédita para pesquisas e desenvolvimento de sistemas de freio.

2.4 CONCEITOS TIPOLOGIAS E COMPONENTES

Conforme descrito na seção anterior, o sistema de freios automotivos tem a redução de velocidade do veículo de maneira uniforme e controlada como principal função na arquitetura veicular. Em estudos recentes, (Jahan et al., 2022) e seu time de pesquisadores mencionam que as peças críticas para o mecanismo de frenagem automotivo são as pastilhas de freios, os discos e as pastilhas e as lonas de freio. Em situações de frenagem de emergência, que ocorrem em situações iminentes de colisões, a fim de preservar a integridade física tanto dos ocupantes do veículo automotor quanto dos passageiros dos outros veículos, pedestres, ciclistas, motociclistas, a função de redução de velocidade é vital para a segurança da mobilidade.

2.4.1 Pastilhas de freios e seus materiais

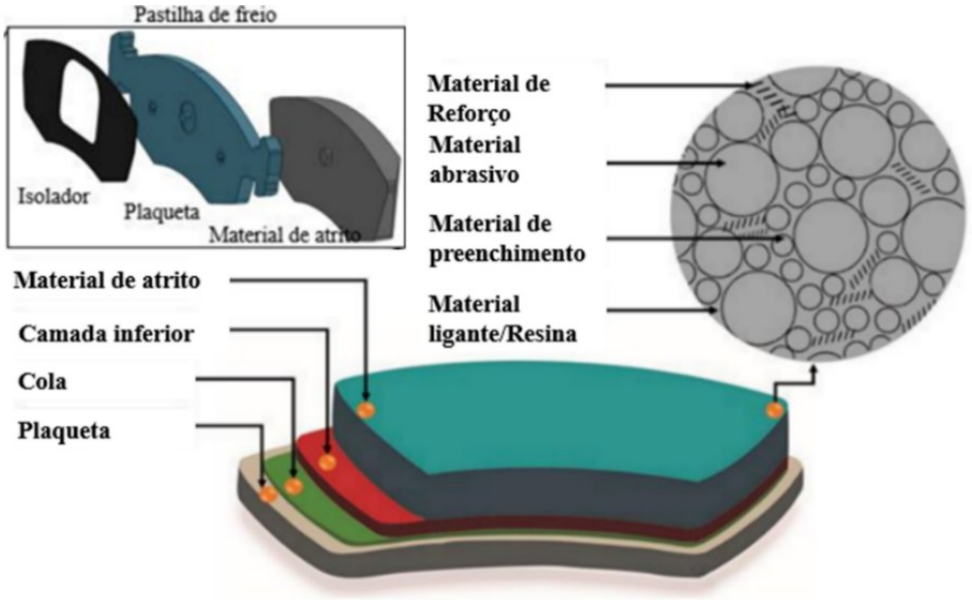
O sistema de freio, através da dissipação de energia cinética do veículo em forma de atrito e calor entre pastilhas e discos de freios ou entre tambor e lonas de freios, é utilizado para controlar a velocidade e as acelerações dos automóveis desde o princípio da história da mobilidade através de veículos autopropulsados (Mulani et al., 2022).

O mecanismo utilizado para o controle da energia de movimento do veículo é realizado pelo conjunto de discos e pastilhas de freios, em que os discos de freios que são montados de forma solidária ao cubo da roda sofrem em sua superfície a pressão do material de contato com a pastilha, e através do atrito e calor gerado promove a redução de energia de movimento do veículo, gerando consequentemente calor e desgaste nos componentes do sistema.

As pastilhas de freios têm função vital para a aplicação da força contra a superfície do disco de freio. Esta força é imprimida no sistema através dos comandos do motorista, sendo que o principal vetor de transmissão dos comandos é realizado pelo fluido de freio que imprime a pressão contra o cilindro de acionamento das pastilhas, o qual fica embutido na pinça de freio.

Para melhor exemplificar o objeto de discussão desta seção, pode-se utilizar o detalhe da Figura 2, onde se demonstra os componentes da pastilha de freios, conforme Figura 12. Conforme mostrado nessa figura, o isolador tem a função de reduzir os ruídos e vibrações para o conjunto da pinça de freio, a plaqueta (Ferreto, 2018) tem a função de servir como componente de interface entre o material de atrito e a pinça de freios.

Figura 12 – Estrutura da Pastilha de freios (detalhe da Figura 2).



Fonte: Irawan et al., 2022.

A plaqueta em geral é compreendida de aços especiais dimensionados para suportar as temperaturas de trabalho do sistema de forma a garantir resistência contra trincas ou deformações. O material de atrito tem a função de promover o contato contra a superfície do disco de freio gerando o atrito necessário para a redução da energia cinética do veículo de acordo com os comandos do motorista.

As definições de (Ferreto, 2018) para as funções de propriedades e materiais utilizados nas pastilhas de freio foram corroboradas em estudos posteriores como o de (Irawan et al., 2022) que reforça o conceito de que a fixação do material de fricção às demais camadas é realizada por meio da camada inferior, sendo esta, posicionada entre o material de fricção e a placa traseira. Segundo o autor, a função primordial da camada inferior reside na mitigação das vibrações geradas pelo contato do material de fricção com o disco de freio. A placa traseira, por sua vez, confere a rigidez estrutural necessária às pastilhas de freio viabilizando assim o seu movimento guiado nas pinças de freio. Para minimizar a emissão de ruídos indesejados durante a frenagem, o autor informa que a indústria frequentemente emprega calços de interferência (ou *shims*) específicos.

O material de fricção, por sua vez, em contato direto com o disco durante o processo de frenagem, constitui a camada fundamental das pastilhas de freio para que o processo de frenagem através do atrito superficial ocorra de forma uniforme e com a rapidez e segurança necessários para a frenagem do veículo.

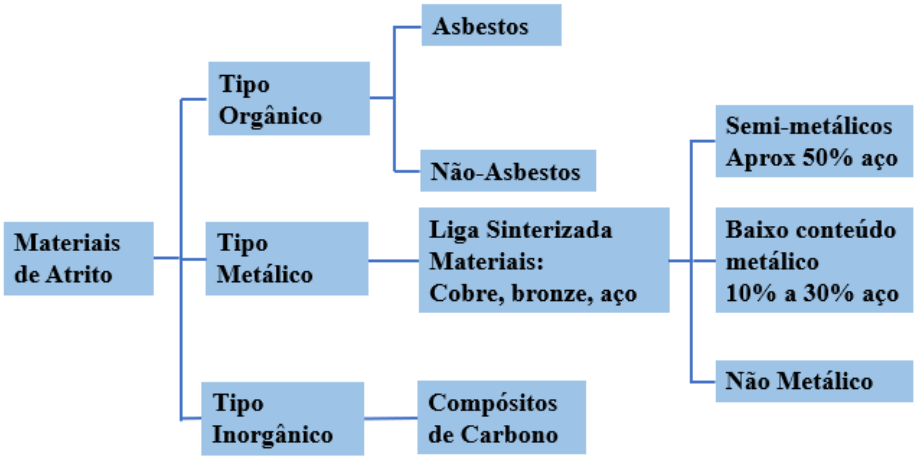
Os materiais a serem utilizados na composição do material de atrito, são objetos de frequentes estudos tribológicos para o atendimento dos requisitos legais dos sistemas de frenagem (UN ECE R13, 2016). Os recentes requisitos de meio ambiente impostos pela comunidade europeia através da regulação técnica global número 24, com o objetivo de redução de emissões de partículas com tamanhos de 2,5 e 10 mícrons para os sistemas de frenagem automotivos (UNECE, 2023) impõe um novo desafio para os sistemas de frenagem.

Segundo (UNECE, 2023) os esforços mundiais para a redução das emissões de particulados nos veículos automotores promoveu avanço tecnológico no conjunto do trem de força automotivo, de tal forma que as emissões de particulados não advindos do trem de força representavam 40% das emissões totais dos particulados automotivos nos anos 2000. Como resultado de políticas restringentes de emissões para particulados advindos do sistema de trem de força, nos últimos 20 anos, segundo (UNECE, 2023), as emissões de poluentes particulados advindos dos sistemas de freio, pneus e da recirculação de poeira causada pelas correntes de ar geradas pelos veículos, passaram a representar 80% das emissões de particulados automotivos nos dias de hoje. Com este cenário, autores como (Mulani et al., 2022) se debruçaram sobre os desafios colocados pelas autoridades para o desenvolvimento tecnológico do conjunto pastilha de freio de disco, através de revisitas aos processos de fabricações, tecnologia de materiais e estudos tribológicos para o sistema. A formulação do material de atrito para as pastilhas de freio, segundo (Mulani et al., 2022), é constituída das seguintes 6 macros classificações, em que são utilizados diferentes materiais para a composição final, e são ilustradas de forma gráfica na Figura 13:

a) materiais semimetálicos;
b) materiais cerâmicos;
c) materiais orgânicos Não Asbestos (NAO).
d) materiais com baixo conteúdo metálico;
e) materiais com estruturas de carbono;
f) materiais sinterizados.

Em seus estudos, (Irawan et al., 2022) abordam diferentes alternativas para a produção de pastilhas de freio com boa estabilidade química e alta resistência à temperatura. Os autores mencionam que o elemento ligante (resina fenólica) tem um papel crucial para a manutenção das propriedades tribológicas na região de contato entre o material de atrito da pastilha de freio e a superfície de contato contra o disco de freio.

Figura 13 – Classificação dos materiais de atrito (Pastilhas de freio).



Fonte: Autor “adaptado de” Mulani et al., 2022, p. 6.

Para isto os autores estudaram diferentes fontes para a produção de reforços para a resina fenólica na composição estrutural do material de atrito das pastilhas a partir de diferentes compostos orgânicos para reforçar as propriedades típicas da resina fenólica, conforme Tabela 2 em situações de frenagem de emergência, em que a manutenção de boas propriedades de resistência estrutural e a temperatura são vitais. Alguns reforços ambientalmente sustentáveis foram estudados por (Irawan et al., 2022), tais como:

a) pó de casca de coco;
b) fibras da casca do coco;
c) fibras de bambu;
d) fibras da semente de Palma.

Uma atenção especial foi dada para a possibilidade de aplicação dos reforços em combinação com o principal componente ligante “resina fenólica” que é utilizada como agente para a união química e aglomerante para os componentes do material de atrito. A resina fenólica pertence à família dos materiais poliméricos e pode ser conformada para a aplicação em pastilhas de freio automotivas através de processos térmicos, suas propriedades foram descritas por (Irawan et al., 2022) conforme descrito na Tabela 2.

A resina fenólica é formada pela reação de condensação entre o fenol e o formaldeído, que resulta em um material com propriedades físico-químicas estáveis que o habilitam para a utilização em sistemas de frenagem expostos a temperaturas de trabalho que podem exceder a 300°C.

Portanto, para o desenvolvimento de pastilhas de freios ecologicamente mais

sustentáveis, (Irawan et al., 2022) estudaram diferentes fontes para a produção de reforços para a resina fenólica na composição estrutural dos materiais de atrito. Os materiais utilizados como componentes estruturais para promover o atrito entre pastilhas e discos de freio, conforme agrupados na Figura 13, podem ser assim descritos.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas (Resina fenólica).

Propriedade	**Valor**
Gravidade Específica	1,12 – 1,16
Ponto de Fulgor (°C)	72,5
Ponto de Ebulição (°C)	181,8
Ponto de Fusão (°C)	100 – 115
Alongamento na Ruptura (%)	2
Densidade (g/cm³)	1,2 – 1,4
Massa Volumétrica Solta (g/dm³)	350 – 550
Massa Volumétrica Compactada (g/dm³)	600 – 800
Solubilidade	Acetona, Álcool Etílico, Acetato de Etila
pH	7 – 8,5
Resistência à Tração (MPa)	34,5 – 62,1
Módulo de Elasticidade (GPa)	2,76 – 4,8
Temperatura de Decomposição Térmica (ºC)	300 (início)
Perda Total de Peso (%) durante a Decomposição Térmica (temperatura ambiente a 800 °C)	55,2

Fonte: Irawan et al., 2022.

2.4.1.1 Materiais Semimetálicos

Os materiais semimetálicos foram introduzidos em substituição aos asbestos e são compostos de fibras de aço e outros materiais ferrosos que constituem aproximadamente de 30 a 35% do peso do material semimetálico. O conteúdo de material semimetálicos pode até ser superior a quantidade de 50% em peso nos casos da utilização de resinas no material (Mulani et al., 2022). Fibra de lã de aço combinada com pô de ferro são, segundo os autores mencionados, amplamente utilizados nas composições dos materiais semimetálicos atuais, sendo que estes materiais, diferente dos compósitos convencionais de mercado, tem

características anisotrópicas extremamente heterogênea e com muitos componentes. Cada componente químico adicionado ao material de atrito para melhorar diferentes características do produto final, Elementos como alumínio (Al), Silício (Si), Enxofre (S), Magnésio (Mg), Potássio (K), Ferro (Fe), Titânio (Ti), Calcio (Ca), dentre outros componentes, são utilizados na composição química dos materiais semimetálicos dependendo do tipo de aplicação e de propriedades técnicas desejadas (Mulani et al., 2022).

2.4.1.2 Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos, classificados como não metálicos, bem como as suas formulações em associação com diferentes materiais, podem, segundo os autores, gerar um amplo número de funções para os sistemas de frenagem. Associação de materiais cerâmicos com o cobre no processo de adição de materiais de atrito não asbestos pode conferir propriedades funcionais com alta durabilidade e resistência a temperaturas de trabalho acima de 1000 °C, conferindo excelente propriedade funcional em altas temperaturas (Mulani et al., 2022). Os novos requisitos estabelecidos para as emissões de particulados nos sistemas de freio (Unece, 2023) se configuram segundo os autores, num grande desafio para a indústria do segmento, para atender as legislações futuras de emissões de particulados impostas aos fabricantes.

2.4.1.3 Materiais orgânicos Não Asbestos (NAO)

Os materiais orgânicos não asbestos compreendem uma mistura de 50% de material metálico misturado com resina fenólica, poeira aumentadora de atrito, grafita e outros materiais. A combinação desses elementos, além de reduzir as emissões de particulados, se comparados aos materiais com asbestos, produz excelente coeficiente de atrito, resistência à abrasão e propriedades anti-trincas no material. Materiais ligantes são utilizados para manter a compactação entre os componentes orgânicos e não orgânicos e a fibra que é utilizada como material base para manter a resistência do composto.

2.4.1.4 Materiais de baixo conteúdo metálico

Os materiais de baixo conteúdo metálico são compostos por componentes orgânicos e metálicos associados. Esses materiais acrescentam propriedades de boa performance para o

atrito e durabilidade. A formulação desses materiais pode ser definida como a ligação química da resina com compostos para melhoria de atrito que contêm mais de 50% de aço e outros elementos ferrosos na sua formulação (Mulani et al., 2022). Segundo os autores, as diferenças no coeficiente de atrito entre a formulação de materiais semimetálicos e materiais com baixo conteúdo metálico, bem como formulações com baixo conteúdo de aço, são mínimas.

Nos materiais semimetálicos, o coeficiente de atrito encontra-se em torno de 0,4, e nas outras opções mencionadas, o intervalo do coeficiente de atrito varia entre 0,35-0,38. A principal diferença está na composição do material em que por exemplo a quantidade de resina em peso na mistura pode ser acrescentado de 1 a 4% para a formulação do material semimetálico (Mulani et al., 2022).

2.4.1.5 Materiais com estrutura de carbono

O processo de carbonização é caracterizado pela deposição de átomos de carbono na superfície da fibra utilizada para a formulação do material de atrito (Mulani et al., 2022). O produto carbonizado no processo de fabricação passa pelo processo de esmagamento e mistura no material de atrito para posterior moldagem de acordo com a especificação proposta. Esta solução é primariamente utilizada quando há necessidade de alta performance do produto acabado e quando os altos custos dos processos de fabricação têm menor relevância, dado o tipo de aplicação e o alto grau de importância da segurança de frenagem requerida em veículos ou aplicações onde a energia cinética armazenada no veículo, se não dissipada de forma segura e constante pode causar acidentes catastróficos com risco à morte não só dos ocupantes, mas também para comunidades inteiras. Algumas aplicações típicas: trens de alta velocidade, tanques de guerra, veículos que utilizam propulsores a jato, veículos de corrida e até mesmo aeronaves que segundo os autores, são os exemplos típicos para este caso.

2.4.1.6 Materiais sinterizados

A formulação dos materiais sinterizados é realizada através da fusão de partículas metálicas com a utilização de pressões e temperaturas para a formação das ligas. Neste processo são utilizados materiais metálicos sinterizados à base de cobre em associação com materiais metálicos sinterizados com base de ferro. A estrutura é recoberta com materiais sinterizados para gerar uma composição metálica com a presença de estruturas em forma de fibras. elementos químicos como Cobre (Cu), Ferro (Fe), Chumbo (Pb) e Estanho (Sn) são os mais

utilizados para a produção dos materiais sinterizados para pastilhas de freio (Mulani et al., 2022).

2.4.1.7 Conclusão da seção

Nesta seção, foi dada uma abordagem com o foco nos materiais e suas características para a obtenção de um coeficiente de atrito entre pastilha e discos de freio a fim de prover respostas rápidas e uniformes através da tribologia, dos materiais e processos de fabricação necessários para eficiência e durabilidade dos sistemas de freio. As pastilhas de freio fazem parte de um conjunto de componentes, conforme ilustrado na Figura 12, que juntos operam as principais funções para a manutenção da segurança veicular. Na próxima seção os discos de freio e seus materiais são também contextualizados a fim de que o sistema seja plenamente funcional de acordo com as expectativas e necessidades do condutor para uma direção segura.

2.4.2 Discos de freios e seus materiais

Os discos de freio devem atender a requisitos de boa resistência ao desgaste, estabilidade do seu coeficiente de atrito, ruído reduzido e principalmente a redução de emissões de particulados (Kiliç; Misirli, 2020). Um sistema de freio ideal deve prover a condição estável de atrito para todas as condições de operação do veículo sendo que, para atender esses requisitos, a temperatura na superfície de contato com o material de atrito das pastilhas de freio deve prover propriedades e funcionalidades de condutividade e dissipação de calor de forma estável. Para isto, os discos de freio podem ser classificados em 2 tipos:

a) discos de freios sólidos, conforme a Figura 14;
b) discos de freios ventilados, conforme a Figura 15 e 16.

Figura 14 – Discos de freio sólido.



Fonte: Garcia; Gómez; Jaramillo, 2021.

Figura 15 – Disco de freio ventilado.



Fonte: Kim et al., 2008.

Figura 16 – Discos de freios ventilados.



Fonte: Topouris et al., 2020.

Os discos de freio sólidos são indicados para veículos de menor potência, como os sub compactos para uso urbano. Já os discos de freios ventilados são indicados para veículos de maior potência que atingem maiores velocidades como aquelas atingidas em rodovias. Produzidos em ligas de ferro fundido cinzento FC250, FC170 e FCD50, conforme Tabela 3 (Kim et al., 2008), o comportamento tribológico do disco de freios é mantido através da superfície de contato e controlado pelas propriedades da camada de atrito que é formada na sua superfície (Kiliç; Misirli, 2020).

Tabela 3 – Ligas de Ferro Fundido Cinzento - Composição Química Típica (% massa).

Amostra	**Elemento**	**C**	**Si**	**Mn**	**S**	**P**	**Cr**	**Ti**	**V**	**Fe**	**Cu**	**Mg**	**Al**
FC250	Composição (%)	3,25 – 3,5	1,3 – 2,3	0,6 – 1,0	0,05 – 0,15	0,2 ↓	0,2 – 0,45	0,02 ↓	0,015 ↓	BAL	—	–	
FCD50	Composição (%)	3,0 – 4,0	2,0 – 3,0	0,2 – 0,6	0,05 ↓	0,05 ↓	–	–	–	BAL	–	0,015 ↑	–
FC170	Composição (%)	3,4 – 3,8	1,6 – 2,2	0,7 – 1,0	0,1 ↓	0,2 ↓	0,4 – 0,6	–	–	BAL	0,015 ↑	–	–

BAL = Balanço

Fonte: Kim et al., 2008.

Segundo (Kiliç; Misirli, 2020), a natureza do sistema de freio é significativamente diferenciada de outros sistemas nos quais as superfícies são submetidas a contatos entre superfícies através da submissão de altas pressões e altas temperaturas. Segundo os autores, as condições de frenagem ocorrem em aproximadamente 50% do tempo através do contato entre superfícies a seco. Nessas condições, segundo (Niemann et al., 2020), são formadas as partículas ultrafinas, de magnitude de 10 nm. As partículas ultrafinas são formadas durante os eventos de frenagem acima da temperatura crítica dos materiais especificados onde provavelmente os compostos orgânicos iniciam o processo de nucleação e decomposição, gerando gases que são condensados através do arrefecimento gerado pelo fluxo de ar entre o conjunto pastilhas e discos de freio (Niemann et al., 2020).

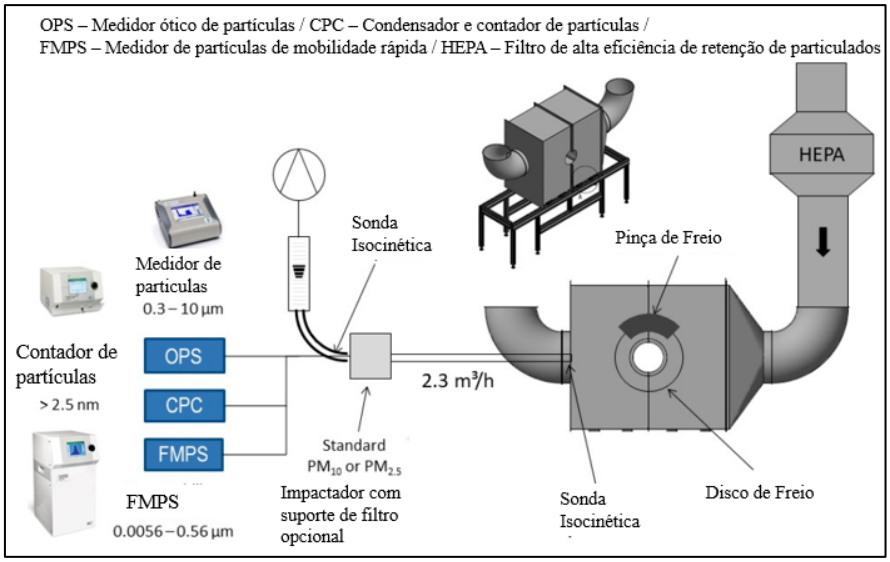
Estudos recentes, como (Niemann et al., 2020), se debruçam sobre a correlação das temperaturas de trabalho dos discos de freio com a emissão de particulados das pastilhas de freio. Estes autores, por meio de ensaios de laboratório conforme ilustrado na Figura 17, simularam diversas condições de ciclo de frenagem para estudar o comportamento tribológico dos materiais de atrito com a superfície dos discos de freios. Esse modelo de utilidade e procedimento experimental são, de uma maneira geral, definidos por (Niemann et al., 2018) como sendo uma configuração experimental fundamentalmente composta por uma câmara integrada a um dinamômetro de frenagem que circunda o conjunto de freio.

O autor menciona que o sistema é suprido com ar filtrado por um filtro HEPA (Ar Purificado por Alta Eficiência de Partículas) a um fluxo volumétrico constante de 1625 m^3/h. Esse fluxo é responsável pelo transporte das partículas de desgaste do freio, desde a fonte de emissão até a saída da câmara.

O autor ainda descreve que o sistema utiliza um impactador PM10, em conformidade com a norma EN12341, que assegura que a amostragem seletiva de partículas atenda à definição de PM10, ou seja, aquelas com diâmetro aerodinâmico de até 10 µm (50% de eficiência de corte a 10 µm), permitindo assim, que apenas tais partículas atinjam os dispositivos de medição. Na seção de saída da câmara, o sistema conta com uma sonda isocinética para a coleta de amostras representativas do aerossol formado.

O material particulado é subsequentemente analisado por meio de equipamentos dedicados como: um Classificador Ótico de Partículas (TSI OPS 3330), um Classificador Rápido de Partículas por Mobilidade (TSI FMPS 3091) e um Contador de Partículas por Condensação (TSI CPC 3776), conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Modelo de utilidade experimental para análise quantitativa de emissões de particulados.



Fonte: Autor “adaptado de” Niemann et al., 2020, p. 4.

Segundo os autores, o modelo de utilidade experimental ilustrado na Figura 17 foi desenvolvido pelo *Institute of Environmental and Energy Technology* com o propósito de viabilizar o desenvolvimento experimental para avaliação dos efeitos das temperaturas de trabalho e composição dos materiais de atrito das pastilhas nas emissões de particulados dos sistemas de freios automotivos. Os autores mencionam que se pode obter maiores detalhes construtivos do modelo de utilidade experimental em (Asbach et al., 2019) e (Niemann et al., 2018). No desenvolvimento experimental, os autores utilizaram um disco de freio de ferro fundido com uma pinça fixa e 2 tipos de materiais de atrito para as pastilhas de freio:

a) pastilhas de série ECE (*Economic Commission for Europe*) com o material (FER 8104) e composto ligante fenólico de resina;
b) pastilhas com composto ligante inorgânico baseado em silicatos, o qual apresenta estabilidade térmica até 800 °C.

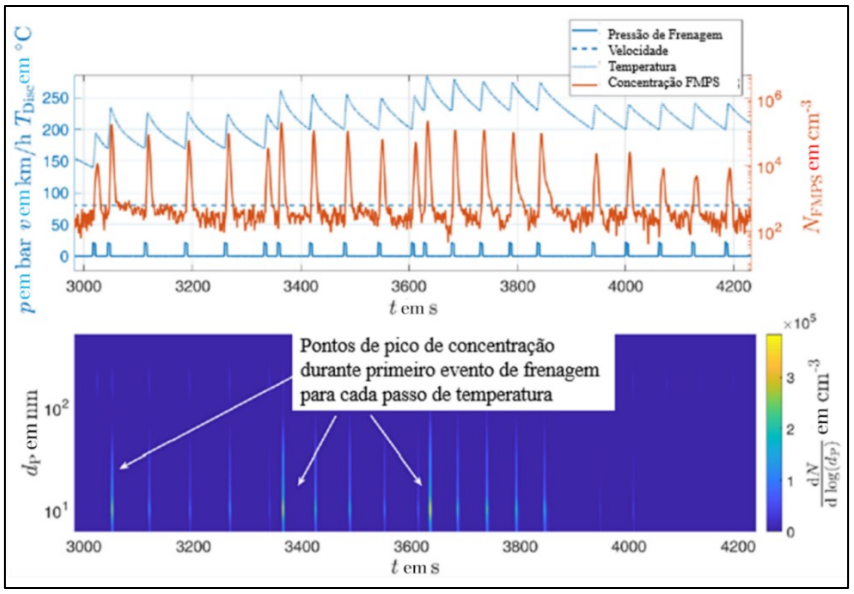
Em seus estudos para a investigação do efeito da temperatura na emissão de particulados das pastilhas de freio, (Niemann et al., 2018) realizaram ensaios para a coleta de dados em todo o intervalo de temperatura de trabalho do conjunto pastilha e discos de freio, através do modelo de utilidade ilustrado na Figura 17 anterior.

Nesse experimento foram investigadas as emissões de partículas em uma operação de frenagem com pressão de frenagem de 20 bar a partir de uma velocidade de 80 km/h com tempos de frenagem com duração de 6 segundos a fim de aumentar ou reduzir a temperatura do

disco num intervalo de temperaturas entre 75 °C e 250 °C. Para cada evento de frenagem foram tomadas 5 medições por intervalo de temperatura a fim de diminuir a variância estatística do processo de medição (Niemann et al., 2018).

A Figura 18 ilustra os resultados obtidos através dos ensaios da série temporal de pressão p, velocidade v, temperatura T, concentração N, diâmetro das partículas (dp) e distribuição de tamanho de partículas durante os três níveis ascendentes mais altos de temperatura para material de atrito com ligante orgânico testado.

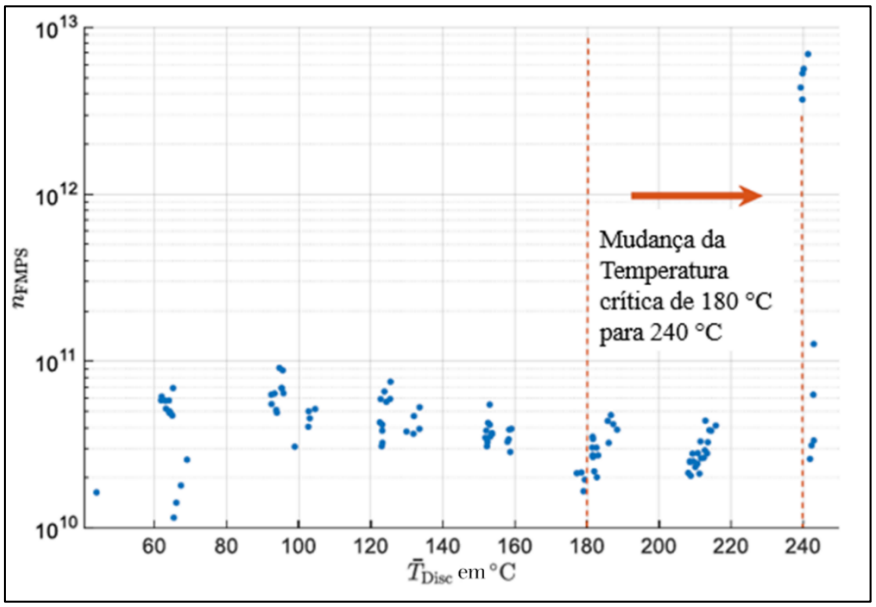
Figura 18 – Três níveis ascendentes mais altos de temperatura - ligante orgânico.



Fonte: Niemann et al., 2018.

A Figura 19 ilustra os resultados do número total de partículas “n” emitidas por evento de frenagem plotado *versus* a temperatura média do disco durante o evento de frenagem para material de pastilha com ligante inorgânico.

Figura 19 – Número total de partículas versus a temperatura média do disco - ligante inorgânico.



Fonte: Niemann et al., 2018.

Os autores, com base nos resultados dos 2 experimentos, relatam que abaixo da temperatura crítica, observa-se um incremento contínuo na concentração de partículas (de 10^{10} para 10^{11}), com o pico da distribuição centrado em 200 nm.

Em conformidade com a literatura, os resultados corroboram estudos precedentes que demonstraram uma transição no máximo da distribuição granulométrica de 200 nm para 10 nm, acompanhada por um aumento progressivo na emissão numérica de partículas a partir de 180°C. Acima deste limiar térmico, o número total de partículas emitidas por evento de frenagem não apresentou variações estatisticamente significativas, estabilizando-se em aproximadamente 10^{12} partículas por evento.

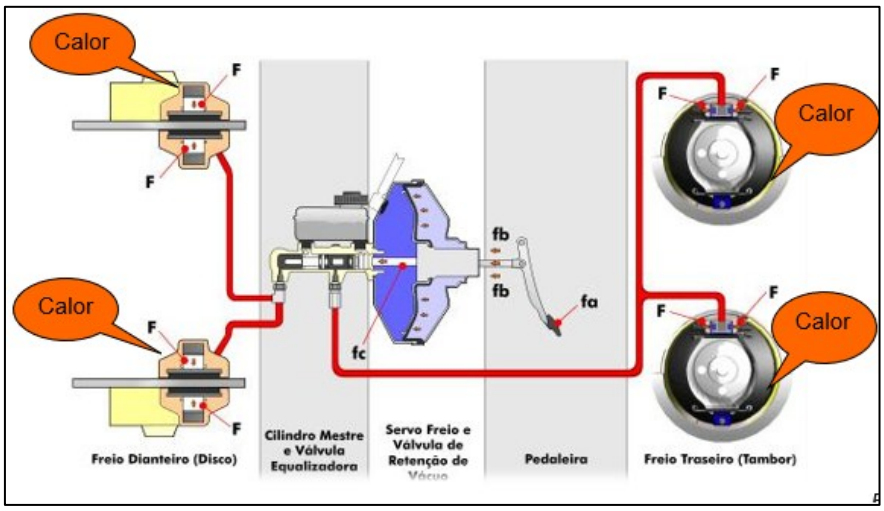
Portanto, percebe-se uma mudança na temperatura crítica para a formação de partículas ultrafinas (Figura 19) baseadas na nucleação, ou seja, o desprendimento de partículas advindas do composto ligante, que é era de 180 °C para pastilhas que utilizam composto ligante orgânico passaram a ser de aproximadamente 240 °C para pastilhas que utilizam compostos ligantes inorgânicos (Niemann et al., 2020).

As temperaturas de trabalho para o conjunto de discos e pastilhas de freio nos sistemas de freios automotivos encontradas por (Niemann et al., 2018; Kiliç; Misirli, 2020; Siregar et al., 2020; Topouris et al., 2020; Woo et al., 2022) indicam que as temperaturas de trabalho na região do contato entre a pastilha e o disco de freio podem gerar temperaturas de trabalho na faixa de mudança critica ilustrada na Figura 19, sendo estas temperaturas são irradiadas para a

região de acionamento do sistema, através do êmbolo localizado na pinça de freio (Figura 4), o qual exerce a pressão na plaqueta da pastilha para gerar a força de frenagem.

A função de transmissão dos comandos do sistema de acionamento dos freios automotivos é exercida pelo fluído de freio, o qual também pode estar exposto a estas temperaturas, conforme ilustrado na Figura 20. Para melhor descrever esse tema, uma revisão bibliográfica acerca dos fluidos de freio e suas características físico-químicas são abordadas no próximo capítulo desta tese.

Figura 20 – Esquema geral de um sistema de freios automotivo com destaque para fontes de calor.



Fonte: Tirreno, 2024.

2.4.3 Fluídos de freios e suas características físico-químicas

Os sistemas de freio automotivos, segundo o Departamento de Transporte Americano, sigla em inglês “DOT”, através da diretiva FMVSS 135-01 de 2005, define os requisitos funcionais e legais (US DOT, 2005). Segundo estas normas, os sistemas de freio de serviço devem assegurar a desaceleração e a imobilização do veículo conforme parâmetros normativos predefinidos para distância de parada, velocidades iniciais, força aplicada ao pedal e taxas de desaceleração. A integridade operacional do sistema é avaliada sob condições de falha, exigindo que o veículo mantenha a capacidade de frenagem em cenários de avaria parcial do circuito hidráulico, inoperância das unidades de assistência (servofreio ou sistemas auxiliares de força), desativação do motor ou falhas em componentes de controle, como o sistema antitravamento (ABS) e a válvula proporcionadora de frenagem.

A eficiência térmica do sistema é igualmente submetida a protocolos de ensaio para

mensurar o desempenho durante e após a exposição a regimes de alta temperatura (*brake fade*), decorrentes de solicitações severas ou prolongadas. No que tange à estabilidade direcional, veículos desprovidos de ABS são avaliados quanto à tendência de travamento prematuro das rodas dianteiras em relação ao eixo traseiro, garantindo que a desaceleração ocorra de forma controlada. Para veículos que atendem a esse critério de distribuição de força, realizam-se ensaios complementares de aderência na interface pneu-pavimento para otimizar o coeficiente de atrito disponível.

Adicionalmente, requisitos normativos específicos devem ser satisfeitos por veículos elétricos e sistemas de frenagem com acionamento eletromecânico (*brake-by-wire*). Por fim, é mandatório que o sistema de freio de estacionamento apresente capacidade de retenção estática, sendo capaz de manter o veículo imóvel em aclives ou declives de inclinação normalizada por um período temporal determinado.

Além dos requisitos de performance descrito no texto acima, a autoridade Americana estabelece ainda outros requisitos com relação a estabilidade e integridade estrutural dos equipamentos e componentes que compõem o sistema de frenagem automotiva mencionando que cada veículo deve apresentar uma advertência técnica indelével relativa à especificação do fluido de freio, posicionada sobre ou adjacente ao bocal de abastecimento do reservatório correspondente. Adicionalmente, o sistema de frenagem deve demonstrar integridade estrutural plena durante a execução dos protocolos de desempenho, sendo vedada a ocorrência de fraturas ou desprendimentos de componentes. A conformidade do sistema exige, ainda, a ausência de contaminação por fluidos hidráulicos ou lubrificantes nas superfícies de fricção, bem como a inexistência de sinais de vazamentos ou mesmo vazamentos nas vedações do cilindro mestre, unidades de assistência de força, tampas de reservatório ou demais orifícios de preenchimento.

Os fluidos de freios são essenciais para atender os requisitos funcionais estabelecidos pela norma FMVSS 135-01 de 2005 através da transmissão da força do pedal de freio (Figura 20) para as pinças e pastilhas, promovendo as respostas de desaceleração (ou mantendo a inércia de repouso) do veículo de acordo com os comandos do condutor.

Ainda segundo a norma FMVSS 135-01 de 2005, o requisito de incompressibilidade do fluído é descrito como a capacidade do fluido manter sua estabilidade volumétrica para que o deslocamento do pedal de freios resulte em um deslocamento previsível e eficaz dos componentes de fricção.

A norma também destaca a propriedade de incompressibilidade ao tratar do *Equilibrium Reflux Boiling Point* (ERBP). Fluídos de freios são higroscópicos (absorvem umidade). Quando o fluido absorve umidade, o ponto de ebulição cai de forma proporcional a contaminação.

Eventualmente sob condições de frenagem severa, onde temperaturas acima do ponto de ebulição do fluido contaminado podem ocorrer, há o risco de formação de vapor compressível na voluta da pinça de freios. Nesta situação, pode ocorrer a queda de pressão do sistema com o sintoma do fenômeno “pedal elástico” ou falha total de frenagem, o que viola os requisitos da FMVSS 135-01 quanto a estabilidade volumétrica e deslocamento previsível e eficaz dos componentes de fricção. Quanto aos fluídos, existem quatro tipos principais de fluidos de freios (Tirreno, 2024):

a) DOT 3: Fluído de freio que atende as especificações mínimas estabelecidas pelas normas ABNT NBR 9292 tipo 3; FMVSS 116 DOT 3; ISO 4925 classe 3 e SAEJ 1703. Segundo o fabricante o seu ponto de ebulição típico é de 240 °C e o ponto de ebulição úmido típico é de 154 °C com uma viscosidade cinemática típica a -40°C de 1230 cSt (*centiStokes*);
b) DOT 4: Fluído de freio que atende requisitos para trabalhar em temperaturas médias 30 °C mais altas se comparado com o fluido DOT 3 novo. Atende às normas Ford SAM6C9103-A; DBL 7760.30; GM W3356; ABNT NBR 9292 tipo 4; SAE J1704; FMVSS 116 DOT 4 e ISO 4925 classe 4. O fluído apresenta um ponto de ebulição típico de 270 °C, ponto de ebulição húmido típico de 170 °C e viscosidade cinemática a -40 °C típica de 1120 cSt;
c) DOT 5.1: Fluído de freios que oferece a melhor proteção contra ebulição e vaporização. É recomendado para veículos de alto desempenho e que operam em condições extremas. Seu ponto de ebulição típico é de 275 °C e o ponto de ebulição úmido típico é de 190 °C com a viscosidade cinemática típica a -40 °C de 870 cSt. ABNT NBR 9292 TIPO 5.1; ISO 4925 Classe 5.1; FMVSS nº116 DOT 5.1; SAE J 1704; DBL 7760.40 e DBL 7760.50. Por ter a menor viscosidade cinemática em comparação aos fluidos anteriores, o fluido de freio DOT 5.1 é o que oferece respostas mais rápidas para os comandos do condutor;
d) DOT 4 LV (*Low Viscosity*): Fluído de freio que atende aos mais recentes requisitos da indústria automotiva mundial com resistência à ebulição e vaporização superiores aos do DOT 5.1, aliando todas as características e técnicas dos fluidos DOT 5.1 e oferecendo ao mesmo tempo melhorias nos requisitos para a viscosidade cinemática.

O fluido DOT 4 LV atende as normas FORD WSS-M6C65-A2; Renault: 41-02-001; PSA S 712114; VW 501.14; FIAT 9.55597; GMW3356; ABNT NBR 9292 TIPO 4 LV; ISO 4925 Classe 6; FMVSS nº116 DOT 4; SAE J 1704; VW TL 766 Tipo Z. Com ponto de ebulição

típico de 270 °C, ponto de ebulição húmido típico de 180 °C e viscosidade cinemática a -40 °C típica de 670 cSt, o fluido DOT 4 LV representa o estado da arte para fluidos de freios automotivos.

Por se tratar de conhecimento estratégico para o setor produtivo de fluidos de freio, as formulações e os elementos químicos bem como os processos de produção são objetos de proteção e propriedade intelectual das empresas. Na verdade, o repositório de conhecimento científico sobre a composição e formulação dos fluidos de freio é bastante limitado.

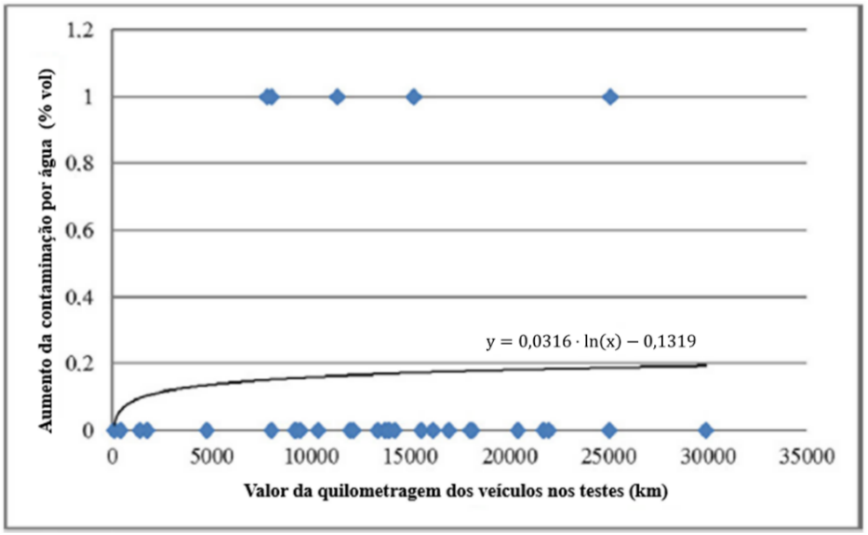
Pesquisas realizadas pelo autor não trouxeram resultados significativos para o aprofundamento das discussões sobre a estruturação da cadeia química para a fabricação de fluidos de freio. Contudo, uma patente aplicada pela empresa Hyundai Motor Company nos Estados Unidos da América trouxe à luz algumas características e elementos químicos que são utilizados na formulação destes produtos. Portanto, segundo (USPTO, 2002) , a patente aplicada pela Hyundai Motor Company para uma nova formulação para o fluído de freio DOT3, e tornada pública em novembro de 2020, descreve em linhas gerais os fluídos de freios e suas propriedades principais.

O texto da patente descreve a composição química dos fluidos de freio como sendo composta de cadeias de glicol misturadas com éster de ácido bórico. A higroscopia e a temperatura de ebulição, conforme descrito no texto, se configuram como propriedades físico-químicas essenciais para a manutenção da funcionalidade de transmissão dos comandos do condutor para o sistema de acionamento das pastilhas.

Os estudos de (Caban et al., 2021), mencionados anteriormente, já se debruçaram sobre as questões operacionais do fluído de freios em automóveis de passageiros, onde através da realização de ensaios em condições específicas os autores estudaram a influência da qualidade dos fluidos de freio e as porcentagens de contaminação por umidade no ponto de evolução do fluido ao longo de sua vida útil.

Os resultados dos ensaios de (Caban et al., 2021) são ilustrados através da Figura 21, em que os autores trazem a luz do conhecimento a taxa de contaminação do fluido do freio ao longo da vida útil em quilômetros do veículo. Percebe-se que quanto maior o tempo de intervalo de troca do fluído, maior será a taxa de contaminação por umidade.

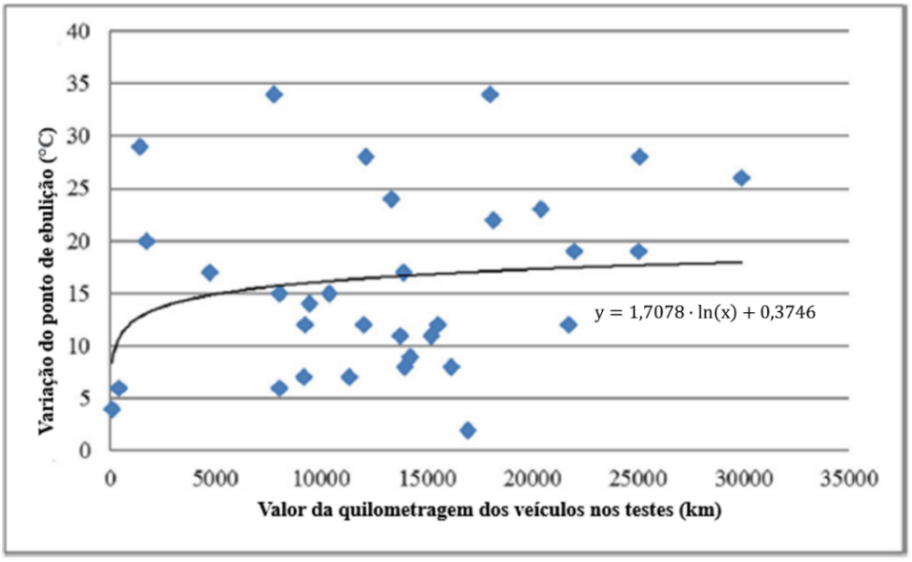
Figura 21 – Contaminação acumulada por umidade versus quilometragem do veículo.



Fonte: Caban et al., 2021.

Complementando os dados ilustrados na Figura 21, os autores avaliaram também a influência da taxa de contaminação do fluído por umidade acumulada sob a perspectiva da variação do ponto de evolução do fluído, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Variação do ponto de ebulição do fluido de freio versus quilometragem do veículo nas condições de ensaio.



Fonte: Caban et al., 2021.

Em suas conclusões, os autores mencionam que os sistemas de segurança ativa são afetados pelas condições técnicas de todos os elementos estruturais que compõem arquitetura veicular. Sistemas como: Powertrain, chassis, sistemas de direção, sistema de frenagem, sistema

elétrico, suspensão etc., são essenciais para a segurança ativa do veículo. Contudo, o monitoramento de parâmetros pré-selecionados dos sistemas de freio automotivos como a contaminação por umidade que, no estudo de (Caban et al., 2021) demonstrou reduções de temperatura de ebulição do fluido de freio para 196 °C, ocasiona o risco de perda de função por compressibilidade por conta da temperatura de ebulição do fluído estar abaixo das temperaturas de trabalho dos sistemas de freio encontrados por (Siregar et al., 2020) e ilustrados na Figura 9 anteriormente.

Portanto, (Caban et al., 2021) finalizam seus estudos mencionando que é imprescindível para a segurança viária que sejam desenvolvidas pesquisas relacionadas aos fatores funcionais do sistema de freio automotivo, especialmente com a aplicação de sistemas embarcados e inteligentes para monitoramento dos fatores em questão, como proposto por esta pesquisa de doutorado.

3 VARIAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTAS DOS SISTEMAS DE FREIOS

As variações nas respostas dos sistemas de freios, causadas por fatores como trepidações e ruídos, geram preocupações na indústria automobilística, podendo afetar tanto a satisfação dos clientes quanto a segurança do ecossistema da mobilidade. Instabilidades funcionais nos sistemas de freios automotivos podem, em circunstâncias de emergência, causar ansiedades e nervosismo nos condutores dos veículos pela falta de confiabilidade e previsibilidade das respostas aos comandos atribuídos ao sistema de freio. Segundo (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021), somente na América do Norte, as reivindicações de garantia relacionadas a problemas de ruído e vibração, incluindo o chiado dos freios, atingiram a cifra de um bilhão de dólares por ano. Os autores, em seus estudos, constataram que muitos fabricantes de pastilhas de freio alocam até 50% de seu orçamento de engenharia para resolver essas questões de ruído e vibração.

3.1 DEFINIÇÃO DE TEMPO DE RESPOSTAS DE FRENAGEM

O tempo de resposta dos sistemas de freio pode ser descrito como um conjunto de ações que englobam fatores de interação homem-máquina que culminam com o início do processo de frenagem. Portanto o tempo de resposta de um sistema de freios pode ser descrito como a diferença entre o momento em que o condutor aciona o pedal de freio e o efetivo início de desaceleração do veículo (Zhu et al., 2021).

Entre os fatores sintomáticos normalmente presentes em situações de variações dos tempos de respostas dos sistemas de frenagem, pode-se citar especialmente aqueles advindos de trepidações e ruído que são classificadas em três categorias principais (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021):

a) trepidação dos freios: Essa vibração forçada é induzida pelos freios, principalmente devido à variação na espessura do disco de freios. A frequência de vibração pode chegar a até 500 Hz, mas geralmente permanece abaixo de 100 Hz, muitas vezes tão baixa quanto 10–20 Hz;
b) rangido dos freios: Com o aumento do congestionamento do tráfego nas cidades, a ocorrência e as reclamações dos usuários sobre o rangido dos freios estão aumentando drasticamente. O rangido é uma vibração de baixa frequência causada pelo fenômeno de aderência-deslizamento. Ocorre na faixa de 20–500 Hz durante as frenagens em velocidades muito baixas do veículo. Essa vibração é auto excitada pelo conjunto de freio;

c) chiado dos freios: Essa vibração é induzida pelo atrito e o nível de pressão sonora associado ao chiado dos freios que excede aos 70 dBA.

Ainda em (Kalel et al., 2020) os autores desenvolveram estudos de desempenho e padrões funcionais para os tempos de respostas em sistemas dotados de pastilhas com partículas de aço inoxidável ou Stainless Steel (SS) ferrítico (SS 434), que segundo tem sua composição química típica formada por:

a) Cromo (Cr): 16-18%;
b) Molibdênio (Mo): 1,4%;
c) Níquel (Ni): >0,75%;
d) Enxofre (S): 0,03%;
e) Fósforo (P): 0,04%;
f) Silício (Si): 1%;
g) Manganês (Mn): 1%;
h) Carbono (C): 0,08%.

O aço inoxidável 434 (SS434), se caracteriza como uma liga ferrítica, na qual a sua microestrutura apresenta a configuração da combinação de ferrita e carbonetos esferoidais. A ferrita é caracterizada pela estrutura cristalina cúbica de corpo centrado. Segundo o experimento de (Kalel et al., 2020), a composição da liga foi definida pelos mesmos como "composições químicas nas quais as partículas apresentavam duas formas":

a) particulada ou *Stainless Steel Particle*s (SSP), com dois tamanhos com grãos classificados em duas classes:
   - 10-20 mícrons;
   - 30-45 mícrons.
b) limalhas.

Kalel e seus colegas (Kalel et al., 2020) mencionam que como o objetivo foi estudar o efeito do tamanho e da forma desses componentes quando utilizados na fabricação de pastilhas de freio em relação às propriedades de desempenho, foram desenvolvidas três pastilhas de freio multicomponentes, com composições idênticas, mas diferindo no tipo de partículas de SS 434 e nas limalhas adicionadas a cada composto para as pastilhas SS 434. As dimensões dos componentes estudados pelos autores foram:

a) partículas de SS 434 - Classificadas como 10-20 e 30-45 mícrons;

b) limalha de SS 434 - Comprimento: 1-2 mm, diâmetro: 50 mícrons.

As pastilhas de freio desenvolvidas foram caracterizadas quanto a propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas, conforme os padrões estabelecidos. E o desempenho tribológico foi avaliado em um dinamômetro de inércia em escala total, seguindo as normas JASO C406. Segundo os autores, os procedimentos de ensaios foram realizados conforme descrição a seguir (Kalel et al., 2020): o procedimento de assentamento (200 frenagens) foi realizado em todas as pastilhas para garantir a uniformidade da superfície de contato. Posteriormente, um ensaio real, composto por 200 aplicações de frenagem, foi conduzido. Foram ensaiados três tipos de composições para as pastilhas (P_S, P_B e P_{SW}), sendo:

a) P_S – particulada com 10-20 microns;
b) P_B – particulada com 30-45 microns;
c) P_{SW} – limalha Comprimento: 1-2 mm, diâmetro: 50 mícrons.

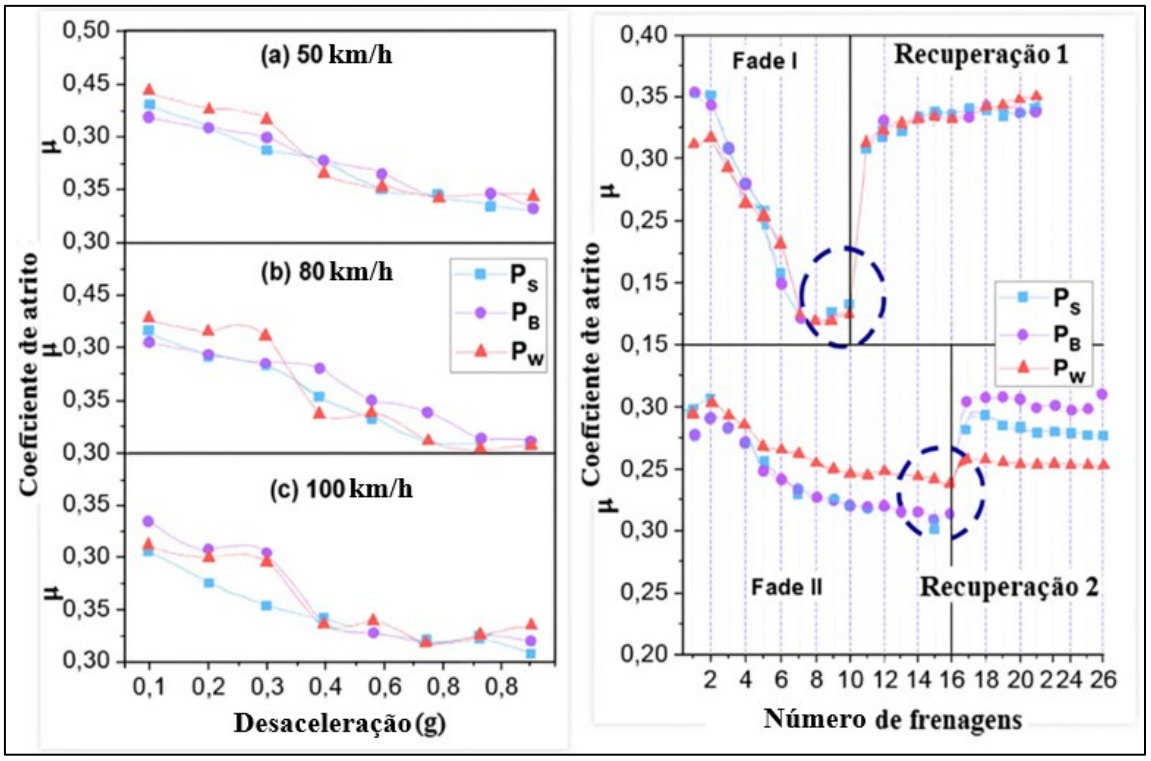
O desempenho das pastilhas de freio foi avaliado conforme ciclos de ensaios abaixo:

a) ciclo de eficiência de frenagem:
   - consiste em 72 aplicações de frenagem a velocidades de 50, 80 e 100 km/h, com diferentes desacelerações (de 0,1g a 0,8g);
   - o valor médio do coeficiente de atrito (μ) foi calculado com base em três medições correspondentes à velocidade e pressão aplicadas.
b) ciclo de fade 1:
   - realizado a 65 km/h com desaceleração de 0,45g;
   - composto por 10 aplicações de frenagem.
c) ciclo de recuperação 1:
   - realizado a 50 km/h com desaceleração de 0,30g;
   - composto por 12 aplicações de frenagem.
d) ciclo de fade 2:
   - realizado a 65 km/h com desaceleração de 0,45g;
   - composto por 15 aplicações de frenagem.
e) ciclo de recuperação 2:
   - realizado a 50 km/h com desaceleração de 0,30g;
   - composto por 12 aplicações de frenagem.

Para efeitos de capabilidade e estabilidade estatística, o ciclo de ensaios completo foi repetido utilizando discos e pastilhas novos. Todos os valores dos resultados apresentados pelos autores representam os valores médios das medições (Kalel et al., 2020).

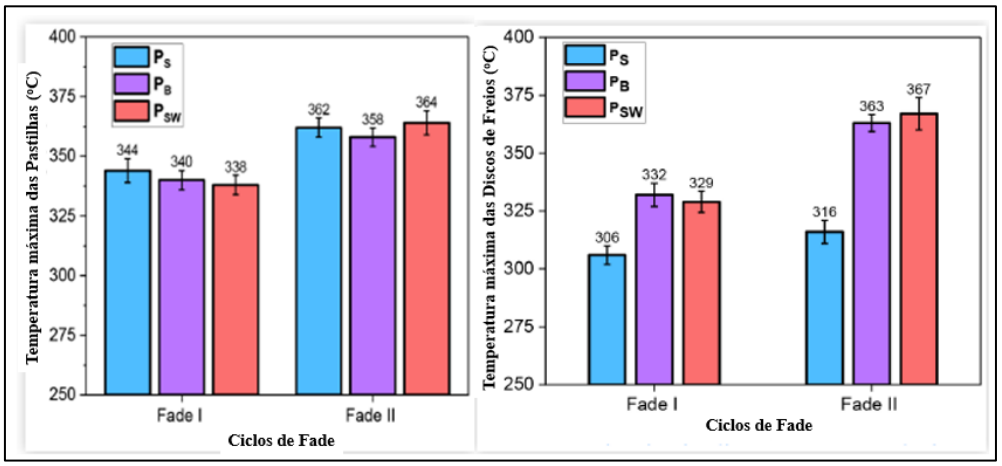
A Figuras 23 e 24 ilustram os resultados dos experimentos de (Kalel et al., 2020) relativos aos ensaios executados para os três materiais das pastilhas. Os autores concluem que a velocidade inicial de frenagem tem correlação direta com a queda do coeficiente de atrito demonstrando que quanto maior for a desaceleração maiores serão as temperaturas observadas no conjunto disco e pastilha, o que é corroborado com outros estudos já mencionados nesta tese. Adicionalmente, as temperaturas no conjunto do disco e da pastilha chegaram a picos de 367 °C, o que sugere um estudo mais aprofundado dos outros componentes do sistema, os quais serão abordados ainda dentro deste capítulo.

Figura 23 – Curvas de desaceleração e Fade em função do Coeficiente de atrito.



Fonte: Kalel et al., 2020.

Figura 24 – Temperaturas máximas atingidas pelas pastilhas e discos de freios.



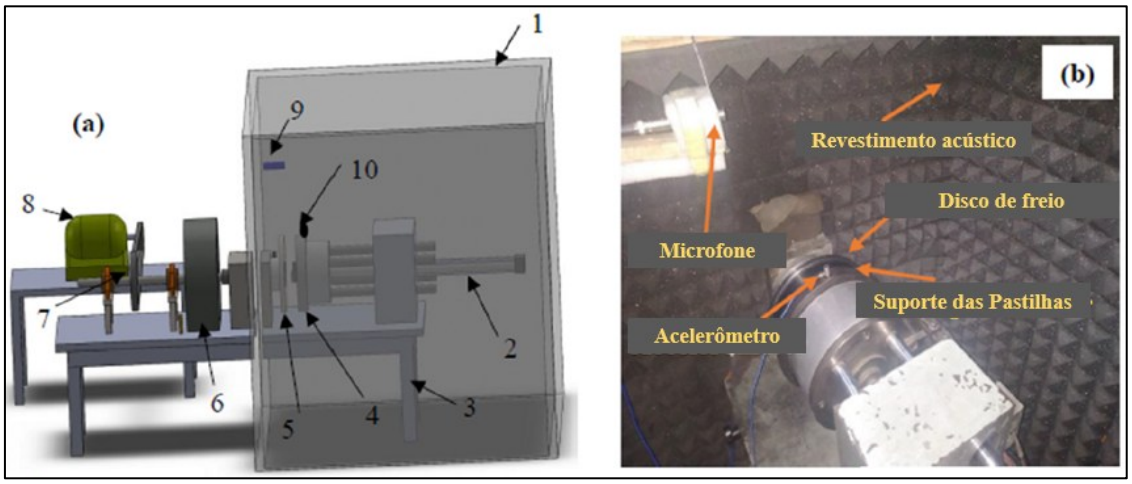
Fonte: Kalel et al., 2020.

Face às observações deste experimento, os autores decidiram continuar a pesquisa no campo das vibrações e ruídos causados pelo sistema de freios. Para isso utilizaram os mesmos compostos para estudar a influência do material das pastilhas nas vibrações e ruidoso do sistemas de freios. Portanto, os autores prepararam cinco tipos diferentes de pastilhas de freio, mantendo a composição base idêntica entre elas e contendo partículas (3% em volume, equivalente a ~10% em peso) com tamanho de 30 a 45 μm de quatro tipos de aço inoxidável: SS304, SS316, SS410 e SS434. Uma quinta pastilha teve cobre adicionado como um novo ingrediente a ser pesquisado.

Este novo conjunto de amostras de pastilhas, que foram pesquisadas pelos autores, são referidas por (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021) como B304, B316, B410, B434 e BCu, respectivamente. A sexta pastilha foi preparada com limalha de aço inoxidável (SSS434) (comprimento: 1-2 mm, diâmetro: 50 μm) que foi chamada pelos autores como B434S.

Para continuação das pesquisas com o foco em ruídos e vibrações em sistemas de freio, (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021) construíram um modelo simplificado em bancada para aquisição de dados, conforme a Figura 25, através de ensaios que simulavam as condições de frenagem conforme descrição a seguir. Nela, pode se ver a vista interna (b) do equipamento de ensaio de ruídos e vibrações desenvolvidas por (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021), a qual é compreendida de (1) Câmara acústica, (2) cilindro hidráulico, (3) base antivibração, (4) suporte para pastilha de freio, (6) volante, (7) Transmissão por Correia, (8) motor de corrente alternada (acionado por sistema de acionamento de frequência variável – inversor de frequência), (9) microfone e (10) acelerômetro.

Figura 25 – Esquema do equipamento de ensaio de ruído e vibrações de freio.



Fonte: Kalel et al., 2020.

Segundo os autores, o equipamento apresenta limitações com relação as pressões máximas requeridas em diferentes regimes de desacelerações, conforme os padrões da norma SAE J2521.

Os ensaios foram realizados sob as mesmas condições de laboratório, onde o ruído de fundo estava abaixo de 45 dBA dentro da câmara acústica. A umidade relativa era de 70 ± 10% e a temperatura mantida a 32 ± 2 °C. Discos e pastilhas de freio novos foram utilizados para cada ensaio. Os sinais de ruído e vibração dos freios foram registrados para 10 aplicações de frenagem em cada ciclo e utilizados para a análise das frequências e amplitudes dos ruídos e vibrações. Para os ensaios, (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021) desenvolveram os seguintes ciclos de ensaios, conforme a Tabela 3 descrita anteriormente:

Ciclo de Assentamento: O assentamento das pastilhas de freio foi realizado a 80 km/h com uma pressão de 30 bar. O objetivo desse ciclo é obter a uniformidade de superfície de contato entre as pastilhas e o disco de freios.

Durante esse ciclo, o disco atinge a velocidade tangencial equivalente a 80 km/h, sendo que o freio era acionado pelos pesquisadores com uma pressão de 30 bar através da unidade hidráulica do equipamento de ensaio. Uma vez atingida a velocidade programada do rotor do volante, o motor AC (que aciona o rotor por meio de uma correia) era desengatado, e o movimento de rotação do disco de freio era mantido pela reserva de energia cinética de rotação acumulada através da massa inercial do volante, mesmo quando o freio estava sendo aplicado nos ensaios. O tempo de contato das pastilhas com o disco foi mantido uniforme (1 s) para todos os ciclos de assentamento.

Ciclo de desempenho, ou ensaio de desempenho: Consiste em ensaios de frenagem

realizado em condições de velocidade representativas para o ecossistema urbano e de vias intercidades com maior velocidade de cruzeiro para os automóveis. O objetivo desse ciclo é observar o efeito das altas velocidades no desempenho de ruído e vibração do sistema de freio testado na bancada.

Neste ensaio, o disco é submetido a rotações representativas a velocidades de 50 km/h e 80 km/h, sendo que em cada caso de velocidade de ensaio o freio é aplicado com diferentes configurações de pressão (10, 20 e 30 bar). Com este procedimento, a frenagem é testada em diferentes combinações de velocidade e pressões no sistema de freio. Assim, como descrito no ciclo anterior (assentamento), uma vez que o rotor atinge a rotação programada, o motor de corrente alternada (AC) é desengatado, e o disco de freio mantém o regime de rotação devido à inércia do volante, mesmo quando o freio é aplicado.

O tempo de contato das pastilhas com o disco foi mantido uniforme (1 s) para todas as combinações de velocidade e pressão nos ciclos de desempenho (ou ensaio de performance). Segundo os autores, esse procedimento é crucial para avaliar o desempenho dos freios em diferentes cenários e garantir a segurança e eficiência do sistema de frenagem.

Ciclo de arrasto: Este ciclo de ensaios corresponde ao ensaio de frenagem realizado em baixa velocidade (10 km/h e 20 km/h). O objetivo desse ciclo é observar o efeito da baixa velocidade e da operação contínua de frenagem no comportamento do ruído e vibração no sistema de freio. Durante esse ciclo, o disco gira em velocidades reduzidas e, em cada caso, o freio é aplicado com diferentes configurações de pressão (10, 20 e 30 bar). Assim, a frenagem é testada em diferentes combinações de velocidade e pressão de freio.

Diferentemente dos ciclos anteriores, em que o motor é desacoplado durante a operação de frenagem, no caso do ciclo de arrasto, o motor mantém o disco de freio em funcionamento contínuo na velocidade programada durante toda a aplicação da frenagem, sem ser desengatado ao acionar o freio. O tempo de contato das pastilhas com o disco é mantido uniforme (4 s) para todas as combinações de velocidade e pressão de frenagem nos ciclos de arrasto.

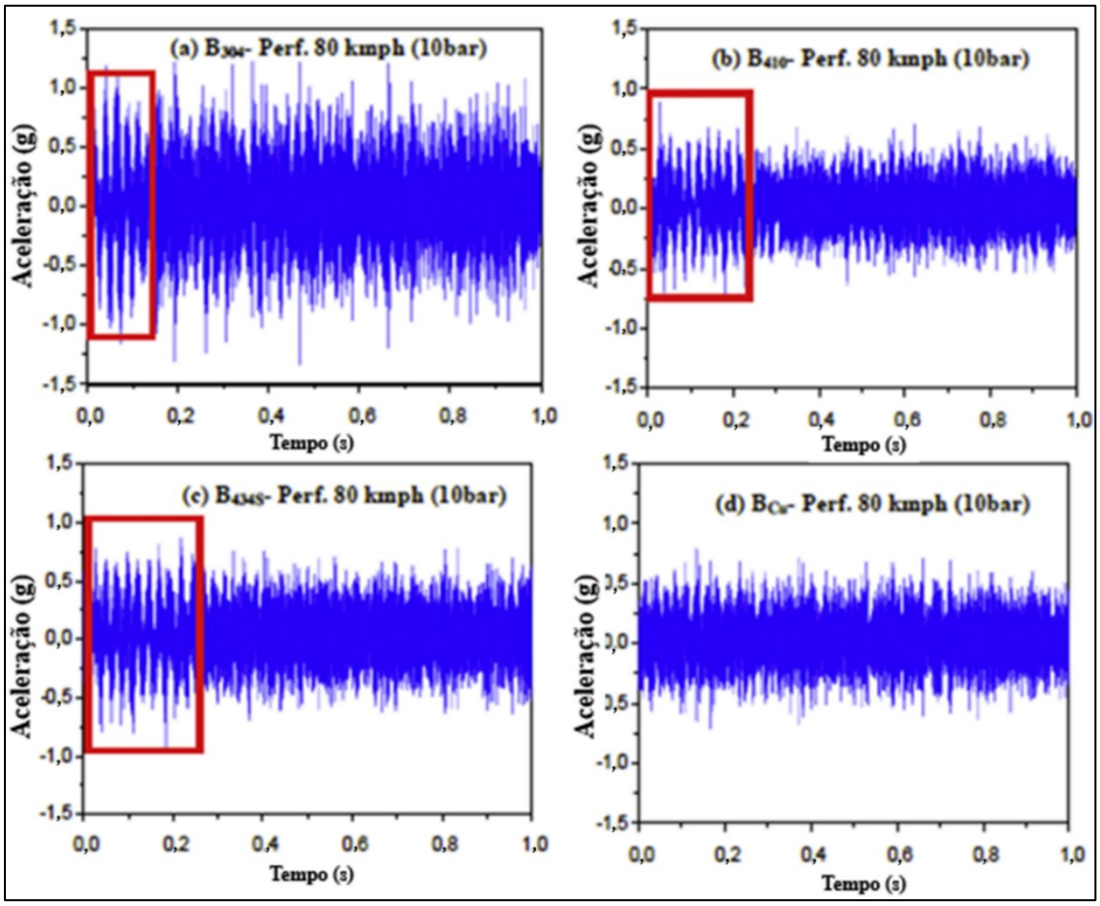
Após o ciclo de ensaios completos utilizando a metodologia de ensaio descrita anteriormente os autores (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021) demonstram que as frequências críticas (com pressões no sistema hidráulico de freio em 10 bar) para as vibrações do sistema de freios, são percebidas nos instantes iniciais de frenagem, conforme ilustrado nas Figuras 26 e 27.

Tabela 4 – Experimentos para Frenagem e Medição Subsequente de Ruído e Vibração.

Ciclo	Velocidade (km/h)	Pressão (bar)	Número de Frenagens Aplicadas	Número de Registros de Vibração e Ruído dos Freios
Assentamento	80	30	100	–
Ensaio de Performance	50	10, 20, 30	10 cada	10 cada
Ensaio de Performance	80	10, 20, 30	10 cada	10 cada
Arrasto	10 e 20	10, 20, 30	10 cada	10 cada

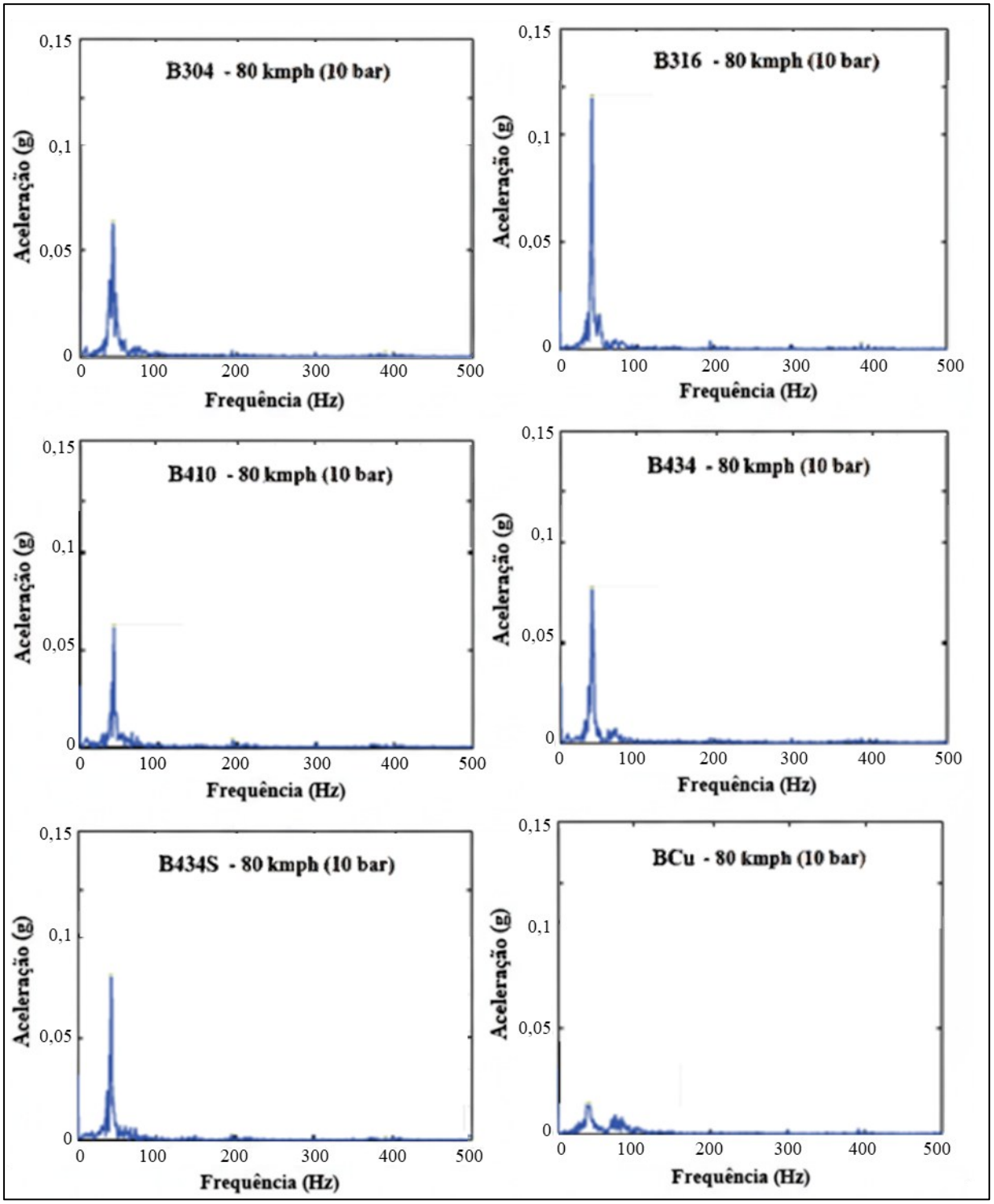
Fonte: Autor “adaptado de” Kalel; Darpe; Bijwe., 2021, p. 3.

Figura 26 – Histórico de tempos de aceleração para os ciclos de desempenho durante o ciclo de frenagem.



Fonte: Autor “adaptado de” Kalel; Darpe; Bijwe., 2021, p. 5.

Figura 27 – Gráficos plotados a partir das Transformadas de Fourier (FFT) no domínio do tempo para os ciclos de desempenho de frenagem e suas frequências de vibrações.



Fonte: Autor “adaptado de” Kalel; Darpe; Bijwe., 2021, p. 7.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONTEXTUALIZADA

Para efeitos de revisão bibliográfica acerca do tema, optou-se por trazer apenas um resumo dos principais fatos físicos observados por (Kalel; Darpe; Bijwe, 2021) em função dos materiais empregados na composição química das pastilhas. O objetivo da presente tese é se debruçar sobre outros aspectos ainda não pesquisados pela comunidade científica e que podem também contribuir com as vibrações, influências no tempo e na estabilidade das respostas dos sistemas de freios aos comandos do condutor, tais como descritas aqui.

3.2.1 Tempo de Resposta dos Sistemas de Freios

O tempo de resposta dos sistemas de freio, como descrito anteriormente, pode ser definido como a diferença entre o momento em que o condutor aciona o pedal de freio e o efetivo início de desaceleração do veículo. Segundo (Zhu et al., 2021), fatores como o estilo de condução, assim como os hábitos pessoais e regulares dos motoristas, determinam os comportamentos de condução. Esses comportamentos manifestam as diferenças individuais e podem ser influenciados por fatores humanos e cognitivos como idade, gênero, personalidade, experiência de condução e proficiência na direção. Eles desempenham um papel importante no processo decisório dos diferentes condutores ao tomar uma série de decisões de condução, como aceleração, frenagem e direção. Em (Zhu et al., 2021), os autores ainda postulam que apesar de haver estudos relacionados ao comportamento de direção dos condutores, há muito a ser explorado sobre as diferenças entre condutores no processo de frenagem de emergência, para modificar de forma personalizada as características funcionais dos sistemas de freio automotivos.

3.2.2 Os Fatores Humanos na Frenagem de Emergência

Em (Hsieh et al., 2022), os autores estudam os tempos de resposta do sistema de freios comandos do condutor, levando em consideração os fatores humanos e os tempos de reação em função da sinalização de freio dos veículos à frente.

A frequência de frenagem e dos sinais das luzes de freio dos veículos à frente podem determinar o tempo de resposta de frenagem dos veículos subsequentes. Portanto (Hsieh et al., 2022) conduziram um estudo para compreender o impacto das diferentes frequências de piscar das luzes de freio no tempo de resposta de frenagem dos motoristas que seguem, levando

também em consideração as diversas taxas de desaceleração e a velocidade do veículo à frente. Para isto, os autores desenvolveram um estudo que analisou o efeito da velocidade, taxa de desaceleração e frequência de piscar das luzes de freio do veículo líder no tempo de resposta de frenagem do motorista subsequente.

Para o desenvolvimento da pesquisa experimental em laboratório, (Hsieh et al., 2022) utilizaram 24 voluntários com idades entre 25 e 30 anos, sendo 14 homens e 10 mulheres. A idade média dos participantes, segundo os pesquisadores, era de 26,3 anos e todos possuíam pelo menos cinco anos e 60.000 km (mais de 50 km por dia útil) de experiência em condução.

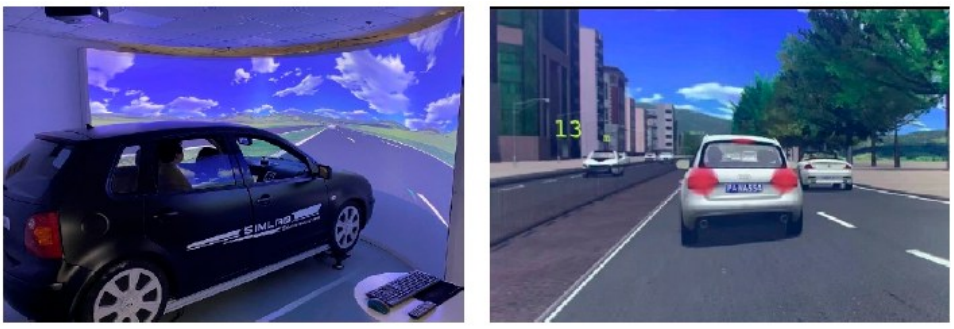
Os outros critérios para inclusão dos voluntários no experimento são elencados abaixo:

a) possuir uma carteira de motorista válida C1 ou C2 na China;
b) visão normal ou corrigida para o normal;
c) ausência de visão de cores anômala;
d) não apresentar transtornos psiquiátricos ou do sono.

Para a execução experimental e coleta de dados, (Hsieh et al., 2022) construíram um simulador utilizando um veículo VW Polo alocado estaticamente no laboratório, conforme a Figura 28, sendo que na sua frente foi instalado uma tela para projeção de imagens curvada em 210° (altura de 2,62 m e raio de 2,8 m) e com 2,8 m de distância em relação ao condutor, onde eram projetadas as imagens do ecossistema de mobilidade simulando as condições de tráfego.

Um circuito de estrada de 20 km de comprimento para o ensaio, seguido de um percurso de 50 km em viadutos, foram projetados na tela durante o experimento. O veículo à frente (ou veículo líder) do veículo do condutor trafegou numa velocidade de 50 km/h nas rodovias convencionais e 80 km/h no viaduto, sendo que não era permitida ultrapassagens no circuito de ensaio, bem como não havia cruzamentos ao longo do percurso testado.

Figura 28 – Simulador desenvolvido pelos pesquisadores (esquerda), vista do automóvel líder projetado na tela do simulador (à direita).



Fonte: Hsieh et al., 2022.

O estudo segundo (Hsieh et al., 2022) empregou um delineamento experimental no qual os participantes foram alocados aleatoriamente em dois cenários de condução distintos. Metade do grupo iniciou a sessão formal no ambiente configurado para uma velocidade de 50 km/h, enquanto a outra metade começou no ambiente de 80 km/h. As condições foram subsequentemente invertidas na segunda fase do experimento para cada grupo.

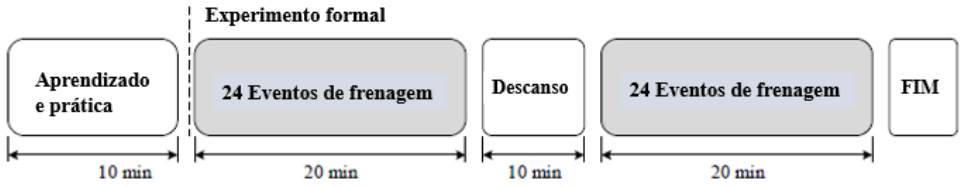
Durante as sessões, os participantes gerenciavam a velocidade e a frenagem do veículo, mantendo uma distância predeterminada do carro imediatamente à frente (13 metros no cenário de 50 km/h e 32 metros no de 80 km/h) em um segmento de estrada retilíneo. A resposta esperada à frenagem do veículo líder mimetizava reações de direção no mundo real. Consequentemente, a tarefa primordial do experimento consistia na desaceleração: ao observar as luzes de freio do veículo precedente acenderem, os participantes deveriam avaliar o risco iminente de colisão e modular a velocidade do próprio veículo através do pedal de freio para evitar um impacto o mais rápido possível.

A distância exata entre os veículos líder e seguidor era visualizada em tempo real no quadrante esquerdo do campo de visão do condutor. Adicionalmente, instruções textuais como "acelerar" ou "desacelerar" eram exibidas adjacentes ao indicador de distância sempre que o veículo seguidor se encontrava fora do intervalo de separação especificado.

Foram instanciados doze eventos de frenagem, distribuídos aleatoriamente dentro de cada ambiente de condução. Cada ambiente demandava aproximadamente 20 minutos para a conclusão de todos os eventos. O intervalo médio entre cada evento de frenagem seguia uma distribuição normal, caracterizada por uma média de 1,2 minutos e um desvio padrão de 0,6 minutos. Após a conclusão dos doze eventos, solicitava-se aos participantes que desocupassem o veículo e fizessem uma pausa de 10 minutos antes de prosseguirem para o ensaio de condução subsequente.

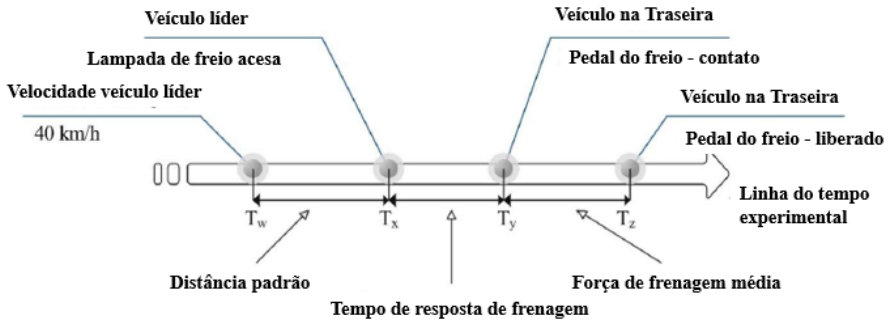
Para fomentar o envolvimento dos participantes e a imersão na simulação, o *software* de direção incorporou ruídos realistas do motor e forças inerciais que variavam de acordo com a aceleração e desaceleração do veículo, proporcionando, assim, uma experiência de condução mais fidedigna. A Figura 29 ilustra, de forma didática, o processo experimental realizado pelos autores. A Figura 30, mostra os pontos de tomada de dados durante o experimento acima.

Figura 29 – Processo experimental.



Fonte: Hsieh et al., 2022.

Figura 30 – Processo experimental - A relação entre o tempo de resposta de frenagem, a força média de frenagem e a distância média entre veículos.



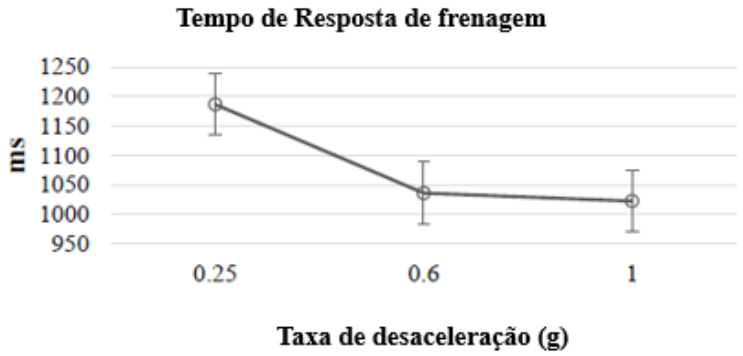
Fonte: Hsieh et al., 2022.

Tal que:

a) T_w é o momento inicial do ensaio (distância padrão entre veículos atingida – 13m para 50km/h ou 32 m para 80km/h;
b) T_x é o momento em que a luz de freio do veículo líder é acesa, sinalizando frenagem;
c) T_y é o momento no qual o pé do condutor do veículo que seguem na traseira toca o pedal do freio;
d) R_T é o tempo de resposta de frenagem;
e) T_z é o momento em que o condutor do veículo na traseira retira o pé do freio.

Os autores concluíram que a taxa de desaceleração teve um impacto significativo no ambiente de condução a 50 km/h, situação na qual a distância entre veículos era a menor no experimento. Neste caso, segundo (Hsieh et al., 2022), quanto maior a taxa de desaceleração, maior a força de frenagem aplicada (Figura 31). Isso sugere que quando a velocidade relativa entre dois veículos aumenta o motorista do veículo seguidor recorre à frenagem de emergência para evitar uma colisão.

Figura 31 – Tempo de resposta de frenagem e taxa de desaceleração a 50km/h.



Fonte: Hsieh et al., 2022.

Embora os autores tenham estudado o tempo de resposta do sistema de frenagem automotivo através de ensaios com voluntários, as pesquisas não contemplam os fatores cognitivos e de condições físicas. Outros fatores como a confiabilidade e estabilidade funcional dos sistemas embarcados no veículo bem como os possíveis modos de falhas especialmente ligados aos componentes químicos, como o fluido de freio, também não foram contemplados.

Esta tese se propõe a abordar essas questões a fim de avaliar se os aspectos químicos podem contribuir com a melhoria da confiabilidade e estabilidade dos sistemas de frenagem automotivos em emergências.

3.3 TRABALHOS RELACIONADOS

A revisão bibliográfica específica sobre comportamento dinâmico estabilidade, confiabilidade, estabilidade funcional dos sistemas de freio automotivos foi realizada através do repositório científico a fim de se determinar o estado da arte na área de pesquisa desta tese. A seguir serão identificados os trabalhos científicos que representam a cronologia do que há de mais atual para a área de concentração da pesquisa abordada nessa tese.

Segundo Otto et al. (2019) o fenômeno do atrito em sistemas de freio não é totalmente compreendido e ainda não há modelo preditivo para o fenômeno, para isto, desenvolveram pesquisas para estudar as frequências de vibração no range entre 20 e 80 kHz em bancada automatizada universal *Tribotester*. Com isto os autores se concentraram no estudo das correlações entre a morfologia da camada limite de contato entre pastilhas e discos de freio e suas reverberações nos componentes dos sistemas de freio automotivos. Koch et al., (2021) dando prosseguimento à linha de pesquisa de Otto et al. (2019), desenvolveram estudos para aprofundar o entendimento da correlação e balanceamento entre as diferentes fontes de vibração

nos sistemas de freios automotivos, Koch et al. (2021) relatam que o estado da arte das simulações ainda não fornece uma ferramenta confiável para a predição do fenômeno de vibrações nos sistemas de freio. Portanto, Koch et al. (2021) aprofundaram o entendimento do tema através de pesquisas experimentais para estudar a influência dos parâmetros de vibrações não lineares dos sistemas de freios.

Caban et al. (2021) abordaram alguns dos aspectos não lineares no funcionamento dos sistemas de freios a estudar os fluidos de freio com especial atenção a taxa de contaminação por umidade. Estes autores se concentraram apenas nos aspectos tribológicos da influência da contaminação por umidade nos fluidos de freio sem se aprofundar nas consequências para os tempos e estabilidade das respostas do sistema de freios aos comandos do condutor. Já os autores Kalel et al. (2021) desenvolveram pesquisas relacionadas aos aspectos funcionais e de meio ambiente, através de ensaios com diferentes ligas para o material de atrito de pastilhas de freios, especialmente com o objetivo de geração de novos conhecimentos relacionados a vibrações e emissão de ruídos para pastilhas de freios livres de cobre na composição química do composto do material de atrito.

Os estudos de Kalel et al. (2021) posteriormente foram expandidos por Stender et al. (2021) que utilizaram algoritmos de aprendizado de máquina para a classificação das vibrações de diferentes fontes de vibrações e ruídos provenientes de diferentes componentes mecânicos dos sistemas de freios automotivos.

O tema vibrações e confiabilidade de respostas aos comandos do condutor em sistemas de freios é estudada de forma mais aprofundada das pesquisas de (Huang et al., 2021) que se debruçaram sobre o tema vibrações em sistemas de freio para aeronaves de grande porte, os autores estudaram as frequências e amplitudes das vibrações do sistema de acionamento de freio hidráulico em aeronaves com o foco no balanceamento de pressões nos condutos de fluidos de freios das aeronaves. Os autores realizaram um estudo aprofundado do servo, ou válvula eletro hidráulica de 3 estágios que são utilizadas nas aeronaves, sendo o foco do estudo as vibrações advindas da linha de pressão do fluído em diferentes regimes de pressões de trabalho do sistema.

Nesse estudo, os autores propuseram um novo modelo de válvula de acionamento do sistema de freio de 2 estágios com a adição de um servofreio com acionamento por cilindro a fim de controlar as frequências de vibração perceptíveis pelo piloto no range entre 0 e 60 Hz.

Entre todos os artigos científicos pesquisados, a pesquisa realizada por (Hsieh et al., 2022) se mostrou como a única pesquisa científica com objetivo para associar os fatores cognitivos e funcionais dos sistemas de freios automotivos na eficiência e segurança de

frenagem em emergências através do estudo do tempo de respostas e desacelerações.

Estes estudos associados com a linha de pesquisa de (Sun et al., 2023) os quais apresentam a mais recente técnica de detecção da presença de moléculas de água nos fluidos de freio (através de experimentos em laboratório) com análises espectrais por meio de marcadores florescentes adicionados no fluido de freio para a determinação quantitativa da taxa de contaminação do fluído através da medição dos comprimentos de ondas de emissividade luminosa. A associação destes estudos pode contribuir com o avanço do conhecimento para a associação dos fatores cognitivos e funcionais dos sistemas de freios automotivos.

Em todos os casos desta revisão bibliográfica foram estudadas as características físico-químicas dos fluídos de freios ou características e limitações dos componentes mecânicos, especificamente relacionados a temperaturas, pressões de trabalho etc. Não se observa o aprofundamento em questões sobre a associação com os aspectos funcionais do fluído de freios como fluidez, ausência de vibrações em situações de frenagem de emergência, ou mesmo em outras limitações nas quais as contaminações possam gerar falta de estabilidade e confiabilidade das respostas dos sistemas de freio automotivos aos comandos do condutor.

Portanto, esta tese tem como objetivo principal complementar os estudos mencionados nesta revisão bibliográfica através do aprofundamento das características físico-químicas de fluidos de freio e suas limitações quanto aos contaminantes externos para que haja respostas rápidas, estáveis e com ausência de vibrações para os comandos do condutor em situações de frenagem de emergência. Portanto, as pesquisas desta tese sobre os componentes principais e discriminantes através da combinação dos fatores multivariados que compõem os parâmetros dos eventos de frenagem, trarão a luz uma nova ótica para o desenvolvimento de algoritmos de diagnóstico da presença (ou não) de contaminação nos fluidos.

Por fim os resultados da linha de pesquisa desta tese terão efeito de complementariedade da pesquisa de (Hsieh et al., 2022) na qual se estuda os tempos de resposta do sistema de freios aos comandos de diferentes tipos de condutores.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta tese concentra-se no estudo e caracterização dos fenômenos e parâmetros discriminantes dos eventos de frenagens quando associadas a contaminação por umidade no sistema de freios automotivos. Isto posto, neste capítulo serão descritos os principais recursos e métodos propostos para a realização desta pesquisa científica, conforme lista abaixo:

a) bancada de ensaios de freios para os ensaios e coleta de dados funcionais dos componentes dos sistemas de freios;
b) ensaios químicos laboratoriais de preparação de amostras de fluido de freios;
c) modelo de processamento de ensaios multivariados para a classificação de padrões.

4.1 BANCADA DE ENSAIOS DE FREIOS

A bancada de ensaios foi desenvolvida especificamente para permitir a avaliação do comportamento dinâmico e funcional dos componentes que compõem o sistema de freios automotivos, com um enfoque especial no comportamento do conjunto disco e pastilha de freio através do estudo das características funcionais do fluído de freio em diferentes cenários de contaminação e temperaturas de trabalho (Souza, et. Al, 2024).

O novo conceito de bancada de ensaios inovadora (que teve seu pedido de patente depositado no INPI e PCT) e desenvolvida para esta tese foi concebida pelo autor nas instalações industriais de uma empresa parceira, sendo que o processo de manufatura foi realizado em fases iniciais na FEI por equipes técnicas próprias e de forma secundária e complementar pelo próprio autor e por técnicos e engenheiros da empresa parceira que produz equipamentos industriais especiais para a indústria petrolífera brasileira.

A empresa parceira é certificada nas normas ISO 9001 e teve a incumbência de auditar todo o processo de desenvolvimento e manufatura realizada pelo pesquisador e profissionais especializados da empresa para àquelas atividades específicas de forma a habilitar o processo de certificação dos sistemas de aquisição e medição de dados (célula de carga, termopares, transdutores de pressão, *encoders* etc.). Ao fim do processo, a empresa realizou o processo de certificação da bancada inovadora de forma autônoma para garantir a certificação do equipamento através de laudos técnicos.

Toda a documentação técnico-construtiva da bancada (desenhos técnicos construtivos, lista de peças de reposição, manuais de operação e manutenção, e por fim laudos ABNT NR12 e Certificado de calibração expedido pela empresa) se encontram em poder do Centro de

Laboratórios Mecânicos da FEI. A estrutura da bancada pode ser dividida nos macrossistemas funcionais abaixo que serão descritos a seguir:

a) sistemas e componentes mecânicos;
b) sistemas e componentes elétricos e eletrônicos;
c) sistemas hidráulicos e pneumáticos;
d) instalações laboratoriais;
e) funcionamento e lógica de programação da bancada.

4.1.1 Sistemas e componentes mecânicos funcionais da bancada

Os sistemas mecânicos da bancada foram concebidos para simular ¼ (um quarto) de um veículo de Peso Bruto Total (PBT) de 1720 kg, equivalente a um VW T Cross e tem intervalo de simulação programado para velocidades lineares de 0 a 80 km/h para um conjunto de roda e pneus típicos do VW Polo (205/55R15 com raio dinâmico de 0,30325 m). Os principais componentes mecânicos da bancada, ilustrados na Figura 32, são:

a) base da bancada de ensaios compreendida de elementos estruturais para prover fixação, ancoragem e estabilidade para os sistemas de transmissão da bancada;
b) sistema de transmissão de rotação com respectiva massa inercial compreendidos de motor elétrico, amortecedor de vibrações torcionais, conjunto de eixos e mancais para a transmissão de rotação por correias e corrente;
c) conjunto de discos de freio e pastilhas montados na bancada.

Considerando-se que a especificação do pneu 205/55R15 indica que o conjunto utiliza uma roda de aro 15” com perfil de 55% do aro, pode-se determinar a rotação angular da bancada equivalente a velocidade linear do veículo de 80km/h através da dedução das fórmulas partindo-se do diâmetro dinâmico (ØPneu), em metros, do conjunto roda e pneu através da equação (Gillespie, 1992; Milliken; Milliken, 1995):

$$øPneu = \frac{25{,}4 \cdot Aro}{1000} + \frac{\left(\frac{2 \cdot perf}{larg \cdot 100}\right)}{1000} \tag{20}$$

Onde:

a) Aro: aro da roda (m);
b) perf: altura da parede lateral do pneu (");

c) larg: largura da roda/pneu (mm).

Aplicando os dados dimensionais para o conjunto experimental roda e pneu, têm-se que o diâmetro do pneu é de 0,6065 m. O raio dinâmico do pneu ($R_{Dinâmico}$), em metros, pode ser determinado pela equação (Gillespie, 1992):

$$R_{Dinâmico} = \frac{øPneu}{2} = 0{,}30325 \text{ m} \tag{21}$$

Para se determinar a relação entre rotação, *RPM*, e a velocidade linear *V*, em metros por segundo, equivalente do eixo secundário, onde está montado o conjunto de disco e pastilhas, pode-se utilizar a equação base (Gillespie, 1992):

$$RPM = \frac{V \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot R_{Dinâmico}} \tag{22}$$

Na equação principal, ao isolar a velocidade linear, temos:

$$V = \frac{RPM \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{Dinâmico}}{60} \tag{23}$$

Em seguida, pode-se agrupar os valores constantes, conforme demonstrado abaixo:

$$V = RPM \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R_{Dinâmico}}{60}\right) \tag{24}$$

Na equação acima, pode-se aplicar o raio dinâmico 0, 30325 m, determinado através da Equação 25, onde tem-se:

$$V = RPM \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 0{,}30325}{60}\right) \tag{25}$$

Portanto, se obtêm a seguinte equação:

$$V = RPM \cdot 0{,}03175 \tag{26}$$

Transformando em km/h:

$$V = (RPM \cdot 0{,}03175) \cdot 3{,}6 \tag{27}$$

Obtêm-se a equação final para a velocidade linear equivalente no eixo primário (eixo do motor elétrico):

$$V = RPM \cdot 0{,}1143 \tag{28}$$

Para a determinação da velocidade linear equivalente no eixo secundário, onde está montado o conjunto de disco e pastilhas, basta aplicar a relação de transmissão "i" entre os 3 pinhões do eixo primário (14 dentes) e as 3 coroas do eixo secundário (41 dentes), ou seja:

$$i = \frac{41}{14} = 2{,}93 \tag{29}$$

Portanto a velocidade linear equivalente do veículo simulado (km/h) na bancada, com relação a rotação, RPM, do motor elétrico pode ser expressa pela equação:

$$V = \frac{(RPM \cdot 0{,}1143)}{2{,}93} \tag{30}$$

Quanto ao torque de frenagem (T) medido na célula de carga (N·m), este pode ser expresso pela equação (Gillespie, 1992; Limpert, 2011):

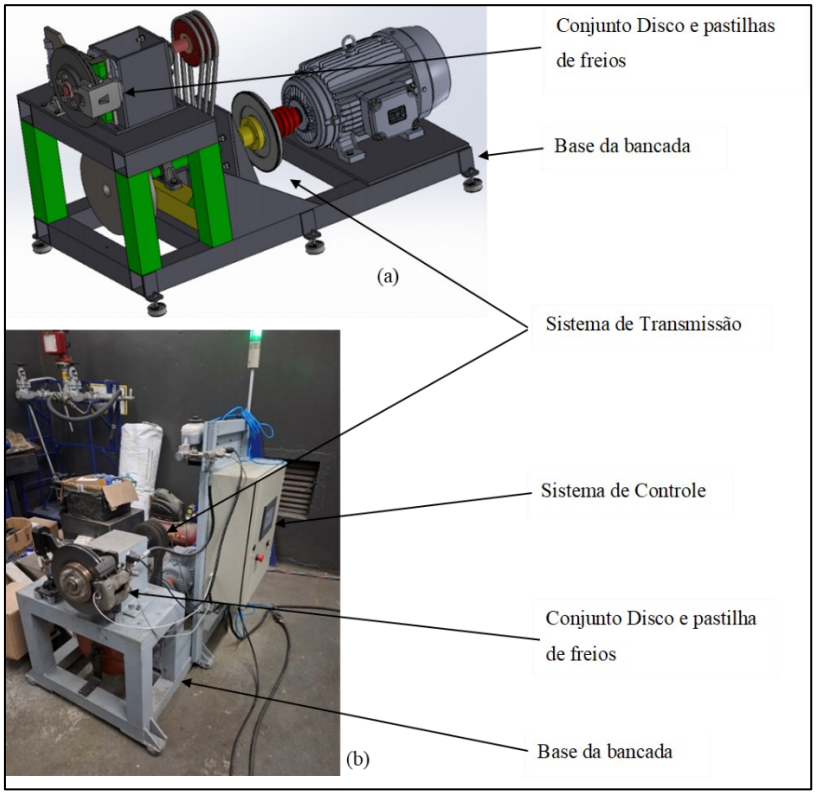
$$T = F_c \cdot B_b \tag{31}$$

Onde:

a) F_c: Força célula de carga (N);
b) B_b: Braço de força da célula de carga (m).

Para complementar a descrição das condições de contorno conceituais e da fase de construção da bancada experimental, a seguir se discorre sobre o racional sobre as etapas construtivas, sua estrutura física, programação e preparação para a fase de ensaios.

Figura 32 – Bancada de Ensaios de Freios: Conceito (a) vs modelo físico (b).



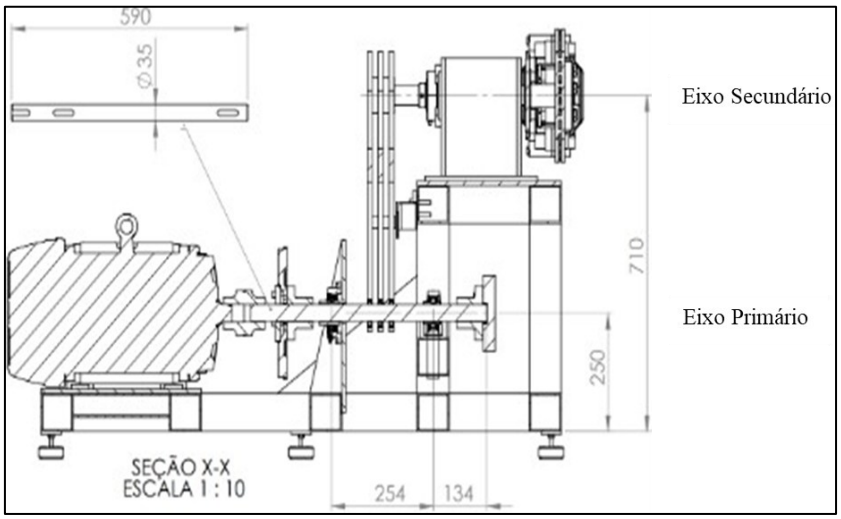
Fonte: Autor, 2025.

Como já relatado, a bancada foi concebida para simular um veículo massa total de 1720 kg, sendo esta, compreendida por um conjunto motor, que é constituído de um motor elétrico que é conectado ao sistema de transmissão através de um acoplamento elástico para amortecimento das vibrações torcionais, que por sua vez conecta o eixo primário de transmissão de rotação e o eixo secundário, onde se encontram montados o conjunto de freios (disco e pastilhas de freios), e sistemas de tomada de dados de rotações, pressões e temperaturas, conforme a Figura 32.

O eixo primário de transmissão está ancorado em duas flanges estruturais, onde estão montados os rolamentos do sistema. Na estrutura entre o primeiro rolamento e o acoplamento elástico, está montada a massa de inercias de rotação. Esta é compreendida fisicamente de um volante de motor de 7,9 kg de massa, o que permitirá, posteriormente com as devidas modificações estruturais, a adaptação de um sistema de embreagem automotiva, conforme

ilustrado a vista lateral da bancada na Figura 33.

Figura 33 – Bancada de Ensaios de Freios em vista lateral por seção.



Fonte: Autor, 2025.

Na segunda seção do eixo primário encontra-se um sistema de pinhões, que por meio de soldagem, passaram a integrar o corpo do eixo a fim de permitir a transmissão de movimento através de correntes com relação de transmissão de rotação i = 2,93 para o eixo secundário, que será caracterizado mais a frente nesta descrição.

O eixo primário tem a sua fixação estrutural ancorada num segundo flange, onde está montado o segundo conjunto de rolamentos. Na parte frontal do eixo primário encontra-se montada a flange para prover fixação ao conjunto de massas de inércia que é compreendida de 3 discos maciços de aço, denominados “massas de inércia de rotação” com 19,29 kg cada uma, totalizando a massa de inércia rotativa frontal de 57,87 kg, a qual se encontra montada em balanço na parte frontal da bancada a fim de promover a facilidade de manutenção ou preparação da bancada para ensaios com diferentes massas de inércia.

A transmissão de rotação entre os eixos é realizada por um conjunto de 3 pinhões soldados no eixo primário com 14 dentes cada um, e de 3 coroas dentadas soldadas numa luva adaptadora montada no eixo secundário, sendo que as coroas possuem 41 dentes cada, perfazendo a relação de transmissão i = 2,93 que é realizada por correntes iguais com 126 elos cada uma. Os componentes da transmissão são ilustrados na Figura 34.

Figura 34 – Kit coroa, pinhão e corrente (sistema de transmissão da bancada) – Kit de transmissão fornecedor Allen, modelo 80357, Fazer 150 14-1045, material da coroa e do pinhão SAE 1045, quantidade de dentes da coroa 41, quantidade de dentes do pinhão 14, quantidade de elos da corrente 126.



Fonte: Autor, 2025.

O eixo secundário é montado na porção superior da bancada, sendo que numa das suas extremidades há um conjunto de coroas para transmissão de rotação para o disco de freios que fica localizado na outra extremidade. O eixo é fixo na estrutura superior através de dois rolamentos montados em flanges de ferro fundido, os quais tem a função de fixação e interface estrutural com a base superior da bancada, conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 – Vista da montagem do flange do rolamento (eixo secundário da bancada).



Fonte: Autor, 2025.

Na parte frontal deste conjunto há um flange em aço que permite a passagem do eixo sem haver contato deste com a haste da balança de medição de torque, na qual se encontram montados de um lado o conjunto de pinça e pastilhas e na outra extremidade a célula de carga.

A haste da balança é provida de um cubo central onde é montado um rolamento que tem a função de permitir o movimento de rotação dela, durante o processo de frenagem, conforme ilustrado na Figura 36.

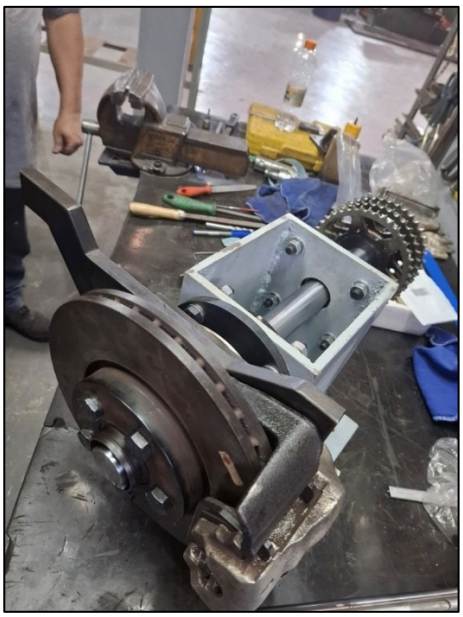
Figura 36 – Vista da montagem da parte frontal do eixo secundário.



Fonte: Autor, 2025.

A rotação deste sistema é limitada por um calço no lado da pinça e na outra extremidade esta função é exercida pela célula de carga, que tem a função de gerar dados sobre a força de frenagem do sistema, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Vista da montagem da região superior da bancada.



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 37, pode-se perceber que na fase de construção da bancada, utilizou-se de um disco de freios usado, do VW Polo e VW T-Cross, apenas para efeitos de prototipagem e dimensionamento das intervenções necessárias para adaptar as peças de interface da montagem, sendo que após a finalização desta etapa do processo, foi instalado um conjunto de disco e pastilhas novos na versão final da bancada, onde se utilizou o disco de freio ventilado dianteiro em ferro fundido cinzento da marca *Hipper* Freios código HF81C de diâmetro 276 mm, utilizado no VW Polo *Highline* e T-Cross 1.0 TSI (de 2018 a 2022), conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Disco de freios VW Polo Highline e TCross (Código HF81C diâmetro ext.276 mm).



Fonte: Autor, 2025.

As pastilhas dianteiras originais do fabricante Bosch (código 0986BB0178) de liga sinterizada com baixo conteúdo metálico (20% a 30%) para o veículo VW Polo Highline e T-Cross 1.0 TSI, ilustradas na Figura 39, foram utilizadas para a montagem final do sistema de freios da bancada, completando assim a montagem de um conjunto original de discos e pastilhas reunindo assim as condições necessárias para o desenvolvimento dos estudos desta tese.

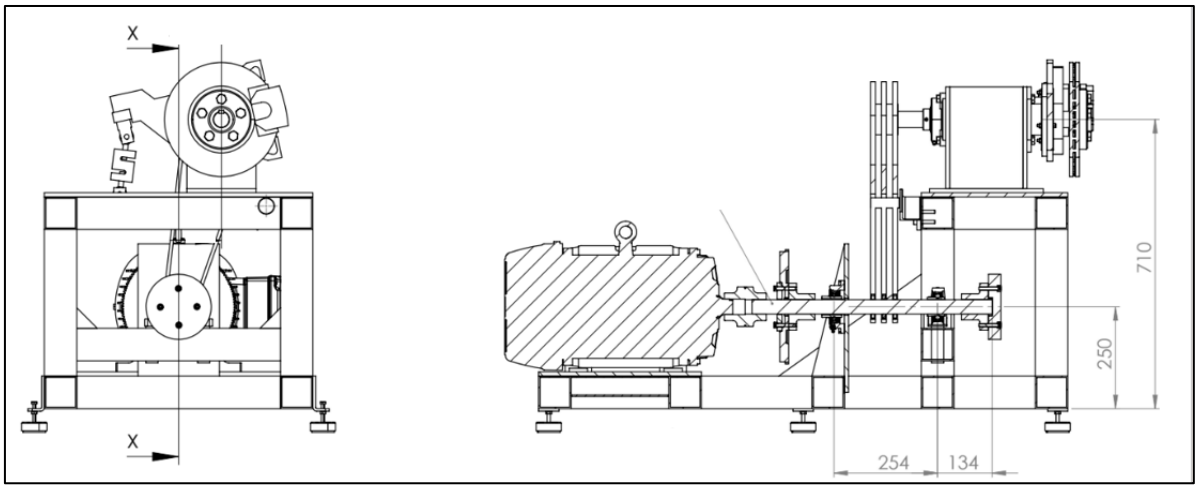
Figura 39 – Pastilhas de freios VW Polo Highline e T-Cross 1.0 TSI - Código 0986BB0178.



Fonte: Autor, 2025.

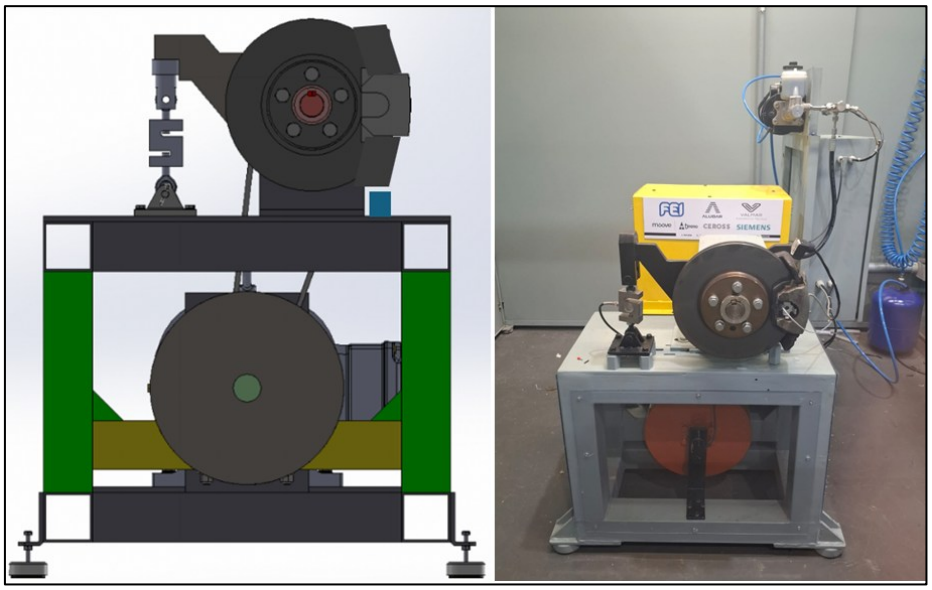
Da Figura 40 a Figura 43, são ilustradas projeções das vistas da bancada de ensaios de freios, permitindo uma ampla visão de seus componentes estruturais e funcionais durante a fase de concepção da bancada, mostrando também, a versão final da bancada em sua fase de concepção e fisicamente finalizada. Tais descrições constituem elementos essenciais para a compreensão do princípio de funcionamento geral do sistema de frenagem automotivo proposto e implementado nesta tese.

Figura 40 – Vista frontal e lateral em corte da bancada (em fase de concepção).



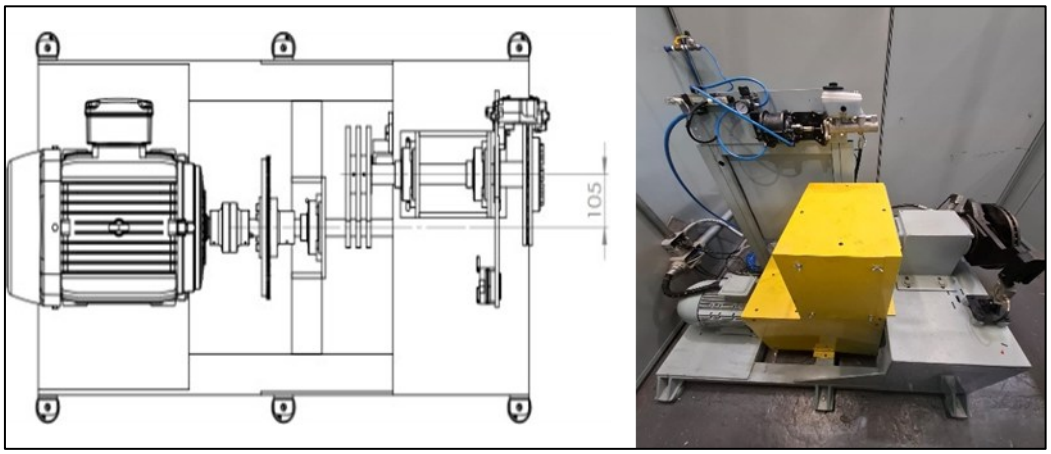
Fonte: Autor, 2025.

Figura 41 – Vista frontal da bancada (projeto a esquerda e execução final a direita).



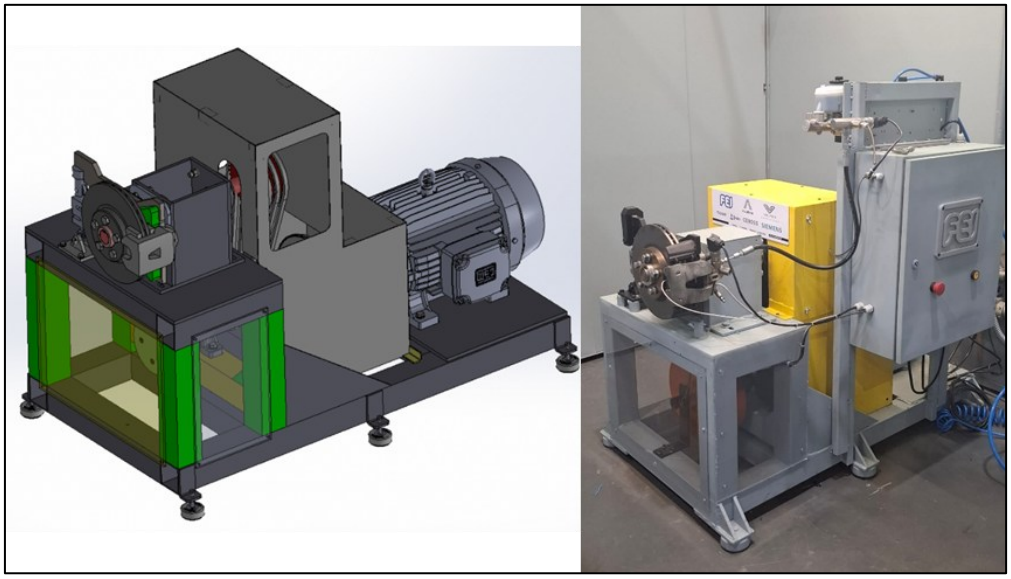
Fonte: Autor, 2025.

Figura 42 – Vista superior da bancada (projeto a esquerda e execução final a direita).



Fonte: Autor, 2025.

Figura 43 – Perspectiva da bancada (projeto a esquerda e execução final a direita).



Fonte: Autor, 2025.

A versão final da bancada, durante sua construção, recebeu melhorias de forma para habilitá-la plenamente as normas ABNT-NR12 para a operação segura de equipamentos elétricos industriais. Com isto, um sistema (tampa de proteção) para prevenir riscos de acidentes operacionais com componentes rotativos foi implementado.

A tampa amarela de proteção do sistema de transmissão é compreendida de chapas de aço revestidas internamente com mantas acústicas para redução de ruídos. A estrutura também conta com tampas de inspeções para facilitar as manutenções periódicas, conforme ilustrado nas Figuras 42 e 43.

4.1.2 Sistemas e componentes elétricos e eletrônicos funcionais da bancada

A bancada deste projeto foi concebida com dois painéis para alimentação elétrica, sendo o primeiro de alimentação para os sistemas de alta potência em 220V trifásico e o segundo de baixa potência (24V) para os sistemas de controle e aquisição de dados operacionais.

O primeiro painel, de alta potência, conta com chave geral, relês, disjuntores, que estão contidos no retângulo em vermelho (linha cheia) na Figura 44 e um inversor de frequência de alta potência Siemens Código 6SE6440-2UC33-7FA1 – *Micromaster* 440 sem filtro 3 com tensão de alimentação 200-240 VAC +10/-10% operando com frequências de rede de 47 a 63 Hz com torque constante em potência de 37 kW (50 hp) e regime de sobrecarga de até 150% limitados a 60 s e 200% limitados a 3 s. No modo de torque quadrático ou variável o inversor de frequência *Micromaster* 440 opera capacidade de potência de 45kW (60 hp). O equipamento tem dimensões de 850 mm x 350 mm x 320 mm com grau de proteção IP20 e segundo o fabricante, opera de forma confiável em ambientes industriais que variam de -10 °C até +50 °C o qual se encontra contido no retângulo em cor verde (linha tracejada), conforme ilustrado na Figura 44.

Figura 44 – Vista do painel para alimentação elétrica da bancada.



Fonte: Autor, 2025.

O painel ilustrado na Figura 44, por ter a função de cabina primária de alta potência do sistema, gera campos eletromagnéticos que podem afetar a funcionalidade dos sistemas de controle dos equipamentos de medição, por isso a cabina de alimentação primária foi alocada

fisicamente na área externa à cabina, sendo que o painel do CLP e demais sistemas para coleta de dados, foram instalado no painel identificado com o logotipo da FEI, ao lado do conjunto rotativo da bancada, conforme ilustrado na Figura 43.

O motor elétrico WEG AL132M com potência de 21kW e rotação máxima de 2950 rpm, conforme ilustrado na Figura 45, é utilizado para a geração de rotação no eixo primário da bancada.

Figura 45 – Motor elétrico WEG AL132M 21 kW @ 2950 rpm.



Fonte: Autor, 2025.

O painel dos sistemas de controle da bancada se encontra ao lado da estrutura base do motor, conforme ilustrado na Figura 46. Esta configuração foi desenvolvida a fim de facilitar a manutenção e reduzir as distâncias entre os módulos de comando e os sistemas de acionamento hidráulico, pneumático e equipamentos de sensoriamento e coleta de dados.

O painel dos sistemas de controle e demais componentes são descritos abaixo e ilustrados na Figura 46, sendo que na parte superior do painel de controle se encontram os seguintes componentes (da esquerda para a direita):

a) disjuntores: Metalflex NX3 de 3 polos e disjuntor N3 3kVA com capacidade de interrupção de curto-circuito de até 3000 Amperes – circunscrito em azul (linha cheia);
b) Delta DVP04AD-SL- Dois módulos de expansão analógicos– cada um com 4 entradas e 4 saídas (I/OS), com faixa de sinal e alarme off-line de 4 a 20mA de 1 a 5V - circunscrito em verde (tracejado);

c) CLP Delta DVP12SE com 08 Entradas e 04 saídas digitais a transístor NPN, máxima expansão: 512 I/Os, capacidade memória: 16K, portas comunicação: USB, RS-485, Ethernet MODBUS TCP e Ethernet/IP RS232 com velocidade de execução: LD: 0,64µs, MOV: 2µs, capacidade para suportar 2 pontos de 100KHz com contadores de velocidade: 2 Entradas de 100KHz - circunscrito em amarelo (traço-ponto);
d) Delta DVP16SM - Módulo de extensão para entradas e saídas digitais com 8 entradas NPN/PNP e 8 saídas a transistor PNP – circunscrito em cinza claro (pontilhado);
e) Delta DVP16SP11Ts - Módulo de extensão para entradas e saídas digitais com 8 entradas NPN/PNP e 8 saídas a transistor PNP - circunscrito em lilá (linha cheia);
f) cartão para 5 conexões Ethernet – circunscrito em amarelo (linha curvada);
g) DPX257 - Relê de parada de emergência 24Vcc- circunscrito em oval branco (linha cheia);
h) Fonte Chaveada WEG 24Vcc 2,5A Bivolt 60W Pss24-W/2,5 – Alimentação para o painel – circunscrito pelo retângulo verde (linha cheia).

Figura 46 – Componentes da parte superior no painel de controle.

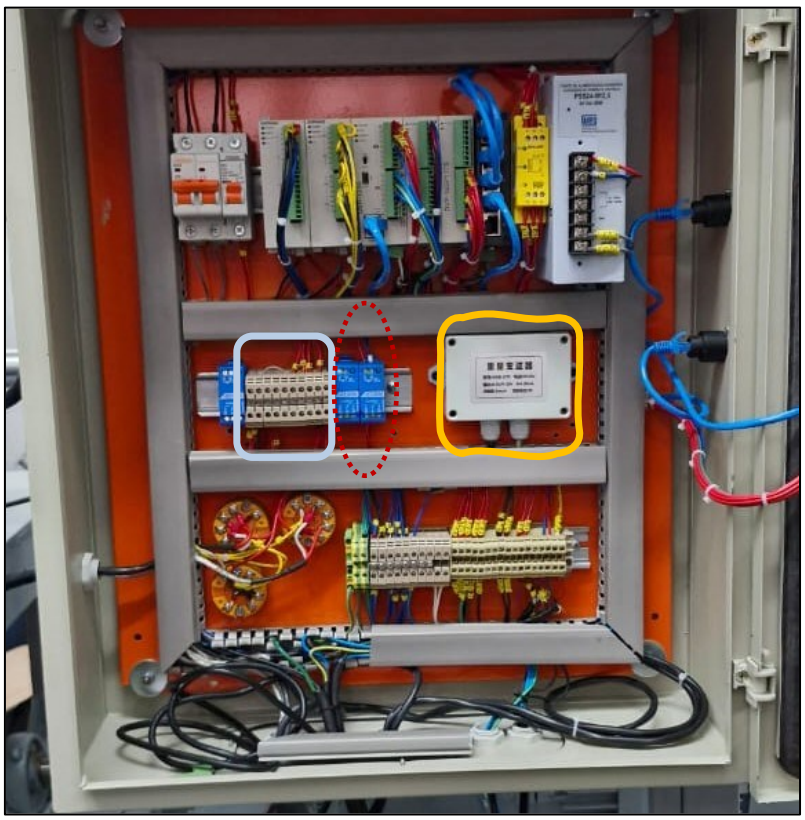


Fonte: Autor, 2025.

Dando prosseguimento a apresentação do painel de controle, passa-se a discorrer acerca dos componentes que se encontram instalados na parte intermediária do painel, neste caso a Figura 47 é utilizada para exploração das especificações dos componentes (da esquerda para a direita):

a) relê reserva – Sem uso e não marcado na Figura 47;
b) bornes de passagem para os fios condutores de eletricidade – circunscrito em branco (linha cheia);
c) relês para acionamento da eletroválvula através do solenoide do cilindro pneumático - circunscrito em oval vermelho (linha pontilhada);
d) módulo da célula de carga 24V - circunscrito em amarelo (linha curvada).

Figura 47 – Painel de controle (componentes da parte intermediária).



Fonte: Autor, 2025.

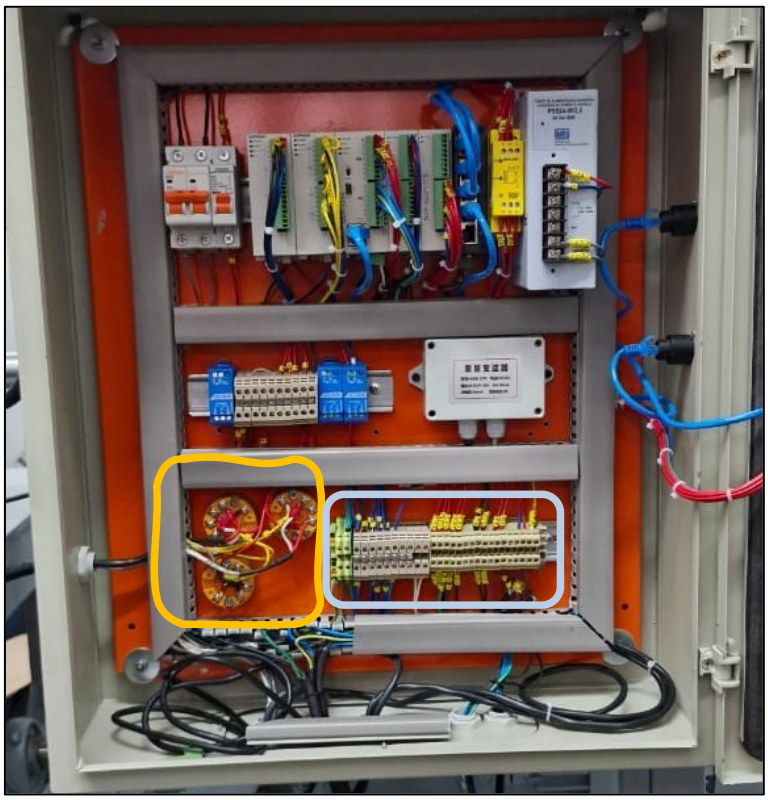
E por fim, segue-se com a apresentação do painel de controle, discorrendo-se acerca dos componentes que se encontram instalados na parte inferior do painel, neste caso a Figura 48 é utilizada para exploração das especificações dos componentes (da esquerda para a direita):

a) 3 Transmissores de sinal de temperatura Att1 Pt100 Coel 4 A 20 – Para termopares Pt100 com range -200°C a 800 °C, suporta termopares dos tipos B, E, J, K, N, R, S,

T com sinal de tensão de –10 mV a +70mV; potenciômetro 10–400Ω (2, 3 ou 4 fios) e 10–4000Ω (2 fios); corrente 4–20mA (2 fios), resolução 2µA, tempo de resposta sem fio 200ms, temperatura de operação –40°C a +85°C e grau de proteção IP20 - circunscritos em amarelo (linha curvada);

b) bornes de passagem para os fios condutores de eletricidade – circunscrito em branco (linha cheia) - circunscritos em amarelo (linha curvada).

Figura 48 – Painel de controle (componentes da parte inferior).



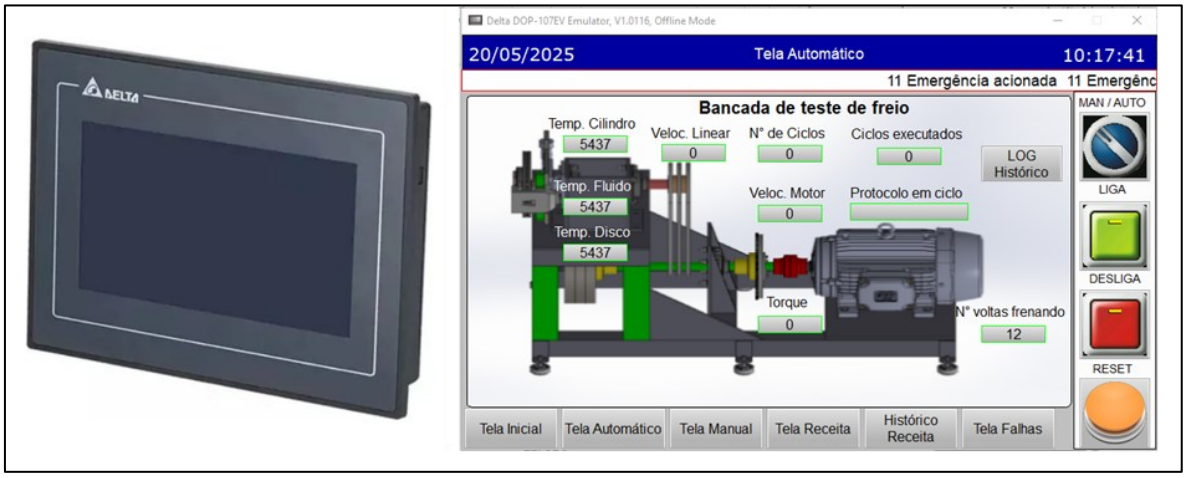
Fonte: Autor, 2025.

Por fim, para complementar as instalações funcionais da bancada, foi utilizado a Interface Homem Máquina (IHM) Delta DOP-107EV com monitor de 7 polegadas, 2 portas com serial e uma porta Ethernet, conforme ilustrado na Figura 49 conforme especificações:

a) IHM *Touch Screen*;
b) Display: 7 polegadas TFT LCD (65535 *colors*);
c) Resolução da tela: 800 x 480 pixels;
d) Brilho da luz de fundo: LED *Back Light*;
e) Area de display: 154.08 x 85.92 mm;
f) Flash ROM: 256Mbytes;

g) RAM: 256 Mbytes;
h) MCU: ARM Cortex-A8 (800 MHz);
i) USB: 1 USB Slave Ver 2.0/1 USB Host Ver 2.0;
j) Porta serial COM1: RS-232/RS-485 (suporta controle de fluxo de *hardware*);
k) Porta serial COM2: RS-422/RS-485;
l) Porta Ethernet: 1 Port, 10 / 100 Mbps auto detection (built-in isolated circuit) *2;
m) Tensão de operação: 24VDC;
n) Potência consumida: 10.4W máximo;
o) Grau proteção: IP65/NEMA4.

Figura 49 – IHM Delta (tela de controle operacional da bancada).



Fonte: Autor, 2025.

A bancada conta ainda com outros componentes eletrônicos que são utilizados para fins de sensoriamento e aquisição de dados operacionais, e pela sua relevância, como já explicado no início deste capítulo serão explorados de forma específica num capítulo dedicado a fase experimental desta tese.

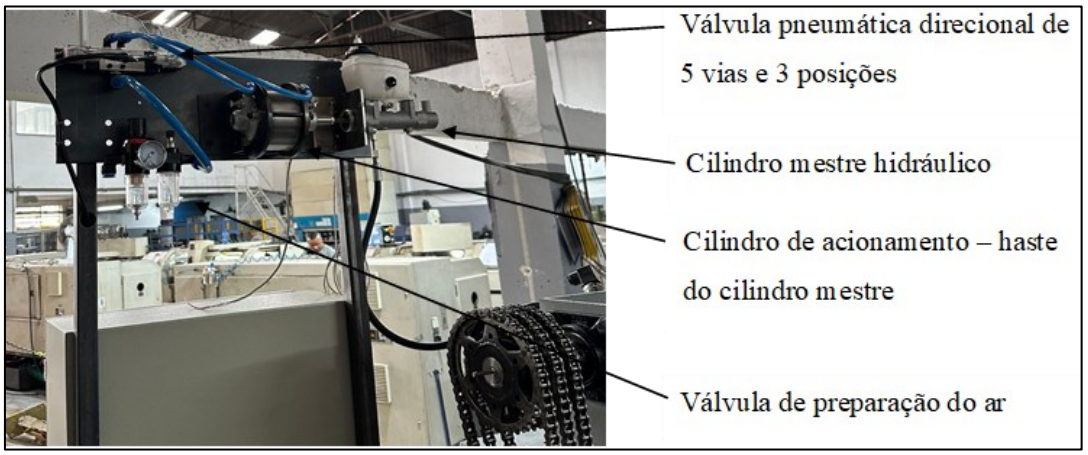
Portanto, pode-se seguir a análise e explanação dos aspectos funcionais da bancada através do último macrossistema denominado “Sistemas hidráulicos, pneumáticos e instalações laboratoriais" os quais têm interfaces com o meio externo, ou infraestrutura externa, para a plena instalação funcional da bancada.

4.1.3 Sistemas hidráulicos, pneumáticos da bancada

Os sistemas de interface e controle hidráulicos e pneumáticos são utilizados como meios

para transformar os comandos do condutor, neste caso representado pela programação do IHM, em movimentos mecânicos para promover a compressão das pastilhas contra a superfície do disco de freios. Para isto, concebeu-se um sistema composto pela integração em série de subsistemas pneumático e hidráulico. O sistema pneumático é alimentado por ar comprimido, o qual é primeiramente direcionado a uma unidade de preparação. Esta unidade é constituída por um conjunto de filtro, regulador de pressão com manômetro e lubrificador, assegurando, assim, o tratamento adequado do fluido pressurizado. A instalação do sistema pneumático e hidráulico da bancada é ilustrado na figura 50 abaixo.

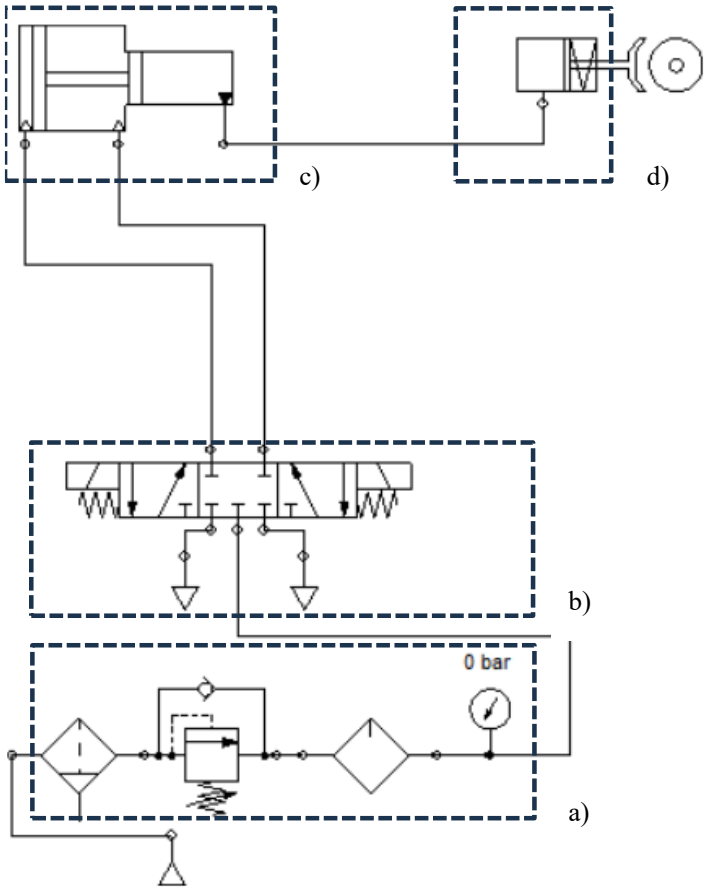
Figura 50 – Painel com sistema pneumático e hidráulico.



Fonte: Autor, 2025.

O funcionamento do sistema se dá quando o fluxo de ar da rede industrial é conduzido através dos condutos para a válvula de preparação do ar, que é dotada de filtro e reservatório para separação da umidade, em seguida o ar é conduzido para a válvula pneumática direcional de 5 vias e 3 posições. Esta válvula possui acionamento por duplo solenoide, configuração de centro fechado e retorno por mola. A função desta válvula é controlar o movimento do cilindro de acionamento pneumático. A haste deste cilindro, por sua vez, é responsável por promover o acionamento mecânico do cilindro mestre hidráulico, conforme ilustrado na Figura 51:

Figura 51 – Esquema para visualização geral do sistema pneumático e hidráulico.



Fonte: Autor, 2025.

a) Unidade de Preparação de Ar: Filtra, lubrifica e regula a pressão do ar comprimido;
b) Válvula Direcional 5/3 Vias: Controla o acionamento do ar para o atuador pneumático;
c) Cilindro Pneumático: Converte a energia do ar comprimido em movimento mecânico, acionando o sistema hidráulico;
d) Pinça de freios dotada de voluta e êmbolo para fluído hidráulico: Converte a pressão hidráulica do fluído de freios em energia mecânica para o acionamento do êmbolo que por sua vez, comprime as pastilhas contra a superfície do disco de freios.

A integração de todos os sistemas da bancada é realizada através de componentes para a aquisição de dados funcionais tanto da bancada quanto dos componentes e sistemas estudados como descrito em seguida.

4.1.4 Sistemas e equipamentos de medição, monitoramento e aquisição de dados

A bancada foi concebida com dois eixos principais instalados no sistema de transmissão, para assegurar o perfeito monitoramento da transferência do torque de maneira uniforme mantendo a relação de transmissão conforme descrito no item 4.1.1, foram instalados encoders incrementais OMRON E6B2-CWZ5B na extremidade de cada eixo.

Figura 52 – *Encoder* incremental para tomada de dados e monitoramento da rotação – Fabricante Omron; modelo E6B2-CWZ5B; tensão de alimentação 12 – 24V; 1000 pulsos por rotação.



Fonte: Omron, 2023.

Para o monitoramento térmico do fluido de freio empregado na bancada, utilizou-se um sensor de temperatura industrial, com conexão do tipo baioneta. O dispositivo opera com um elemento sensor Pt100, selecionado em função de suas características de alta linearidade e precisão no intervalo de temperaturas aplicáveis nos ciclos de ensaios planejados nesta pesquisa.

Com faixas de operação especificadas entre -20°C a 350°C, para o termopar de coleta de dados de temperatura do fluído no cilindro mestre e de -30°C a 180°C, para o termopar de coleta de dados de temperatura do fluído na pinça, ambos os sensores atendem integralmente aos requisitos para o monitoramento de temperatura desejado. A robustez destes termopares e sensores de pressão são particularmente relevantes durante ciclos com acionamentos repetitivos, nos quais tanto a dissipação térmica no fluido quanto a variação do perfil de pressões são os objetos do estudo relativos aos impactos na eficiência e na estabilidade do sistema de freio. Portanto, para as tomadas de pressão utilizou-se o sensor de pressão ilustrado na Figura 56 e para as tomadas de temperatura do fluído de freios e do conjunto disco e pastilhas de freios, foram instalados termopares conforme descritos nas Figuras 53 a 55 a seguir:

Figura 53 – Sensor de temperatura do fluido de freios no cilindro mestre – Fabricante Resispar; Termopar Tipo J com baioneta; tipo de medição Pt100; faixa de temperatura -20 a 350ºC (+/- 1,5ºC).



Fonte: Resispar.

Figura 54 – Sensor de temperatura do fluido de freios na voluta da pinça de freio – Fabricante IFM *electronic*; modelo TS2759; precisão DIN EN60751; classe A+/- (0,15 + 0,002 x |t|) ºC; alcance de medição -30 a 180ºC; cabo com 2m revestido com silicone; conexão M12.



Fonte: IFM Electronic.

Figura 55 – Sensor de temperatura do disco de freios – Fabricante Safiratec; Termopar tipo K com haste de 6mm; tipo de medição PT100; faixa de temperatura 0ºC a +400ºC (+/- 1,1ºC; comprimento 1m.



Fonte: Safiratec Ltda.

Figura 56 – Sensor de pressão do fluído de freios no cilindro mestre e pinça do disco de freios – Fabricante Gefran; modelo KSNEEB25DMV2130X000U00; faixa de medição 0 a 250 bar; faixa de incerteza +/-0,5% FS típico; sinal de saída 0 a 10 Vcc; grau de proteção IP65.



Fonte: Gefran S.p.A.

A força aplicada durante o acionamento do sistema de freios na bancada é monitorada e registrada através de uma célula de carga do tipo tração. O equipamento foi selecionado em função de sua capacidade de prover medições precisas e confiáveis para a aplicação.

A célula de carga, conforme ilustrado na Figura 57, possui uma capacidade nominal de 1000 kg (aproximadamente 9810 N), o que atende plenamente às exigências requeridas para a simulação de frenagens em veículos leves e médios. Adicionalmente, o transdutor, segundo o fabricante, suporta uma sobrecarga segura de até 150% de sua capacidade nominal, o que proporciona uma margem de segurança adicional para a integridade do sistema durante a execução de ensaios mais severos.

Figura 57 – Célula de carga tipo Z para medição de tração da força de frenagem – Capacidade 1000kg, fluência (30 min): <+/-0,02% da escala completa; não linearidade: <0,02% da escala completa; histerese <0,02% da escala completa; Faixa de temperatura: operacional -20ºC a +60ºC; faixa de temperatura compensada -10ºC a+50ºC; sobrecarga segura 120% da capacidade; impedância de entrada: 400+/-10 Ohms; impedância de saída 350 +/- 5 Ohms; impedância de isolamento >5000 MOhms; excitação: recomendação 10Vcc/CA; excitação máxima 20Vcc/CA.



Fonte: Digital Scale Co. Ltd.

4.1.5 Instalações laboratoriais e descrição geral de funcionamento

As instalações laboratoriais e a configuração física da bancada de freios foram concebidas de modo a garantir a segurança operacional e a manutenção ergonômica do sistema. As áreas de circulação adjacentes aos equipamentos foram projetadas de forma a manter a acessibilidade com vias de acesso e saída com largura superior a 1,2 metros.

O layout e o espaçamento entre os componentes do equipamento foram dimensionados de forma a permitirem a execução adequada das rotinas de operação, manutenção, preparação e abastecimento, minimizando riscos aos operadores e a terceiros, conforme ilustrado na Figura 58. O piso da área de instalação foi configurado de forma a mitigar riscos de tropeço ou acidentes, apresentando-se nivelado e com resistência estrutural compatível às cargas aplicadas.

Figura 58 – Instalação física (Bancada de Ensaios de Freios).



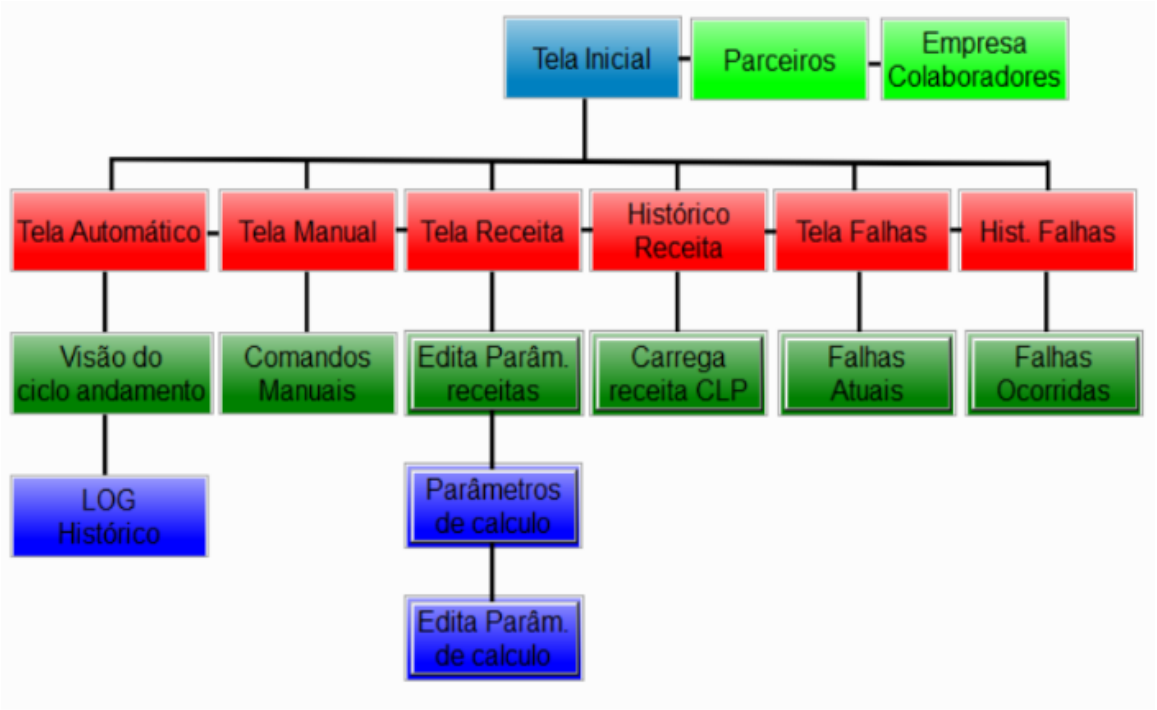
Fonte: Autor, 2025.

Todos os dispositivos alocados no entorno da bancada são estritamente necessários para o funcionamento correto, sendo que as instalações de infraestrutura (elétrica, hidráulica e pneumática) foram desenvolvidas de forma a preservar a integridade física dos operadores, como também ilustrado na Figura 58. Com a descrição completa da bancada, seus sistemas e componentes abordados neste capítulo, traz-se agora uma abordagem do seu funcionamento em linhas gerais.

4.1.6 Funcionamento e lógica de programação da bancada

A bancada simula o sistema de frenagem de veículos por meio de um controle preciso de velocidade e força, permitindo a análise e a geração de dados em tempo real do comportamento dinâmico e térmico dos componentes sob diferentes condições operacionais. O ciclo de ensaio inicia-se com a aceleração do sistema até uma velocidade linear equivalente a 80 km/h para um veículo VW Polo com conjunto de roda e pneus 205/55R15 com raio dinâmico de 0,30325 m. O controle e a estabilização dessa velocidade são realizados automaticamente por um sistema de controle eletrônico que gerencia a potência do motor de acionamento. O ordenamento da interface com o usuário foi programado de forma estruturada conforme ilustrado na Figura 59. A lógica da programação dos sistemas de controle da bancada foi desenvolvida conforme descrição geral a seguir.

Figura 59 – Estrutura das telas para interface com o usuário.



Fonte: Autor, 2025.

O inversor de frequência e o módulo de controle lógico programável (CLP) se comunicam por meio das saídas digitais (do CLP) e entradas digitais (do inversor de frequência). São utilizadas 3 portas sendo a DI5, DI6 e DI7 do inversor configuradas em OFF 1, OFF 2 e OFF 3, respectivamente.

A configuração do inversor é programada para uma frequência fixa, de 72 Hz com rampa de aceleração de 10s seguindo a norma NBR 6143. O inversor conta também com a configuração de *flying start* para o motor voltar girar sem precisar parar para recomeçar.

Partida do motor: para a partida do motor se dá um pulso na entrada digital OFF1 com OFF2 e OFF3 previamente "ligados". O inversor pode ter 2 tipos de paradas, uma parada controlada e outra livre (por inércia). Porém, exceto em caso no qual a porta da cabina de operação seja aberta com a bancada em regime de operação em automático, a programação preconiza a parada com inércia. Para essa parada precisa desligar o OFF2 e mantê-lo desligado.

Em casos em que a porta da cabina seja aberta quando a bancada estiver em operação no modo automático, o programa executa a parada imediata dos ensaios com a frenagem automática do disco de freios. Para o reinício do ciclo, liga OFF2 e pulsa OFF1. O monitoramento contínuo da velocidade do sistema é assegurado pelo uso de transdutores rotativos (*encoders*). Quando o comando de frenagem é ativado, o sistema de controle emite

um sinal para o circuito pneumático, que pressuriza o cilindro mestre. O fluido hidráulico pressurizado é então direcionado para a pinça de freio, forçando as pastilhas contra o disco de freio. O contato gera o atrito necessário para a desaceleração, produzindo o torque de frenagem.

4.2 ENSAIOS QUIMICOS, LABORATORIAIS E DE BANCADA – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS DE FLUÍDO DE FREIOS

Para o estudo do comportamento dos fluidos de freios, e ensaios na bancada o pesquisador juntamente com a empresa Tirreno elaborou um plano detalhado de preparo de amostras em laboratório químico para a produção de amostras protótipos para os fluidos de freios DOT3, DOT4, DOT4 LV classe 6 e DOT5.1 com diferentes taxas de contaminação por umidade (de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% e 5% m/m). Com este plano, a empresa produziu as amostras na linha de produção, com a finalidade de realização de ensaios em bancada com diferentes taxas de contaminação dos fluídos.

4.2.1 Processo e método - abastecimento e flushing do sistema hidráulico para ensaios

Amostras dos fluído de freios DOT3, DOT4, DOT4 LV classe 6 e DOT5.1 foram produzidas e todas foram documentadas e identificadas pelo fabricante Tirreno, conforme exemplos ilustrados nas Figuras 60, 61 e 62.

Figura 60 – Amostras DOT3 – exemplos 1% e 5% (%m/m) contaminação por umidade.



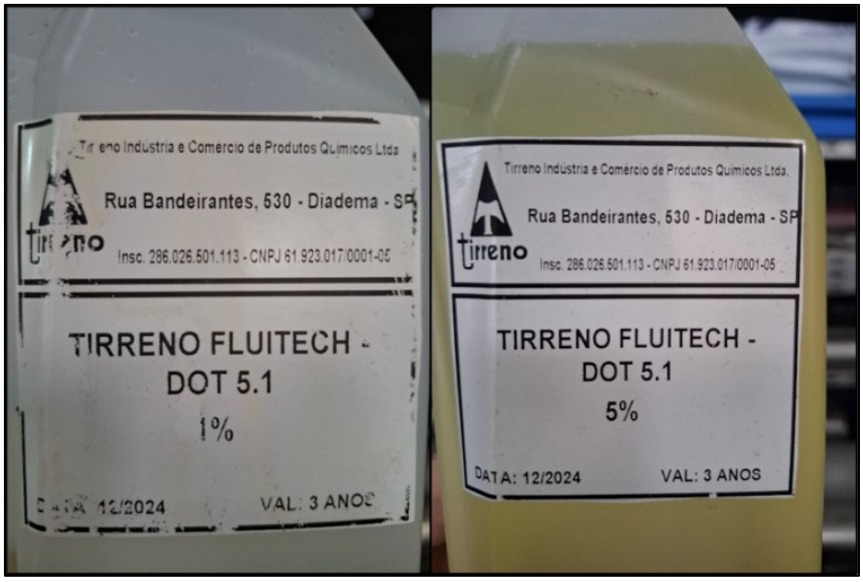
Fonte: Autor, 2025.

Figura 61 – Amostras DOT4LV – exemplos 1% e 5% (%m/m) contaminação por umidade.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 62 – Amostras DOT5.1 – exemplos 1% e 5% (%m/m) contaminação por umidade.



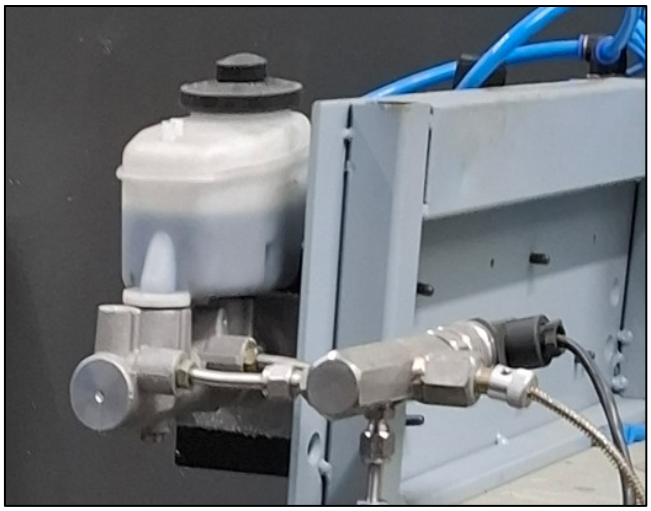
Fonte: Autor, 2025.

Os fluidos selecionados para a fase experimental, previamente preparados pelo fabricante, conforme ilustrado nas três últimas figuras, são utilizados para o enchimento do sistema hidráulico da bancada para o acionamento do sistema de freios, conforme descrito no item 4.2.2 a seguir.

4.2.2 Processo e método - abastecimento do sistema hidráulico para ensaios

O processo de abastecimento de fluido de freios na bancada, semelhante ao processo no veículo, consiste após a retirada da tampa do reservatório (ilustrada na Figura 63), no preenchimento do sistema com o fluído de freios através do bocal de alimentação do reservatório de forma controlada. Este procedimento deve garantir que todos os condutos (mangueiras, cilindros e componentes internos) estejam completamente preenchidos e livres de ar retido no circuito.

Figura 63 – Reservatório de fluído de freios branco com tampa na cor preta.



Fonte: Autor, 2025.

Um sistema de freios livre de bolhas de ar enclausuradas no sistema é fundamental garantir que a propriedade de incompressibilidade do fluído de exerça plenamente a transmissão de forma eficiente para que a força imprimida no sistema de comando, através do cilindro mestre montado que é acionado pelo cilindro pneumático sobre o painel de controle da bancada, transmita a força hidráulica através dos condutos até a voluta da pinça de freios, que aciona o conjunto de pastilhas.

O processo pode ser descrito pelas seguintes etapas:

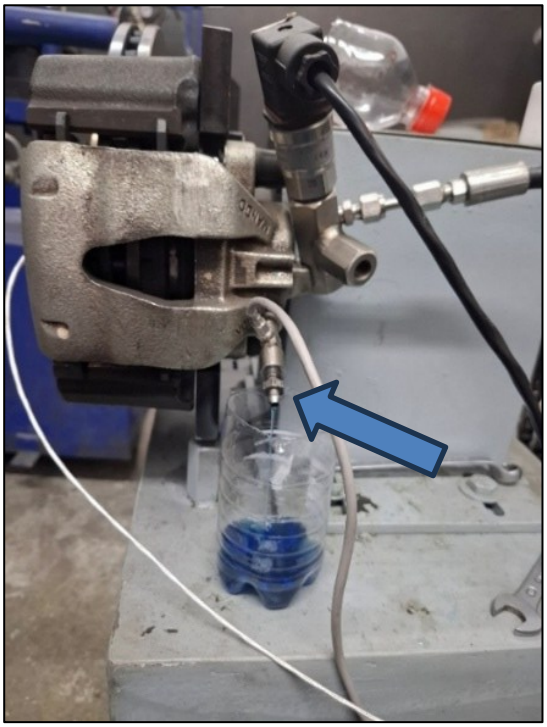
a) Preparação do sistema: O reservatório de fluido deve ser limpo com um pano em sua superfície externa e a tampa deve ser retirada. O procedimento deve ser realizado em local isento de umidade ou poeira para preservar a integridade do fluido e dos componentes internos do sistema;
b) Enchimento do reservatório: O fluido é colocado no reservatório (o qual alimenta

todo o circuito) até atingir o nível recomendado. Deve-se aguardar o tempo necessário para que o fluido escoe e preencha todo o sistema hidráulico;

c) Purga do sistema (remoção de ar): Após o enchimento do sistema, com a estabilização do nível do fluído no reservatório, a tampa do reservatório deve ser montada e a válvula de sangria alocada no dreno da pinça de freio deve ser aberta para permitir a saída de ar aprisionado no sistema. É recomendado a utilização de um recipiente para a coleta do fluído que sairá misturado com as bolhas de ar, conforme ilustrado na Figura 64.

Com o auxílio do acionamento do cilindro pneumático do cilindro master, através do painel de controle da bancada em modo manual, pode-se acionar diversas vezes os botões “Avança” e Recua” para bombear o ar remanescente no sistema para a válvula de sangria. Pode-se observar a ausência de ar no sistema quando o valor da pressão aplicada no fluído se manter estabilizada no campo “Pressão Hidráulica” no painel de controle da bancada, conforme ilustrado na Figura 65.

Figura 64 – Válvula de sangria.



Fonte: Autor, 2025.

Figura 65 – Painel de controle da bancada em modo manual mostrando a pressão hidráulica.



Fonte: Autor, 2025.

Em caso de dificuldades para a desaeração do sistema de freios da bancada, o operador poderá soltar parcialmente as conexões das mangueiras para facilitar a vazão de ar para fora do sistema. Ao final do processo, todas as conexões deverão estar devidamente apertadas para manter a plena vedação do sistema.

Por fim, o nível de fluído de freios do reservatório deverá ser completado de acordo com a marcação indicadora de nível (no nível máximo) no corpo do reservatório e a tampa do reservatório deverá ser montada para tornar o sistema hermeticamente fechado. Como isto, a bancada estará preparada para os ensaios.

Ao longo dos ensaios, em caso de vazamentos ou redução do nível do fluído no reservatório, o fluído deverá ser reposto apenas com fluído de mesma especificação para assegurar a repetibilidade e confiabilidade dos ensaios e dos dados gerados a partir destes.

Em casos em que se deseja realizar ensaios com fluídos com diferentes características o procedimento de "*flushing*" (ou descontaminação do sistema – em tradução livre do inglês) e troca de fluído descrito no próximo item deste capítulo deverá ser seguido.

4.2.3 Processo e método – flushing do sistema hidráulico para trocas de fluídos

A realização de ensaios com fluídos de diferentes especificações ou diferentes propriedades a serem estudadas, requer um cuidado especial para que não haja contaminação do fluido em estudo com resíduos do fluído anterior. O processo de flushing (ou lavagem do circuito hidráulico) conduzido de acordo com as melhores práticas, visa assegurar que as

características físico-químicas e reológicas estudadas se mantenham preservadas para a correta aquisição de dados científicos do que se deseja pesquisar.

Para a troca de fluídos de freios de diferentes especificações na bancada, é imperativo a realização de procedimentos de flushing do sistema hidráulico. O flushing de um sistema de freios consiste na remoção completa do fluido existente e na troca por um novo fluido no circuito hidráulico, de modo a eliminar resíduos, contaminantes e incompatibilidades químicas entre fluidos de diferentes especificações. Esse procedimento é essencial em ensaios, nos quais a pureza do fluido e a repetibilidade das condições experimentais são fatores chave para a confiabilidade e repetibilidade dos ensaios e resultados. O objetivo do processo de flushing é garantir que o sistema hidráulico esteja preenchido exclusivamente com o novo fluido de freio, sem interferência significativa do fluido previamente utilizado.

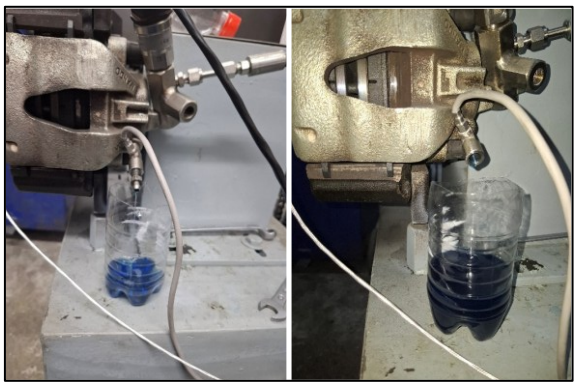
O processo de flushing pode ser descrito pelas seguintes etapas:

a) Preparação do sistema: O reservatório de fluido deve ser limpo com um pano em sua superfície externa e a tampa deve ser retirada. O procedimento deve ser realizado em local isento de umidade ou poeira para preservar a integridade do fluido e dos componentes internos do sistema;
b) Drenagem total do sistema: A tampa do reservatório deve ser retirada e preservada em local limpo, livre da presença de umidade ou partículas;
c) A válvula de sangria alocada no dreno da pinça de freio deve ser inicialmente aberta para promover que o fluido utilizado no flushing tenha pleno contato com todas as superfícies internas do sistema;
d) Numa segunda etapa a válvula de sangria deverá ser totalmente retirada para garantir a plena drenagem do fluido de freios do sistema, conforme ilustrado na Figura 66;
e) Volume morto do reservatório – Utilizar uma seringa com mangueira de borracha natural para a aspiração do fluído remanescente nas cavidades do reservatório, conforme ilustrado na Figura 67;
f) Mangueiras e conexões – Soltar as conexões das mangueiras para assegurar a plena drenagem destes condutos;
g) Proceder a montagem das conexões e mangueiras para prover plena vedação;
h) Fluido novo – utilizar o novo fluido para lavagem do sistema, enchendo o reservatório e deixando todo o volume escorrer pela válvula de drenagem;
i) Repetir as etapas “c”, “d”, “e” e “f” com o fluído novo;
j) Opcionalmente, retirar amostras do fluido novo no sistema, recomenda-se coletar amostras (provas e contraprovas) através do dreno e do reservatório para posteriores

análises químicas;

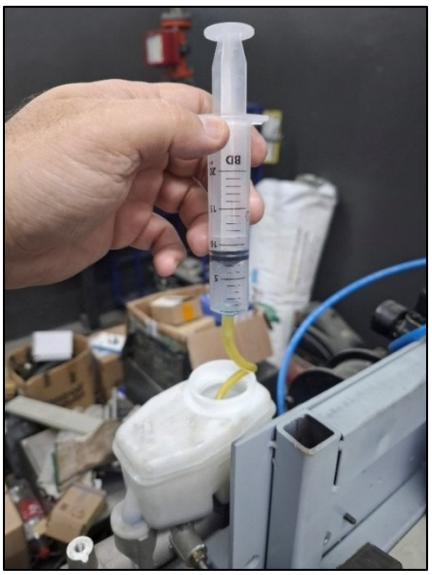
k) Proceder com a montagem de todos os componentes do sistema e executar o processo de desaeração conforme descrito no item 4.2.2.

Figura 66 – Válvula de sangria desrosqueada no início do flushing (lado esquerdo) e totalmente retirada no final do flushing e drenagem (lado direito).



Fonte: Autor, 2025.

Figura 67 – Volume morto do reservatório – extração de fluído com seringa e mangueira de borracha natural.



Fonte: Autor, 2025.

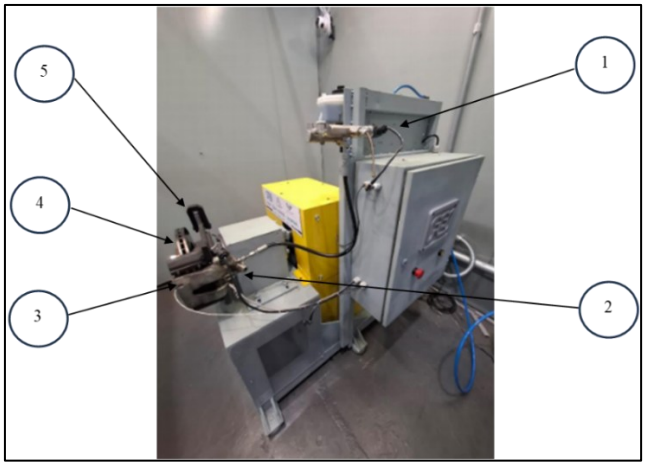
O processo descrito acima pode ser repetido diversas vezes, dependendo dos requisitos em estudo. Para efeitos de confiabilidade e avaliação do método, pode-se sob demanda registrar o volume total de fluido utilizado no flushing, a quantidade de ciclos de flushing realizados e os parâmetros físico-químicos avaliados.

4.2.4 Ensaios na bancada de freios

O processo de execução dos ensaios na bancada é descrito nesta seção onde as seguintes variáveis são monitoradas e tem seus dados coletados de forma síncrona em tempo real a uma taxa de aquisição de 250ms, conforme *layout* ilustrado na Figura 68, permitindo desta forma, uma análise abrangente do desempenho do sistema. As 9 Variáveis Monitoradas são:

a) temperatura do fluido na saída do cilindro mestre (1);
b) pressão do fluido na saída do cilindro mestre (1);
c) temperatura do fluido na voluta da pinça de freio (2);
d) pressão do fluido na voluta da pinça de freio (2);
e) temperatura no disco de freio (4);
f) velocidade linear do sistema, derivada da rotação do disco e parâmetros dinâmicos e dimensionais do conjunto roda e pneu simulado (4);
g) velocidade angular do disco de freios (4);
h) torque de frenagem (5);
i) número de voltas do disco de freios durante a frenagem (4).

Figura 68 – Localização Física da Instrumentação.



Fonte: Autor, 2025.

O processo de ensaios pode ser especificado utilizando diferentes perfis de desaceleração para simular as mais variadas condições de uso, como por exemplo:

a) Ciclo de Ensaio Acelerado: 200 ciclos de frenagens de emergência, com redução direta e abrupta da velocidade de 80 km/h para 5 km/h em condições pré-estabelecidas para a pressão do fluído no cilindro mestre e na pinça;

b) Ensaio Escalonado: Simulação de frenagens escalonadas para análise do comportamento térmico e mecânico sob diferentes intensidades de carga, com desacelerações progressivas pré-programadas, condições pré-estabelecidas para a pressão do fluído no cilindro mestre na pinça, em múltiplos estágios. Como por exemplo o Ensaio com início de frenagem - velocidade equivalente do veículo 80 km/h:
   - etapa 1 - frenagem de 80 km/h para 70 km/h;
   - etapa 2 - retomada de velocidade para 80 km/h;
   - etapa 3 – frenagem de 80 km/h para 60 km/h;
   - repetição das etapas acima 200 vezes (ciclos).

Em todo o processo de ensaio os sistemas embarcados na bancada, são gerenciados por intermédio de um Controlador Lógico Programável (CLP), que realiza a aquisição dos sinais dos sensores, o controle do motor e o acionamento dos sistemas pneumáticos e hidráulicos. Os dados coletados são registrados em intervalos de amostragem pré-programados pelo pesquisador para que num segundo momento, os dados acumulados possam ser exportados para análise posterior.

O sistema de segurança da bancada ainda inclui um protocolo de proteção térmica: caso a temperatura do disco atinja um valor limite de segurança (estabelecido em 600°C com base na norma ABNT NBR6143), o sistema é automaticamente pausado para permitir o resfriamento controlado dos componentes, prevenindo danos ao equipamento e garantindo a integridade dos operadores e do equipamento.

A descrição completa do equipamento desenvolvido para a aquisição de dados experimentais para esta tese, conforme descrito neste capítulo, permite a explanação detalhada do plano de ensaios e metodologia para tratamento dos dados coletados, de forma a permitir uma análise crítica, contextualizada e estruturada para a avaliação e discussão dos resultados à luz do conhecimento gerado neste trabalho científico. Portanto, no próximo capítulo os processos e métodos científicos de ensaios, geração e tratamento de dados, são descritos detalhadamente.

4.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS MULTIVARIADOS

O processamento de sinais multivariados desempenha um papel fundamental na engenharia moderna e no diagnóstico automotivo, permitindo a extração de informações

cruciais a partir de dados brutos de sensores para o monitoramento da integridade de sistemas complexos (Shah; Mittal; Lotwin, 2025). Essa metodologia envolve etapas essenciais de pré-processamento, como filtragem (ex: filtragem de Wiener) e redução de ruído, para garantir que os dados estejam prontos para análises mais profundas (Niveditha et al., 2023; Shah; Mittal; Lotwin, 2025). A aplicação de métodos estatísticos é tradicionalmente utilizada para a redução de dimensionalidade e visualização de conformidade em componentes e materiais (El Wardi et al., 2025; Ilicheva et al., 2025; Raadnui; Intasonti, 2025). Além disso, métodos lineares e não lineares serão utilizados como técnicas de classificação para maximizar a separação entre categorias distintas, como diferentes tipos de detritos em lubrificantes ou segmentos de sinais de voz (Niveditha et al., 2023; Raadnui; Intasonti, 2025).

A abordagem proposta e desenvolvida aqui através de estudos estatísticos multivariados forma utilizada para a análise de trepidação veicular (Gregori, 2016), mas nesta tese, em um contexto inédito, o modelo é aplicado para a predição da qualidade de fluídos de freios.

4.3.1 Sinais Multivariados

A variação do conjunto de sinais emitidos por um sistema de frenagem automotivo é um fenômeno complexo e inerentemente multifatorial, influenciado por variáveis dinâmicas como tipo e qualidade do fluído de freios, pressão do fluído nos condutos, temperaturas de operação dos componentes e subsistemas que compõem o sistema de freios.

Fatores que influenciam a qualidade do fluído de freios como taxa de contaminação por umidade, exposição a condições climáticas como chuvas e enchentes, associados com os diversos fatores operacionais do veículo, podem influenciar na qualidade do tempo de resposta do sistema.

A avaliação da qualidade e do estado de contaminação de fluidos de freio em sistemas automotivos é tradicionalmente realizada por meio de abordagens indiretas ou baseadas em manutenção preventiva. Em veículos convencionais, a substituição do fluido de freio é usualmente determinada com base em intervalos de tempo ou quilometragem (Tesla, 2024), conforme especificado pelos fabricantes, sem a realização de medições diretas das propriedades do fluido durante a operação do veículo.

Soluções mais avançadas, como a descrita na Patente US2019089104 intitulada "*Vehicle Adaptative Cruise Control Noise Cancellation*" (Ford Global Technologies, 2019) utilizam parâmetros indiretos do sistema de frenagem, tais como nível do fluido, tempo de resposta da frenagem, ou pressão hidráulica gerada, para inferir possíveis anomalias.

Entretanto, tais abordagens não permitem a identificação direta ou precisa do nível de contaminação do fluido, sendo limitadas na detecção precoce de contaminação química. Adicionalmente, existem sistemas baseados na medição direta de propriedades físico-químicas do fluido, como condutividade elétrica e constante dielétrica *(Instrutherm, 2026)*. Embora tais métodos possibilitem a inferência do grau de contaminação, apresentam limitações técnicas relevantes, incluindo dificuldades de integração em sistemas embarcados automotivos, sensibilidade a condições operacionais variáveis, confiabilidade limitada ao longo do tempo e aumento de custo do sistema.

De forma paralela, estudos anteriores aplicados em sistema de embreagem demonstraram que o comportamento de sistemas multivariados exige métodos que analisem essas variações de forma integrada (Gregori, 2016). O pesquisador menciona que a composição de técnicas multivariadas lineares mostra-se como uma ferramenta eficaz para, por exemplo, reduzir a dimensionalidade dos dados de torque e atrito obtidos por sensores, permitindo a identificação de padrões ocultos e comportamentos não lineares associados ao desgaste e à integridade de materiais de fricção,

No caso dos sistemas de frenagem, diversas abordagens têm sido propostas para o monitoramento, com foco na análise de parâmetros funcionais, como pressão, vibração e desgaste de componentes mecânicos.

Geier e seus colegas (2023) demonstram que modelos de aprendizado de máquina são capazes de identificar padrões associados às vibrações do sistema de freio. Técnicas de processamento de sinais, incluindo classificadores estatísticos e algoritmos de reconhecimento de padrões, têm sido empregadas para diagnóstico de falhas em componentes do sistema de freio.

Contudo, tais estudos concentram-se predominantemente na detecção de falhas mecânicas ou operacionais, não abordando de forma específica a influência da contaminação química do fluido de freio sobre o comportamento dinâmico do sistema. Além disso, não foram identificadas soluções que estabeleçam uma correlação estruturada entre dados multissensoriais obtidos em condições dinâmicas de operação e o nível de contaminação do fluido, tampouco que utilizem modelos de classificação capazes de operar em tempo real em sistemas embarcados para este fim. Dessa forma, observa-se uma lacuna tecnológica na disponibilidade de métodos capazes de avaliar, de forma indireta, porém precisa, o nível de contaminação de fluidos de freio a partir do comportamento dinâmico do sistema de frenagem, utilizando dados de sensores já presentes ou facilmente integráveis ao veículo, com capacidade de operação em tempo real e baixo custo computacional.

4.3.2 Representação e codificação multivariadas

A estratégia de representação multivariada adotada nesta tese decorre da necessidade de descrever o comportamento do processo de frenagem sob múltiplas condições térmicas de operação com fluídos isentos de contaminação ou mesmo contaminados por umidade, de modo a capturar a complexidade inerente aos diversos mecanismos do fenômeno de frenagem em situações reais de uso. Tal codificação permite interpretar os sinais experimentais como pontos em um espaço de alta dimensionalidade, no qual cada evento de frenagem é caracterizado por um conjunto de N amostras obtidas para cada um dos eventos analisados no espaço de tempo t.

Do ponto de vista estrutural, por similaridade conceitual, pode-se aplicar os conceitos desenvolvidos nos estudos de (Gregori, 2016) assumindo que o sinal para cada componente monitorado no sistema de freios pode ser descrito por um vetor de características *a*, construído a partir da concatenação ordenada dos dados correspondentes a todos os valores coletados, conforme expresso na Equação (32), em que o operador *T* denota a transposição do vetor:

$$a = [a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_N]^T. \tag{32}$$

A organização sistemática desses vetores, considerando todos os materiais e acionamentos realizados, possibilita a construção de uma matriz de dados *A* de dimensão $M \times m$. Nessa matriz, cada linha corresponde a uma frenagem individual, enquanto cada coluna representa os componentes os quais tem seus sinais coletados no regime de frenagem, conforme ilustrado na Equação (33):

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,N} & \cdots & a_{1,N\times(t-1)+1} & \cdots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & \cdots & a_{2,N} & \cdots & a_{2,N\times(t-1)+1} & \cdots & a_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M,1} & \cdots & a_{M,N} & \cdots & a_{M,N\times(t-1)+1} & \cdots & a_{M,m} \end{bmatrix}. \tag{33}$$

Nessa representação matricial, *M* corresponde ao número total de frenagens ou engates considerados nas etapas de treinamento e validação do modelo, enquanto *m* denota a dimensionalidade total do vetor de características, definida pelo produto entre o número de amostras por ensaio *N* e o número de temperaturas analisadas *t* ($m = N \times t$).

Assume-se, de forma explícita, que a análise do fenômeno de frenagem deve incorporar medições simultâneas em diferentes regimes térmicos para evidenciar as disparidades de desempenho entre distintos materiais (Gregori, 2016), uma vez que variações de temperatura

podem alterar significativamente as propriedades físico-químicas e a morfologia de contato dos componentes do sistema de frenagem (Pisaturo; Cirrincione; Senatore, 2015).

Essa abordagem fornece uma visão funcional integrada da transmissão de torque de frenagem, permitindo a identificação de padrões discriminantes associados a regiões específicas do espaço de características e contribuindo para a predição de instabilidades relacionadas ao comportamento dinâmico dos materiais, componentes e sistemas empregados.

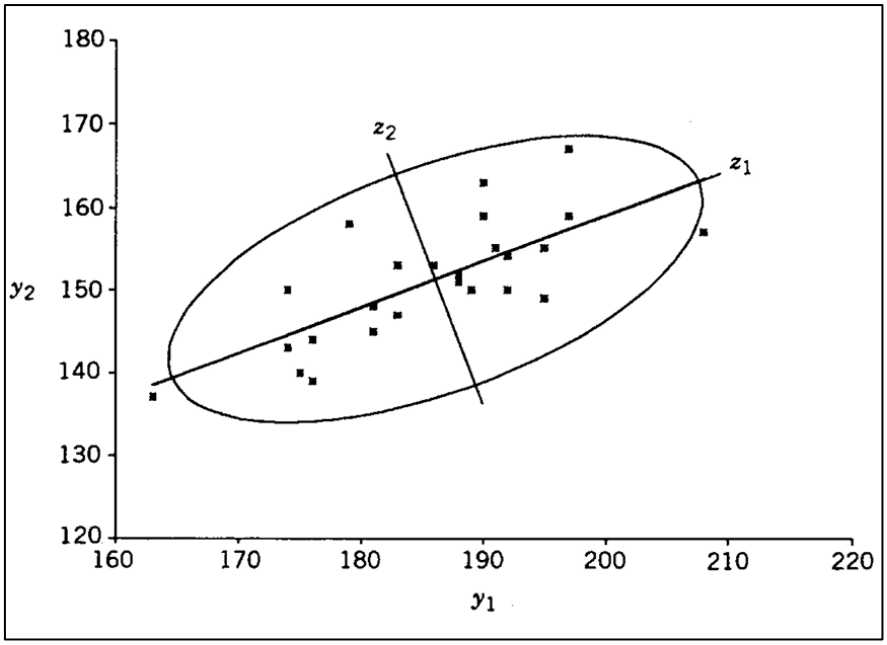
4.3.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (ou em inglês, *Principal Components Analysis*, ou PCA) consolidou-se como uma das ferramentas centrais da estatística multivariada aplicada à ciência de dados, sendo amplamente reconhecida como um procedimento matemático-computacional para a extração de informações relevantes em conjuntos de dados complexos e sujeitos a ruído (Shlens, 2014). No âmbito do reconhecimento de padrões, o PCA configura-se como uma técnica de aprendizado não supervisionado que busca reexpressar a base de dados em um novo sistema de coordenadas, promovendo a redução da dimensionalidade e a eliminação de redundâncias estatísticas sem a necessidade de conhecimento prévio sobre classes ou rótulos (Johnson; Wichern, 2007; Shlens, 2014).

Sob a perspectiva geométrica, o método consiste em rotacionar o sistema de coordenadas original de modo que os novos eixos — denominados componentes principais — se alinhem às direções de maior variabilidade dos dados (Johnson; Wichern, 2007; Shlens, 2014).

Dessa forma, um sinal originalmente descrito em um espaço m-dimensional pode ser representado em um espaço reduzido de dimensão p ($p \leq m$), preservando as características mais expressivas, ou seja, que mais variam desses dados, conforme ilustrado na Figura 69.

Figura 69 – Espaço de coordenadas baseado no PCA.



Fonte: Rencher, 2002.

Do ponto de vista matemático, o PCA realiza uma transformação linear $Y = AP$, em que a matriz de projeção P é ortonormal. Essa transformação diagonaliza a matriz de covariância dos dados, reduzindo a correlação entre as novas variáveis (Fukunaga, 1990; Shlens, 2014). A fundamentação teórica repousa na decomposição espectral da matriz de covariância S do conjunto original A (Fukunaga, 1990) em relação aos vetores de médias $\bar{a}$, definida como:

$$S = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{i=1}^{M} (a_i - \bar{a})(a_i - \bar{a})^T, \tag{34}$$

$$\bar{a} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^{M} a_i = (\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_m). \tag{35}$$

A solução algébrica para encontrar as componentes principais envolve o cálculo dos autovetores e autovalores da matriz S, tal que:

$$P^T S P = \Lambda. \tag{36}$$

Nesta formulação, P é a matriz cujas colunas são os autovetores de S, e Λ é uma matriz diagonal contendo os autovalores correspondentes, que representam as variâncias dos dados ao longo de cada componente principal (Fukunaga, 1990; Gregori, 2016). De acordo com a expansão discreta de Karhunen-Loève (K-L), a seleção de um subconjunto de p autovetores associados aos maiores autovalores garante a minimização do erro quadrático médio de reconstrução do sinal em comparação a qualquer outra base ortonormal de mesma dimensão (Fukunaga, 1990; Gregori, 2016).

Dessa forma, as p componentes principais passam a substituir as m variáveis originais, resultando em uma matriz de treinamento reduzida Y, composta por M engates e pelas características mais expressivas do sinal de torque (Gregori, 2016), onde A é o conjunto original, ou matriz de dados originais, e o P é a matriz de projeção ortonormal:

$$Y = AP. \tag{37}$$

A eficácia dessa redução dimensional é avaliada pela proporção da variância total explicada pelas componentes retidas (Johnson; Wichern, 2007). Em cenários de alta dimensionalidade, nos quais o número de amostras é relativamente pequeno ($M << m$), o PCA desempenha papel crucial como etapa intermediária, compactando as regiões ocupadas pelos padrões no espaço de características e favorecendo a aplicação subsequente de métodos discriminantes lineares (Gregori, 2016). Por fim, assume-se que as direções de maior variância capturadas pelo PCA refletem a dinâmica física de interesse, enquanto as variâncias menores tendem a estar associadas ao ruído do sistema (Shlens, 2014).

4.3.4 Análise de Discriminantes Lineares (LDA)

A Análise de Discriminantes Lineares (em inglês, *Linear Discriminant Analysis* ou LDA) é um método supervisionado de estatística multivariada fundamental para o reconhecimento de padrões, atuando na identificação das direções lineares que melhor separam grupos ou classes pré-definidas (Fukunaga, 1990; Rencher, 2002). Diferente de técnicas não supervisionadas como o PCA, o LDA utiliza explicitamente os rótulos das classes para encontrar eixos espaciais que maximizam a separabilidade entre as médias dos grupos, enquanto minimizam a variabilidade interna de cada classe (Rencher, 2002; Gregori; Sanches; Thomaz, 2016).

O processo analítico do LDA fundamenta-se na manipulação de duas matrizes de dispersão: a matriz de variância entre classes (S_b) e a matriz de variância dentro das classes (S_w) (Fukunaga, 1990; Johnson; Wichern, 2007). A matriz S_b quantifica a dispersão dos vetores médios de cada classe em relação ao vetor médio global, enquanto S_w representa a soma ponderada das matrizes de covariância individuais de cada grupo, refletindo a variação residual interna (Rencher, 2002; Gregori; Sanches; Thomaz, 2016).

O objetivo central do LDA é determinar uma matriz de projeção L que maximize o Critério de Fisher, definido pela razão entre os determinantes dessas matrizes de dispersão (Fukunaga, 1990; Thomaz; Kitani; Gillies, 2006). Matematicamente, as direções ótimas de projeção correspondem aos autovetores da matriz resultante do produto entre a inversa de S_w e a matriz S_b, respeitando o limite de $g - 1$ autovetores não nulos para um problema com g grupos ou classes (Fukunaga, 1990; Rencher, 2002).

Segundo Tharwat et al. (2017), o processamento do LDA segue um fluxo estruturado e sequencial, composto por etapas algébricas e estatísticas ordenadas, desde o cálculo das médias e das matrizes de dispersão até a obtenção dos autovalores e autovetores.

A Etapa A é a Definição e Estruturação da Matriz de Dados. Aqui, o processo inicia-se com a organização dos dados multivariados em uma estrutura matricial global denotada por $X \in \mathbb{R}^{N \times M}$, onde N representa o número total de amostras ou observações no conjunto de dados e M indica a dimensionalidade original (número de atributos ou *features*). Nesta etapa, o espaço amostral é formalmente particionado em subconjuntos associados às suas respectivas classes (C) biunívocas ($\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_c$), de modo que $X = [\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_c]^T$. Cada classe ω_j contém n_j amostras, estabelecendo a relação de cardinalidade total da Equação (38).

$$N = \sum_{j=1}^{c} n_j . \tag{38}$$

Na Etapa B, uma vez particionada a matriz, computa-se o centroide ou vetor de médias local para cada uma das classes isoladamente. O vetor de médias μ_j (de dimensão $1 \times M$) da classe ω_j funciona como o operador de tendência central daquele subgrupo no espaço multidimensional, sendo formalizado matematicamente por:

$$\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum_{x_i \in \omega_j} x_i . \tag{39}$$

Na Etapa C, paralelamente ou de forma subsequente à caracterização local, mensura-se o vetor de média global (ou *total mean*) $\mu \in \mathbb{R}^{1 \times M}$, que representa o centro de massa geométrica de todo o espaço amostral integrado, independentemente de rótulos de classe. O cálculo pondera a influência de cada classe proporcionalmente ao seu número de amostras:

$$\mu = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i = \sum_{j=1}^{c} \frac{n_j}{N}\mu_j. \tag{40}$$

A etapa D foca na quantificação da variabilidade geométrica existente *entre* os grupos (interclasses). Para isso, calcula-se inicialmente a matriz de dispersão individual de uma classe em relação à média global, dada por $S_{Bi} = (\mu_i - \mu)\,(\mu_i - \mu)^T$. A Matriz de Dispersão Entre Classes total ($S_B \in \mathbb{R}^{M \times M}$) é obtida pelo somatório ponderado dessas matrizes individuais. O objetivo analítico da LDA nesta etapa é fornecer subsídios matemáticos para, posteriormente, maximizar esta distância no espaço projetado.

$$S_B = \sum_{i=1}^{c} n_i\,(\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T. \tag{41}$$

Antes de determinar a dispersão interna, realiza-se na Etapa E, uma operação de translação linear nos dados brutos de cada classe, conhecida como centralização na média (*mean-centering*). Define-se uma matriz de desvios $D_i = \omega_i - \mu_i$, na qual subtrai-se o respectivo vetor de médias μ_j de cada amostra $x_i \in \omega_i$. Esse procedimento remove o viés do centroide e isola puramente a covariância residual intrínseca dos dados de cada grupo.

Na etapa F, a partir dos dados centralizados obtidos na etapa anterior, computa-se a Matriz de Dispersão Dentro das Classes (intraclasse), denotada por $S_W \in \mathbb{R}^{M \times M}$. Primeiramente, calcula-se a dispersão interna de cada classe através do produto matricial apresentada na Equação (42). A matriz S_W global consolida a soma dessas variâncias internas na Equação (43). Estruturalmente, S_W reflete o nível de compactação dos agrupamentos; o LDA buscará minimizar esta métrica para mitigar a superposição de classes.

$$S_{W_j} = D_j^T D_j = \sum_{x_i \in \omega_j} \left(x_i - \mu_j\right)\left(x_i - \mu_j\right)^T, \tag{42}$$

$$S_W = \sum_{j=1}^{c} S_{W_j}. \tag{43}$$

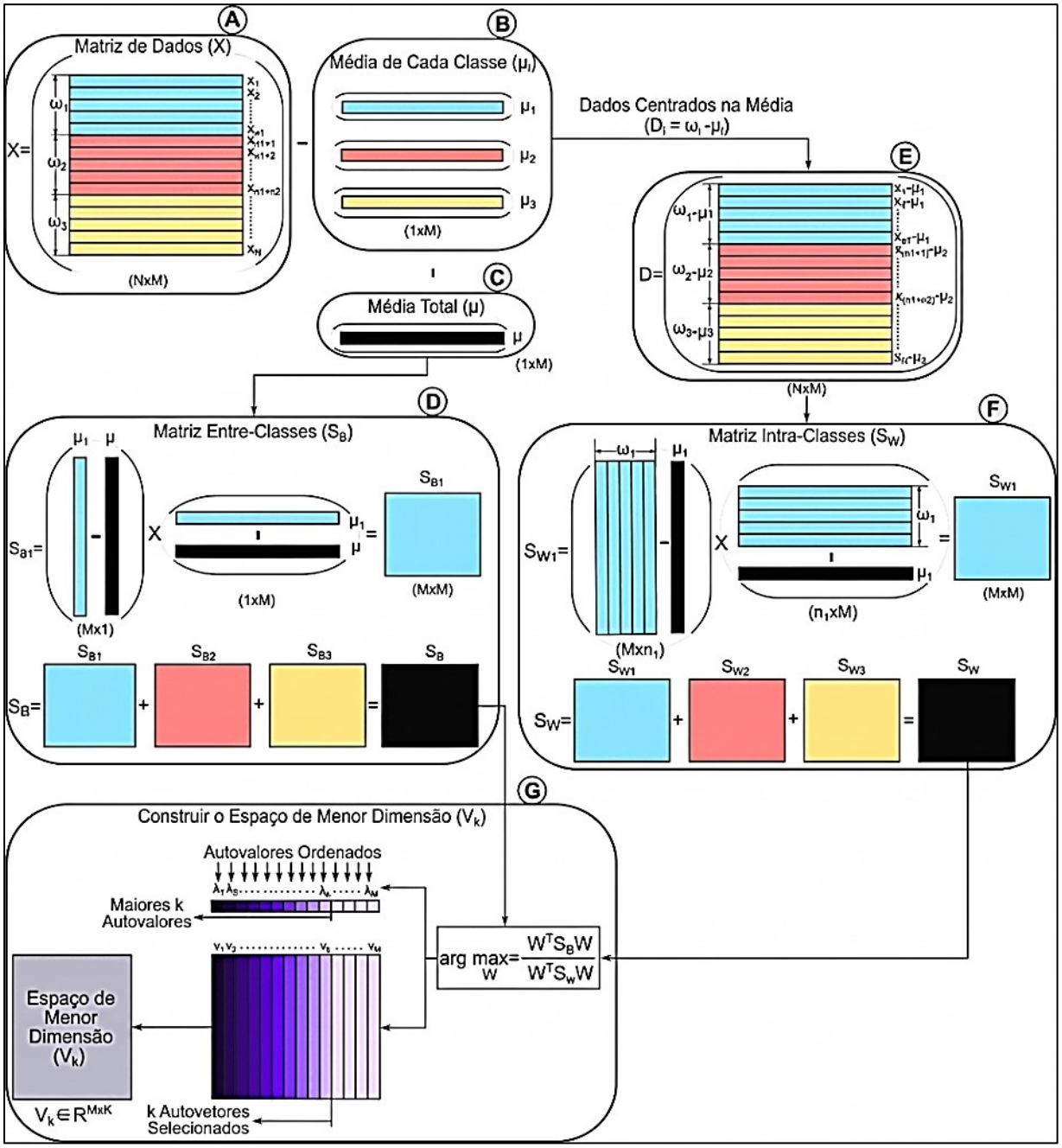
A Etapa G (final) materializa o Critério de Seleção de Fisher, cujo objetivo é maximizar a razão entre a dispersão interclasse e a dispersão intraclasse da Equação (44). Matematicamente, isso se resolve por meio de um problema de autovalor generalizado, expresso por $S_W W = \lambda S_B W$, ou pela decomposição espectral direta da matriz combinada da Equação (45) (assumindo que S_W seja não-singular).

$$L = \arg\max_{W} \frac{W^T S_B W}{W^T S_W W}, \tag{44}$$

$$W = S_W^{-1} S_B. \tag{45}$$

Dessa decomposição, extraem-se os autovalores ($\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_M$) e seus respectivos autovetores ($v_1, v_2, \ldots, v_M$). Na etapa G, os autovalores são ordenados de forma decrescente, visto que a magnitude de λ reflete diretamente o poder de discriminação matemática do autovetor correspondente. Selecionam-se, então, os k autovetores associados aos maiores autovalores para construir a matriz de transformação do subespaço reduzido, $V_k \in \mathbb{R}^{M \times k}$, descartando-se as dimensões excedentes de menor discriminância explicativa. Esse fluxo metodológico é ilustrado na Figura 70, que ilustra a sequência de processamento do algoritmo (Tharwat et al., 2017).

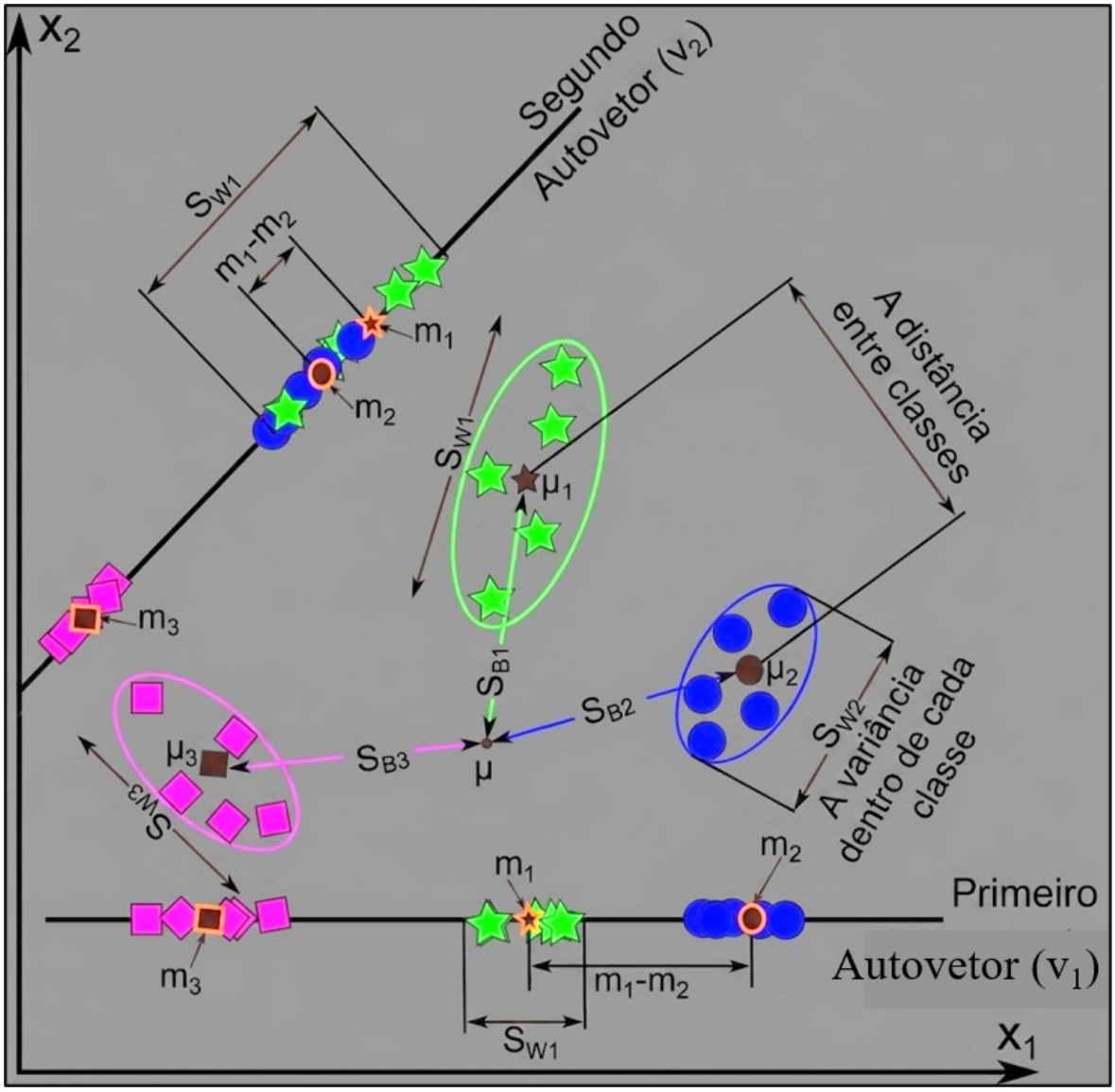
Figura 70 – Passos visualizados para calcular um subespaço de menor dimensão da técnica LDA.



Fonte: Autor “adaptado de” Tharwat et al., 2017, p. 4.

No contexto da validação geométrica e estatística do LDA, a compreensão do impacto das direções de projeção sobre a separabilidade dos dados é fundamental para justificar o uso do Critério de Fisher. A Figura 71 ilustra uma análise comparativa bidimensional entre dois subespaços de dimensão reduzida (representados pelo primeiro autovetor (v_1), e pelo segundo autovetor (v_2), obtidos a partir de um cenário amostral composto por três classes distintas (ω_1, ω_2, ω_3), cada uma contendo cinco amostras parametrizadas por dois atributos $x_i \in \mathbb{R}^2$.

Figura 71 – Comparação visualizada entre os dois subespaços de menor dimensão que são calculados usando três classes diferentes.



Fonte: Autor “adaptado de” Tharwat et al., 2017, p. 6.

A interpretação analítica desta ilustração divide-se em duas conclusões científicas principais que validam o comportamento assintótico do algoritmo. A análise visual e matemática do primeiro autovetor (v_1) revela que a distância euclidiana entre as projeções das médias locais — denotadas por m_1, m_2 e m_3 é maximizada linearmente de forma ótima.

Como ilustrado na Figura 71, a magnitude do intervalo de separação linear entre as classes ω_1 e ω_2 no eixo de v_1 (representada por $|m_1 – m_2|$) é significativamente maior quando comparada ao mesmo intervalo projetado no eixo secundário v_2. Esse comportamento indica empiricamente que o autovetor associado ao maior autovalor λ_1 retém a direção vetorial de máxima dispersão entre os grupos (S_B), cumprindo o primeiro vetor do gradiente de otimização

do LDA. No subespaço gerado por v_2, observa-se o fenômeno inverso: os centroides projetados aproximam-se geometricamente, o que degrada a capacidade discriminatória do classificador.

Complementarmente à dispersão dos centroides, a eficiência de um subespaço LDA depende da minimização da variabilidade interna de cada classe pós-projeção, garantindo que amostras do mesmo grupo permaneçam densamente compactadas.

Ao inspecionar a dispersão das amostras individuais em torno de suas respectivas médias ilustradas na Figura 71, constata-se que a variância intraclasse no primeiro autovetor (por exemplo, S_{W1} sob o eixo v_1) é substancialmente menor do que a dispersão observada no segundo autovetor (S_{W1} sob o eixo v_2). A projeção dos dados sobre v_2 causa um espalhamento indesejado das observações ao longo da reta, expandindo os limites estatísticos de cada classe e provocando zonas latentes de superposição (*overlap*). Por outro lado, o eixo v_1 comprime as projeções amostrais em aglomerados bem delimitados.

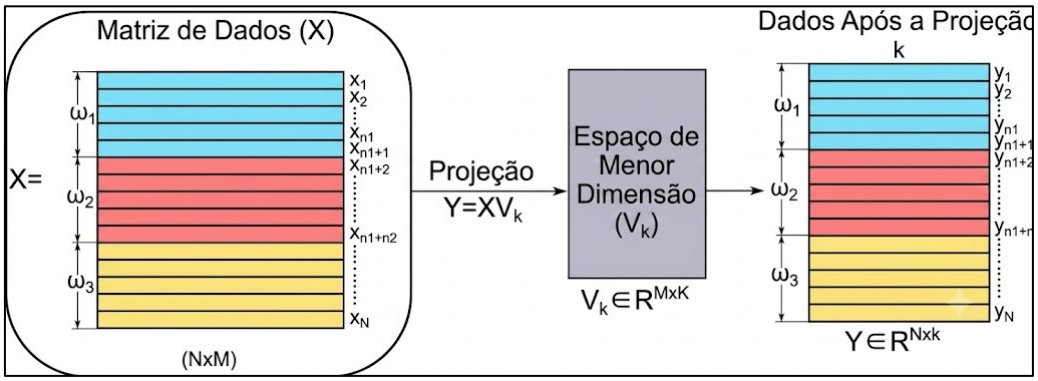
A convergência desses dois fatores demonstra graficamente o princípio da maximização da razão de Fisher. O primeiro autovetor v_1, correspondente ao autovalor dominante, atende simultaneamente aos dois requisitos objetivos do pipeline: maximiza S_B e minimiza S_W. Consequentemente, o mapeamento topológico neste subespaço garante que as três classes sejam eficientemente discriminadas e isoladas no espaço unidimensional reduzido, justificando matematicamente os critérios de ordenamento decrescente adotados na Etapa G do algoritmo.

Para dar continuidade à fundamentação teórica da tese, a transição do mapeamento abstrato para a aplicação prática da redução dimensional é consolidada por meio da projeção dos dados originais. A Figura 72 ilustra matematicamente o processo de mapeamento linear de todo o conjunto de dados multivariados sobre o subespaço reduzido do LDA (V_k) obtido na etapa anterior. A descrição formal desse mecanismo de projeção e de sua relevância para o modelo pode ser estruturada como descrito a seguir.

O cerne do processo ilustrado na Figura 72 reside na simplificação topológica do espaço de características através de uma transformação linear. O conjunto de dados original, representado pela matriz de dados global $X \in \mathbb{R}^{N \times M}$ (onde N é o número de amostras e M a dimensionalidade de atributos), é submetido a um produto matricial direto com a matriz de transformação do subespaço LDA, denotada por $V_k \in \mathbb{R}^{M \times k}$. Essa operação resulta em uma nova matriz de dados projetados, denominada $Y \in \mathbb{R}^{N \times k}$, conforme formalizado pela equação governante do modelo:

$$Y = XV_k \tag{46}$$

Figura 72 – Projeção da matriz de dados no espaço de menor dimensão do LDA.



Fonte: Autor “adaptado de” Tharwat et al., 2017, p. 6.

Geometricamente, cada amostra individual x_i (representada originalmente como um vetor linha ou um ponto em um hiperespaço de M dimensões) é remapeada para um novo ponto $y_i = x_i V_k$, imerso em um espaço reduzido de apenas k dimensões. Do ponto de vista da teoria da informação e do aprendizado de máquina, o processo ilustrado na Figura 72 evidencia a eliminação programática de componentes redundantes ou ruidosos. Ao projetar X sobre V_k, um total de $M – k$ características são efetivamente descartadas ou colapsadas de cada amostra.

Portanto, em contraste com técnicas não supervisionadas como o PCA — que prioriza apenas a direção de maior variância global —, a projeção LDA preserva estritamente as direções vetoriais que maximizam a separabilidade estatística entre as classes. Como resultado prático, a nova matriz Y (*Data After Projection*) condensa o conhecimento discriminante original em uma fração de seu tamanho vetorial, mitigando de forma robusta o fenômeno conhecido como "a maldição da dimensionalidade" (*curse of dimensionality*).

Segundo Mao e Xu (2026), problemas de aproximação em espaços de alta dimensionalidade emergem de forma recorrente em diversos domínios da computação científica e do aprendizado de máquina. Nesses cenários, um dos principais desafios metodológicos é representado pela chamada maldição da dimensionalidade (*curse of dimensionality*), fenômeno segundo o qual a quantidade de graus de liberdade necessária para alcançar um nível de precisão previamente estabelecido tende a crescer de maneira acentuada à medida que aumenta a dimensão do problema.

A representação visual do pipeline na Figura 72 encerra a fase de extração de características (*feature extraction*) do LDA. A obtenção da matriz compacta Y oferece duas vantagens analíticas cruciais que subsidiam as hipóteses desta tese:

a) Otimização Computacional: Ao reduzir o número de colunas de M para k, o custo computacional de algoritmos de classificação subsequentes diminui de forma

significativa, permitindo assim o processamento de grandes volumes de dados de forma otimizada e rápida, reduzindo tanto o espaço de memória necessário quanto o tempo de processamento;

b) Ganho de Generalização: Ao forçar o agrupamento coeso das amostras da mesma classe e o distanciamento dos centroides no espaço projetado de *Y*, minimiza-se o risco de *overfitting* (sobreajuste), elevando as taxas de acerto e a robustez do sistema de classificação proposto nesta tese.

4.3.5 Fluxograma do tratamento dos dados

Para a análise dos dados experimentais coletados na bancada durante os ensaios do sistema de freios com fluidos DOT 3, DOT 4, DOT 4 LV e DOT 5.1 em diferentes níveis de contaminação (0%, 3% e 5%), foram aplicadas técnicas para a redução de dimensionalidades e posterior classificação para a determinação dos componentes mais representativos do comportamento global do sistema durante o processo de frenagem nos ciclos programados.

O fluxo de tratamento e processamento dos dados experimentais segue uma sequência lógica estruturada em sete etapas principais, conforme ilustrado na Figura 73. O procedimento tem início com a realização do teste dinâmico, composto por 200 ciclos de frenagem escalonados, que constitui o início do ensaio.

Na Etapa 1, realiza-se a aquisição síncrona dos sinais temporais provenientes das 9 variáveis monitoradas pelos sensores em tempo real. Em seguida, na Etapa 2, os dados coletados ao longo dos ensaios são delimitados em uma janela temporal com duração total de 5.000 segundos; com uma taxa de amostragem de 250 ms, gera-se uma matriz de dados primários composta por 20.000 linhas (amostras temporais) e 9 colunas (representando cada uma das variáveis discretizadas).

Figura 73 – Fluxograma do tratamento dos dados.



Fonte: Autor.

A Etapa 3 compreende a fase de pré-processamento e organização dos dados, na qual se aplica a aquisição do conjunto de dados delimitados para o estudo, seguida pela centralização do conjunto de dados (*dataset*) na média, preparando-o para as análises estatísticas subsequentes.

Na Etapa 4, aplica-se a técnica PCA com o objetivo de reduzir a dimensionalidade espacial do problema e determinar os componentes principais que predominantemente caracterizam o fenômeno de frenagem, avaliando-se nesta etapa a variância dos componentes e seus respectivos pesos (*loadings*) na manifestação do sistema em estudo. Sobre os resultados obtidos via PCA, a Etapa 5 aplica o LDA como uma técnica complementar e supervisionada, atuando como um refinamento estatístico que maximiza a separação entre as classes por meio da construção de hiperplanos lineares e otimiza o custo computacional para a subsequente fase de classificação.

A Etapa 6 baseia-se no emprego do algoritmo de agrupamento *K-Nearest Neighbors* (KNN), no qual o classificador executa o treinamento e a partição do espaço amostral utilizando estritamente os componentes preditivos resultantes da fusão PCA + LDA, adotando-se a métrica de 4 vizinhos mais próximos (k = 4) para estabelecer as fronteiras de decisão nos hiperplanos. Para a validação do modelo preditivo, a matriz de dados original é dividida aleatoriamente sob o critério de validação cruzada *hold-out*, utilizando a seguinte lógica de processamento:

a) fase de treinamento (80% dos dados): dedicada ao ajuste e calibração dos parâmetros espaciais do modelo descrito através do PCA e do LDA aplicada na mesma base de dados (PCA + LDA);
b) fase de teste/classificação (20% dos dados): destinada à avaliação do poder de generalização do algoritmo KNN a partir do espaço subjacente gerado, realizando a classificação por KNN (K=1) do bloco PCA + LDA e computando, ao término desta subfase, a matriz de confusão para a extração do grau de acurácia, sensibilidade e especificidade do modelo de classificação.

Por fim, a Etapa 7 consiste na tomada de decisão e geração de alerta através da verificação do estado de contaminação do fluido, que é segmentado de forma binária entre "Contaminado" ou "Não Contaminado". As saídas classificadas alimentam uma lógica booleana na qual se atribui o bit "0" para o fluido em condições nominais e o bit "1" para o fluido em estado de falha. Caso seja necessário, ocorre a geração e o disparo de um sinal de alerta de contaminação, configurando uma estrutura passível de ser embarcada em unidades de controle eletrônico (ECU) de veículos automotores.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo será descrita a fase experimental desta tese, para a geração de dados através de ensaios na bancada concebida, com o propósito de gerar conhecimentos aprofundados sobre os diferentes graus de influência dos fatores multivariados que compõem o processo de frenagem de um veículo automotor. O ciclo de ensaio inicia-se com a aceleração do sistema até uma velocidade linear equivalente a 80 km/h para um veículo VW Polo representando ¼ (um quarto) da massa de ordem de marcha com 1720kg, com conjunto de roda e pneus 205/55R15.

Todos os ensaios experimentais desta pesquisa foram realizados no município de São Bernardo do Campo (SP) no período compreendido entre julho de 2025 e janeiro de 2026. Convém salientar que as variáveis térmicas e de pressão monitoradas ao longo dos experimentos foram expressas em escala relativa. Diante disso, os resultados alcançados pelos experimentos realizados no período estão associados a tais condições climáticas e a uma localização geográfica com altitude média de 762 metros acima do nível do mar (IBGE, 2020). Conforme os registros históricos locais para o intervalo temporal dos ensaios, a temperatura média ambiente apresentou flutuações sazonais características de transição climática, situando-se na faixa integrada de 19,5°C a 21,5°C, enquanto a umidade relativa do ar média manteve-se predominantemente estável e elevada na faixa de 78% a 85% (AQI, 2026; CLIMATEMPO, 2026; MICROSOFT MSN, 2026).

5.1 ESPECIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVAS ENSAIADOS

O ensaio proposto na bancada concebida nesta tese utiliza os componentes do conjunto de frenagem dianteiro utilizado no veículo Volkswagen Polo 1.0 TSI ou T-Cross representando ¼ (um quarto) da massa de ordem de marcha de 1720kg de um VW T-Cross e conjunto de roda e pneu 205/55R15 de um VW Polo, considerando condições controladas e reprodutíveis dos ensaios. Para isso, foram selecionados espécimes de ensaio representativos do sistema original do veículo, de modo a assegurar a fidelidade dos resultados em relação ao desempenho real esperado pelos componentes em situação de aplicação prática em campo de provas.

O primeiro espécime de ensaio consiste em um disco de freio ventilado dianteiro, fabricado em ferro fundido cinzento, da marca Hipper Freios, código HF81C, com diâmetro nominal de 276 mm, conforme ilustrado na Figura 38. Esse tipo de disco é amplamente empregado em veículos de passeio devido à sua elevada capacidade de dissipação térmica e

resistência mecânica, características essenciais para a estabilidade do coeficiente de atrito durante ciclos repetitivos de frenagem. O segundo espécime é composto pelas pastilhas de freio dianteiras originais, semimetálicas em composto de resina fenólica, do fabricante Bosch, código 0986BB0178, conforme também ilustrado anteriormente na Figura 39.

A escolha de pastilhas originais teve por objetivo, assegurar a compatibilidade geométrica e material com o disco selecionado, além de refletir o comportamento real do sistema de frenagem em condições de uso comercial.

A montagem dos espécimes na bancada de ensaios foi realizada de acordo com os procedimentos padronizados estabelecidos para este estudo, garantindo alinhamento, torque de fixação e pré-assentamento compatíveis com as recomendações técnicas dos fabricantes. A bancada utilizada permite a simulação de cargas dinâmicas, velocidades angulares e perfis de frenagem equivalentes aos encontrados em condições reais de condução, assegurando a repetibilidade dos ciclos experimentais.

Para a robustez da matriz de dados geradas, foi utilizada a taxa de aquisição síncrona de 250ms para todos os equipamentos, sensores e monitores, de forma a permitir a tomada de forma igualmente distribuída ao longo dos ciclos de ensaios.

Os equipamentos de instrumentação empregados no ensaio incluem sensores de pressão hidráulica, sensores de temperatura instalados em pontos estratégicos do disco e do suporte das pastilhas, além de um sistema embarcado de gerenciamento, aquisição e monitoramento de dados. Esses sistemas possibilitam o registro contínuo de variáveis críticas, como pressão aplicada, temperatura superficial, torque de frenagem e desgaste progressivo dos componentes. A descrição detalhada da instalação dos espécimes na bancada, bem como a especificação completa dos sensores, módulos de aquisição e arquitetura do sistema de monitoramento, encontra-se apresentada no capítulo anterior desta tese.

5.2 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE BANCADA

Os ensaios são realizados através de ciclos de frenagem escalonados. Nos estudos de (Kalel et al., 2020) conforme descrito no item 3.1, foram realizados os ensaios de desempenho na bancada através de ciclos representativos para as velocidades em ecossistema urbano. Neste método os autores mencionam em seus trabalhos que o disco de freios é submetido a rotações representativas a velocidades de 50 km/h e 80 km/h, sendo que em cada caso de velocidade de ensaio, o freio é aplicado com diferentes configurações de pressão no sistema hidráulico (10, 20 e 30 bar).

Para iniciar os ciclos de ensaios, optou-se por promover o assentamento e aquecimento do conjunto de disco e pastilhas através de ciclos de aquecimento, que sempre são realizados antes dos ciclos de ensaios escalonados, os quais são objeto de fonte de dados para esta pesquisa. O ciclo de aquecimento consiste em promover frenagens com alta rejeição de calor para estabilização das temperaturas do conjunto disco e pastilhas e garantir a estabilidade das pressões e ausência de bolhas de ar no sistema hidráulico.

Para o ciclo de aquecimento, a pressão de acionamento do fluido na pinça (pressão hidráulica) deve ser ajustada para 25 bar. Este processo se dá através da válvula manual reguladora de pressão para o controle de fluxo de ar para o acionamento do cilindro máster. Esta válvula de controle se encontra montada na linha de alimentação do cilindro pneumático e é ilustrada na Figura 74. Para uma linha de alimentação pneumática industrial com pressão de rede de 6 bar, estima-se que a pressão equivalente na válvula manual reguladora de pressão seja de aproximadamente 2 bar.

Figura 74 – Válvula manual reguladora de pressão.



Fonte: Autor, 2025.

Através do modo manual na tela do sistema de controle da bancada, pode-se verificar a pressão hidráulica através do acionamento manual do cilindro pneumático (apertando os botões “avança” e “recua” por diversas vezes). A pressão do fluído na rede hidráulica da bancada será ilustrada no campo “Pressão Hidráulica” na tela de controle, conforme ilustrado na Figura 75.

Figura 75 – Tela do sistema de controle da bancada – demonstrando 25 bar de pressão hidráulica.



Fonte: Autor, 2025.

Posteriormente, os ensaios de aquecimento poderão ser realizados através do modo automático da bancada. As etapas de frenagem do ciclo de aquecimento e o número de ciclos realizados são ilustrados a seguir. O ensaio de Aquecimento (Início de frenagem - velocidade equivalente do veículo 80 km/h):

a) etapa 1 - frenagem de 80 km/h para 10 km/h;
b) repetição das etapas acima 200 vezes (ciclos).

Para efeitos de compatibilidade com os estudos de (Kalel et al., 2020), os experimentos para a aquisição de dados experimentais foram realizados na bancada de forma escalonada, onde a velocidade inicial de frenagem sempre parte da velocidade linear simulada de 80 km/h. O procedimento de ensaio escalonado deve ser preparado logo em seguida aos ensaios de aquecimento para minimizar as perdas de calor dos componentes.

Para isto, primeiramente deve-se ajustar a pressão hidráulica do sistema, utilizando-se da válvula manual reguladora de pressão e outros procedimentos, conforme descrito na etapa de preparação para os ensaios de aquecimento (acima). Contudo, desta vez, a pressão hidráulica deve ser ajustada para 15 bar, conforme ilustrado na Figura 76. Para este ajuste de pressão

hidráulica, pode-se dizer que no caso em que a linha de alimentação pneumática industrial tenha pressão de rede de 6 bar, estima-se que a pressão equivalente na válvula manual reguladora de pressão seja de aproximadamente 1,8 bar.

Figura 76 – Tela do sistema de controle da bancada – demonstrando 15 bar de pressão hidráulica.



Fonte: Autor, 2025.

Com isto as etapas de frenagem e o número de ciclos de ensaios escalonados realizados são ilustrados a seguir, onde, para o Ensaio Escalonado (Início de frenagem – velocidade equivalente do veículo 80 km/h – têm-se:

a) etapa 1 - frenagem de 80 km/h para 70 km/h;
b) etapa 2 - retomada de velocidade para 80 km/h;
c) etapa 3 – frenagem de 80 km/h para 60 km/h;
d) repetição das etapas acima 200 vezes (ciclos).

Para a aquisição de dados gerados nos ensaios com taxas de aquisição pré-programada de 250 ms, a bancada conta com uma porta USB na saída do CLP para a gravação dos dados para serem tratados posteriormente. Os dados monitorados dos ensaios que são tomados em tempo real e de forma síncrona ao longo do tempo são listados a seguir:

a) temperatura do fluído no cilindro mestre (°C);
b) temperatura do fluído na pinça (°C);

c) temperatura do disco de freios (°C);
d) velocidade linear (km/h);
e) velocidade angular (rad/s);
f) torque de frenagem (Nm);
g) pressão do fluido no cilindro mestre (bar);
h) pressão do fluído na pinça (bar);
i) número de voltas frenando (n).

Para a escolha das taxas de contaminação dos fluídos de freios a serem ensaiados nesta tese, utilizou-se as taxas de contaminação por umidade históricas encontradas pelo fabricante em sistemas de freios que apresentaram falhas devido este tipo de contaminação em campo. Portanto para as condições de ensaio descritas neste capítulo, foram realizados ciclos de ensaios escalonados para a aquisição de dados para os seguintes fluídos de freios:

a) DOT3 referência sem contaminação por umidade (%m/m);
b) DOT3 com 3 % de contaminação por umidade (%m/m);
c) DOT3 com 5% de contaminação por umidade (%m/m);
d) DOT4 referência sem contaminação por umidade (%m/m);
e) DOT4 com 3 % de contaminação por umidade (%m/m);
f) DOT4 com 5% de contaminação por umidade (%m/m);
g) DOT4 LV com 3 % de contaminação por umidade (%m/m);
h) DOT4 LV com 5% de contaminação por umidade (%m/m);
i) DOT5.1 referência sem contaminação por umidade (%m/m);
j) DOT5.1 com 3 % de contaminação por umidade (%m/m);
k) DOT5.1 com 5% de contaminação por umidade (%m/m).

Foram realizados 40 ensaios com 200 ciclos cada para a tomada de dados para esta tese durante o período de julho de 2025 a janeiro de 2026. Foram totalizadas 2400 horas para a geração e coleta dos dados, sendo que esta fase foi precedida de 2400 horas nas fases de preparação, calibração, programação, integração dos sistemas da bancada. Estas atividades que perfizeram um total de 4800 horas. Os resultados são apresentados neste capítulo. Os arquivos referentes às patentes da bancada projetada para este trabalho, bem como do algoritmo desenvolvido para o tratamento dos dados extraídos, encontram-se reunidos no Anexo A, garantindo acesso integral às informações técnicas que sustentam a pesquisa, os materiais e métodos bem como os procedimentos de ensaios e os resultados apresentados nesta tese.

5.3 ESTRUTURAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE MULTIVARIADA DOS SINAIS

Foram considerados os resultados dos ensaios escalonados dos fluídos contaminados com 0%, 3% e 5% de umidade (%m/m) que continham os 200 ciclos com maior estabilidade dimensional. Com esse propósito, selecionaram-se os conjuntos de dados que possibilitassem a construção de *dataset* mais uniformes, garantindo equivalência na quantidade de registros entre as diferentes séries analisadas. Com isso, obteve-se para os fluidos em estudo, os seguintes *datasets* para o tratamento de dados:

a) *Dataset* DOT3 - Dados coletados durante o ciclo de ensaio escalonado para o fluido de freios DOT3 com 0%, 3% e 5% de contaminação por umidade (%m/m);
b) *Dataset* DOT4 - Dados coletados durante o ciclo de ensaio escalonado para o fluido de freios DOT4 com 0%, 3% e 5% de contaminação por umidade (%m/m);
c) *Dataset* DOT4LV - Dados coletados durante o ciclo de ensaio escalonado para o fluido de freios DOT4LV com 5% de contaminação por umidade (%m/m);
d) *Dataset* DOT5.1 - Dados coletados durante o ciclo de ensaio escalonado para o fluido de freios DOT5.1 com 0%,3% e 5% de contaminação por umidade (%m/m).

Para efeitos de reprodutibilidade dos ensaios, os dados utilizados na análise deste capítulo encontram-se arquivados na pasta de dados, no Apêndice A, para os ensaios escalonados, com as seguintes nomenclaturas:

a) dot3_0p 27fev26.xlsx;
b) dot3_3p 27fev26.xlsx;
c) dot4_0p 27fev26.xlsx;
d) dot4_3p 27fev26.xlsx;
e) dot4_5p 27fev26.xlsx;
f) dot4lv_5p 27fev26.xlsx;
g) dot51_0p 27fev26.xlsx;
h) dot51_3p 27fev26.xlsx;
i) dot51_5p 27fev26.xlsx.

As amostras de fluído DOT4 LV com 3% e 5% tiveram suas embalagens danificadas durante o transporte, tendo suas tampas danificadas. Por consequência, para efeitos de confiabilidade, utilizou-se apenas a amostra DOT4LV com 5% de contaminação por umidade nos ensaios. Com isto, o autor optou por utilizar as amostras dos fluídos DOT4 com 0% e 3%

de contaminação por umidade para efeitos comparativos. Na seção seguinte apresenta-se a metodologia de tratamento de dados em MATLAB para os *datasets* acima para o desenvolvimento de uma análise estruturada dos resultados.

Os arquivos em formato ".xlsx", contendo os dados extraídos diretamente da bancada experimental, foram disponibilizados em um DOI público para consulta de qualquer interessado nos resultados que deram origem as análises desta tese. O endereço desse DOI encontra-se descrito no Apêndice A.

5.4 ANÁLISE MULTIVARIADA - SINAIS COLETADOS - FLUIDOS DOT3, DOT4, DOT4 LV E DOT 5.1

O número de componentes principais adotado foi igual a quatro, sendo estes suficientes para representar, segundo os resultados das análises, mais de 99% da variância total dos dados, indicando uma representação eficiente do espaço original com a redução de dimensionalidade significativa para a simplificação dos modelos em estudo.

Nas análises as figuras ilustram os resultados do PCA para cada fluido de freio considerando os diferentes níveis de contaminação. Para a geração desses gráficos foram utilizados apenas as componentes principais que possuem a maior variância explicada sendo a primeira e a segunda componente principal.

Para a contextualização dos resultados obtidos por meio da Análise Linear Discriminante (LDA), a interpretação das representações gráficas é fundamentada pelo grau de relevância (peso) e na massa de distribuição dos vetores e autovetores que compõem o conjunto de dados analíticos. No mapeamento bidimensional ou em diagramas de barras de importância de variáveis, o eixo das abscissas discrimina os parâmetros ou variáveis físicas submetidas ao modelo classificatório.

Por sua vez, o eixo das ordenadas é estabelecido como um indicador absoluto de intensidade de representatividade vetorial, estruturado em uma escala normalizada que varia de 0 a 1. Nesse cenário, o módulo da medição atua diretamente como uma métrica de sensibilidade: variáveis cujos valores projetam-se majoritariamente próximos à unidade máxima denotam um peso significativamente superior e determinante na separação e discriminação dos grupos estudados, ao passo que valores próximos a zero indicam uma contribuição desprezível na variabilidade do sistema.

As 50 imagens correspondentes às interações completas do processo de análise PCA + LDA também estão disponíveis no DOI indicado no Apêndice A. No entanto, para facilitar a

visualização durante a leitura desta tese, nos Apêndices B, C, D e E são demonstradas especificamente as ilustrações da primeira (1ª.), décima terceira (13ª.), vigésima quinta (25ª.), trigésima sétima (37ª.) e quinquagésima (50ª.) interação para treino e classificação para os fluídos DOT3, DOT4, DOT4LV e DOT5.1 ensaiados.

5.4.1 Fluído DOT3

Os resultados dos ensaios para os fluídos de freios DOT3 são demonstrados nas Figuras 77 a 91, que são complementados pela tabela 5 e quadro 1. Como uma primeira seção a pesquisa aborda a análise exploratória de dados do fluido sem contaminação (0% de umidade) contra as contaminações com 3% e 5% de umidade.

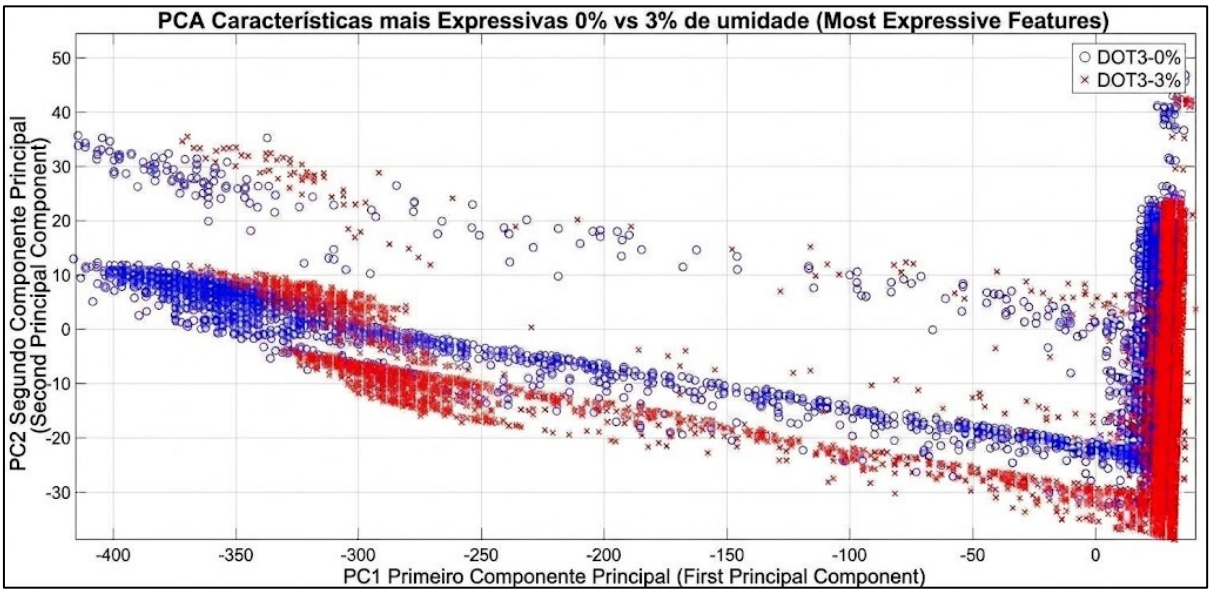
A avaliação inicial do comportamento dinâmico do fluido DOT 3 foi realizada por meio de técnica de redução de dimensionalidade não supervisionada (PCA) e aprendizado linear discriminante supervisionado (PCA + LDA). O objetivo desta etapa é avaliar a capacidade de distinção estatística do modelo quando exposto a diferentes níveis de contaminação por umidade.

Na Figura 77, o gráfico demonstra a projeção de um conjunto de dados multivariados no espaço bidimensional definido pelos dois primeiros componentes principais, PC_1 (Primeiro Componente Principal) e PC_2 (Segundo Componente Principal). O objetivo principal desta análise de componentes principais (PCA) é avaliar a capacidade de discriminação e redução de dimensionalidade das características mais expressivas extraídas de amostras sob duas condições experimentais distintas: 0% de umidade (representada pelos círculos azuis, DOT3-0%) e 3% de umidade (representada pelas cruzes vermelhas, DOT3-3%).

Observa-se que, de forma não supervisionada através do PCA, os agrupamentos (*clusters*) referentes ao fluido puro (0%) e contaminado (3%) apresentam zonas de sobreposições (*overlapping*). Na região direita do gráfico, especificamente na região onde $PC_1 > 0$, percebe-se que o comportamento de adensamento na concentração vertical de pontos de ambas as classes que se estende ao longo de quase todo o eixo PC_2 (de -35 a mais de +40). Embora essa região acumule uma quantidade substancial de amostras, os dados de 0% e 3% de umidade aparecem agrupados de forma compacta e sobreposta, sugerindo que a transformação linear do PCA projetou vetores de características com alta similaridade numérica nessa região.

Isto demonstra que as oscilações das variáveis físicas ao longo do ensaio seguem trajetórias similares, inviabilizando uma separação linear simples baseada apenas na variância dos dados.

Figura 77 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0% e 3% de umidade.

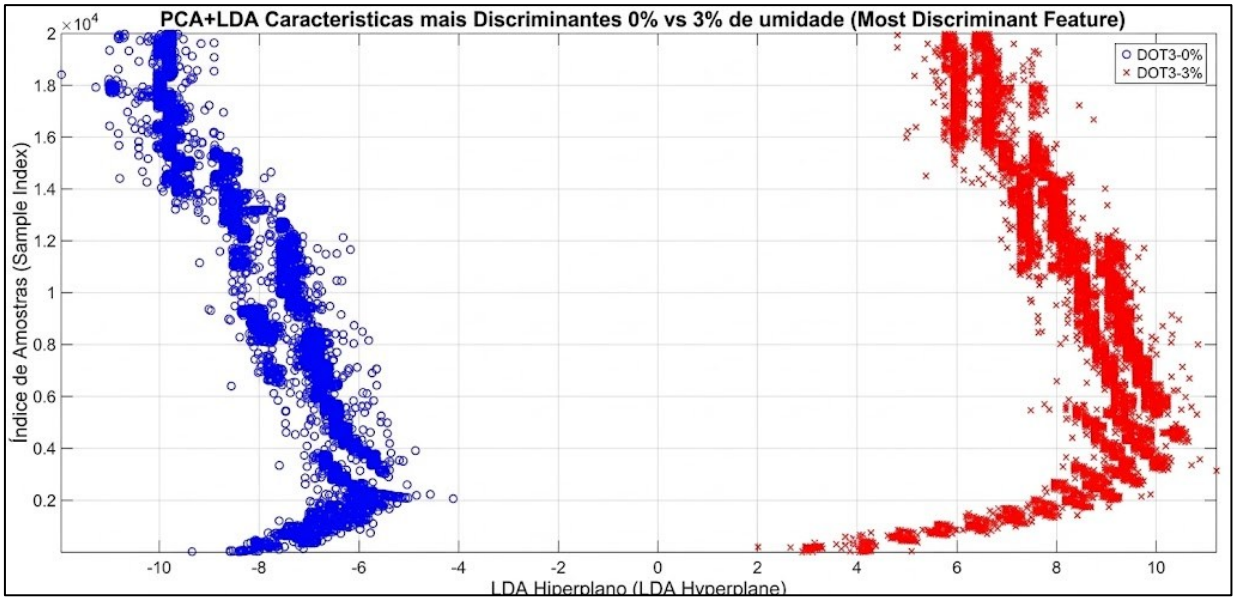


Fonte: Autor.

Na Figura 78, a aplicação do algoritmo supervisionado (PCA + LDA) sobre o espaço projetado do PCA elimina a região de interposição de dados verificada na Figura 77. O modelo passa a conhecer os rótulos de cada classe, ele maximiza a distância entre as médias dos clusters e minimiza a dispersão interna.

O resultado gráfico na Figura 78 é uma separação das duas categorias de fluídos ao longo do eixo horizontal da Função Discriminante 1 (LD1), onde a classe de 0% se desloca para a região positiva e a classe de 3% se posiciona de forma consistente na região negativa.

Figura 78 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0% e 3% de umidade.



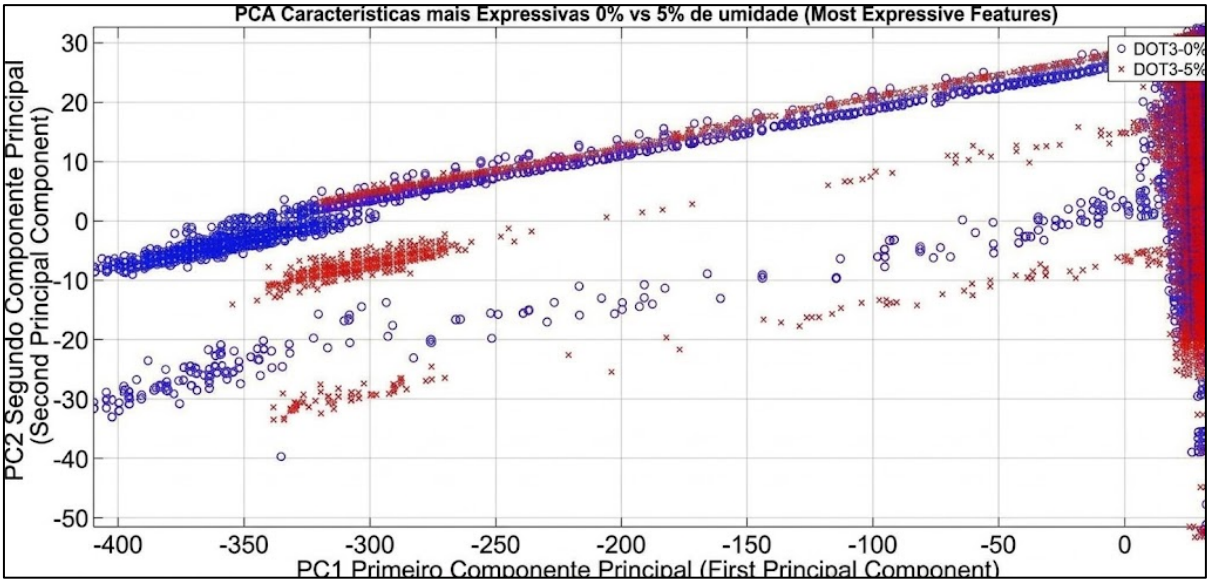
Fonte: Autor.

Na Figura 79, realiza-se uma segunda etapa para a análise exploratória utilizando a taxa de contaminação máxima de 5 % contra a de referência, onde há isenção de contaminação por umidade (DOT3 0%).

Conforme verificado na análise exploratória anterior, conforme Figura 78, o comportamento dinâmico geral observado na Figura 79, permanece estatisticamente similar. A dispersão espacial dos *clusters* aponta para um leve afastamento natural das fronteiras periféricas se comparado ao ensaio de 3%. No entanto, o fenômeno de *overlapping* tanto na região central como na região onde $PC_1 > 0$, demonstra comportamento de adensamento na concentração vertical de pontos para ambas as classes. Percebe-se também que ele se estende ao longo de quase todo o eixo PC_2 (de -50 a +30), contudo, desta vez, apresentando maior densidade entre PC_2 (de -30 a +30).

Da mesma forma, entende-se que as características de distribuição similares se fazem presentes, reforçando novamente a complexidade das assinaturas térmicas e mecânicas coletadas.

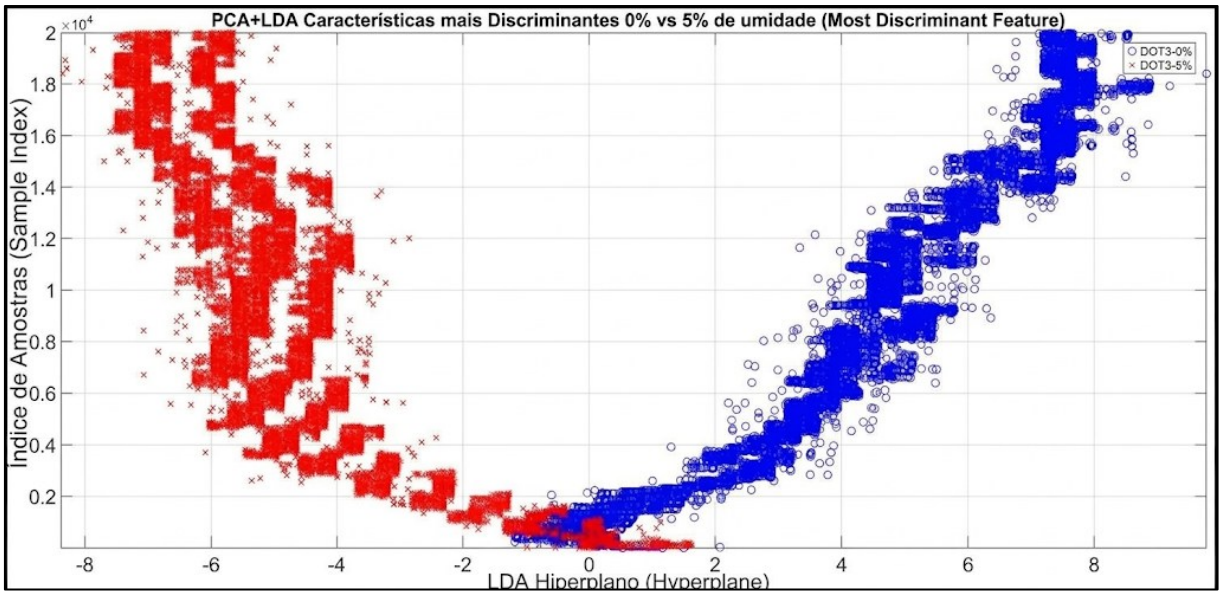
Figura 79 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Na Figura 80, assim como verificado no primeiro cenário, a inserção da Análise Discriminante Linear permite a segregação das fronteiras. Nota-se um limiar de decisão espacial perfeitamente limpo ao longo do eixo LD1.

Figura 80 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0% e 5% de umidade.

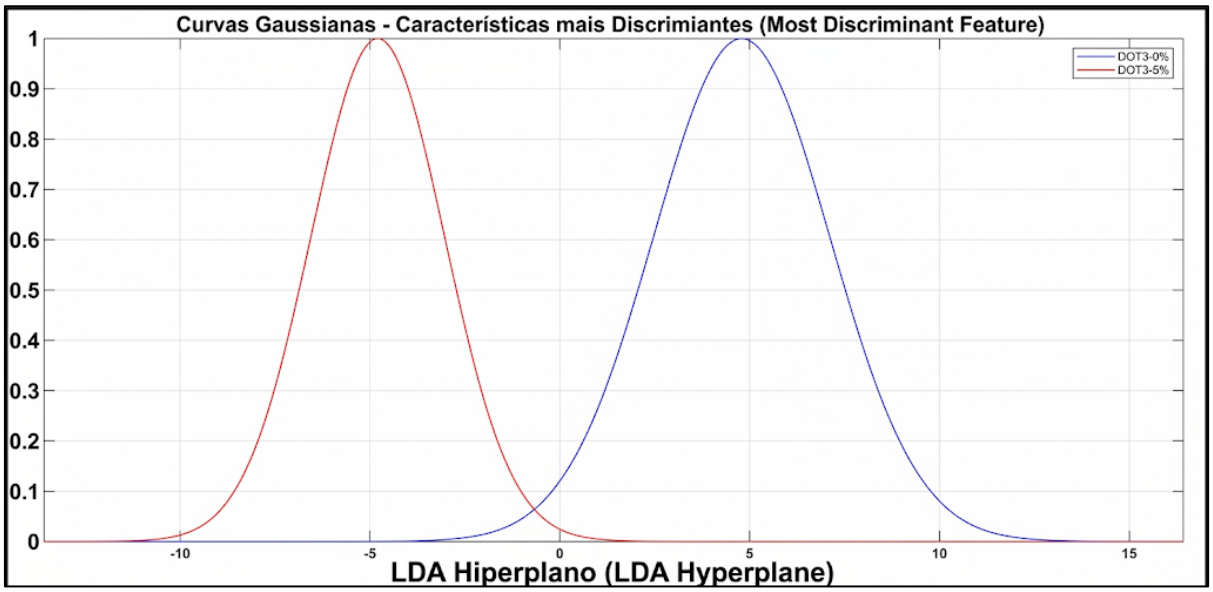


Fonte: Autor.

A distância física e estatística entre o centroide da classe controle (0%) e o centroide da classe degradada (5%) consolida a robustez matemática da rotina desenvolvida no MATLAB, provando que o modelo é capaz de rastrear assinaturas discriminantes mesmo com as variações dinâmicas impostas pelo método de ensaio.

A fim de aprofundar a validação estatística da separabilidade do modelo para as condições extremas do fluido DOT 3, a Figura 81 ilustra o mapeamento das curvas de densidade de probabilidade gaussianas ajustadas sobre as projeções dos dados de 0% e 5% de contaminação por umidade. Esta modelagem paramétrica permite quantificar a eficácia da Análise Discriminante Linear ao converter o espaço multidimensional das variáveis físicas em uma única dimensão otimizada (LD1). A distribuição gaussiana revela que, após a transformação matemática, não há intersecção significativa entre o quarto quartil do fluído de referência (DOT3 com 0% de umidade) e o primeiro quartil do fluído DOT3 com 5% de contaminação por umidade, consolidando assim, um claro limiar para a decisão espacial para a classificação de padrões e características discriminantes.

Figura 81 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT3 com 0% e 5%.

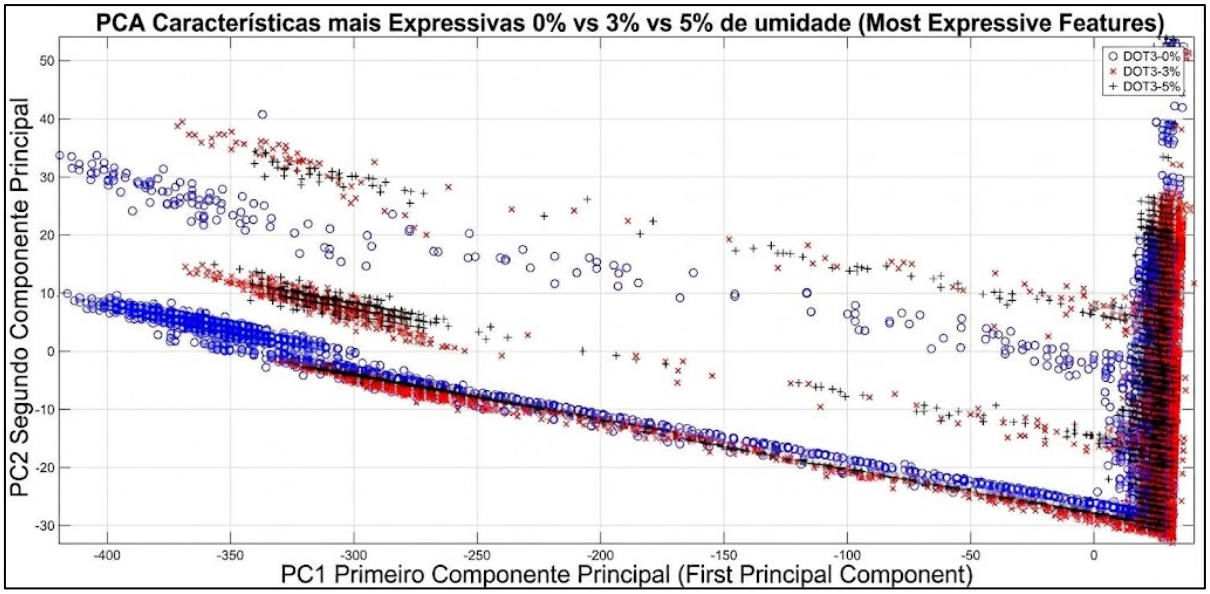


Fonte: Autor.

Esse comportamento demonstra que as funções ajustadas pelo algoritmo conseguem estabelecer uma fronteira de classificação inequívoca entre o estado íntegro do fluido e sua condição de máxima contaminação por umidade ensaiada.

Expandindo o escopo analítico para a avaliação simultânea de todas as classes experimentais do fluido DOT 3, a Figura 82 ilustra o gráfico de escores obtido por meio da Análise de Componentes Principais (PCA) aplicada ao conjunto integrado contendo as amostras de 0%, 3% e 5% de umidade. As duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) retêm, conjuntamente, a maior parte da variância global explicada do sistema. Sob esta ótica não supervisionada do PCA, observa-se a formação de tendências de agrupamento na periferia do espaço projetado, com um afastamento sutil da classe de maior contaminação (5%). Contudo, manifesta-se de forma acentuada um fenômeno de severa sobreposição estatística (*overlapping*) na região central do plano bidimensional, onde as fronteiras das três classes não se demonstram de forma assertiva para identificação de separação. Esse comportamento indica que as matrizes de variância-covariância brutas contêm assinaturas dinâmicas — decorrentes das transições térmicas e mecânicas contínuas do ensaio de frenagem — que compartilham trajetórias geométricas semelhantes, impossibilitando uma triagem linear direta e sem supervisão.

Figura 82 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

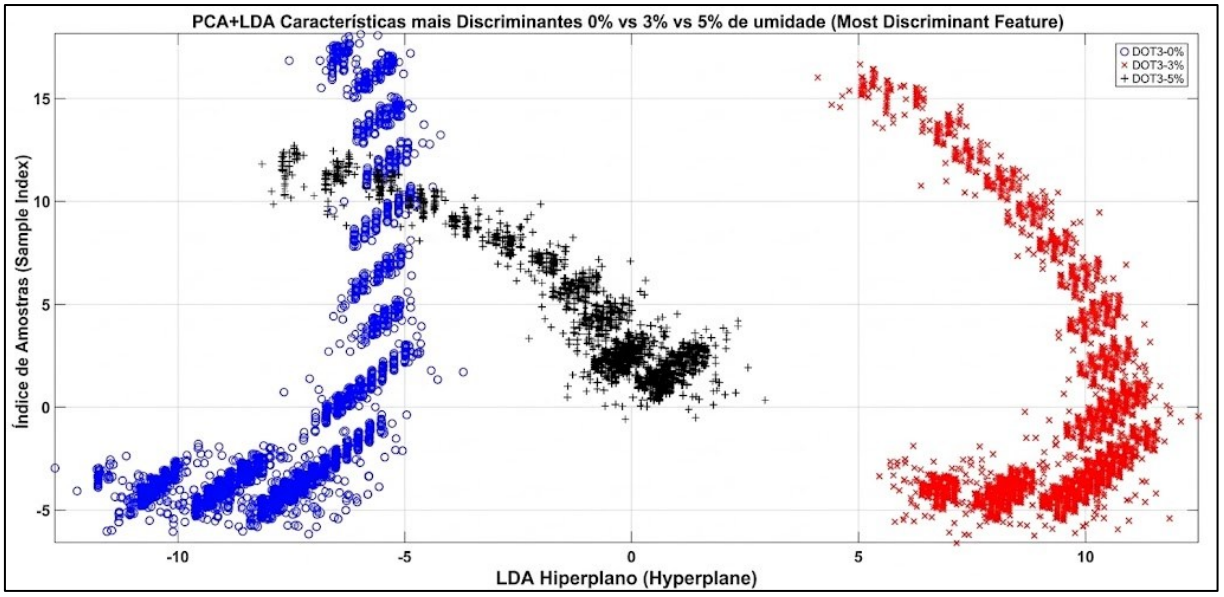
Para que haja a separação das amostras em estudo, há a necessidade da aplicação do PCA + LDA conforme ilustrado na Figura 83, que ilustra os resultados da integração supervisionada PCA + LDA para o cenário tri-classe (0%, 3% e 5% de umidade).

Ao projetar o espaço de características pré-reduzido pelo PCA sob o critério de otimização do discriminante linear, o modelo maximiza a distância entre as médias das três

populações ao mesmo tempo em que minimiza suas dispersões internas. O mapeamento resultante no espaço discriminante (LD1 versus LD2) consolida uma segregação categórica absoluta, na qual os três *clusters* são projetados em regiões ortogonalmente distintas e bem definidas.

A transição ordenada das classes ao longo do espaço amostral demonstra que a rotina implementada em MATLAB possui robustez matemática para rastrear e discriminar os níveis de contaminação do fluido DOT 3 de forma contínua, isolando as assinaturas físicas governantes mesmo sob as condições intrínsecas dos ensaios mecânico-térmico realizados.

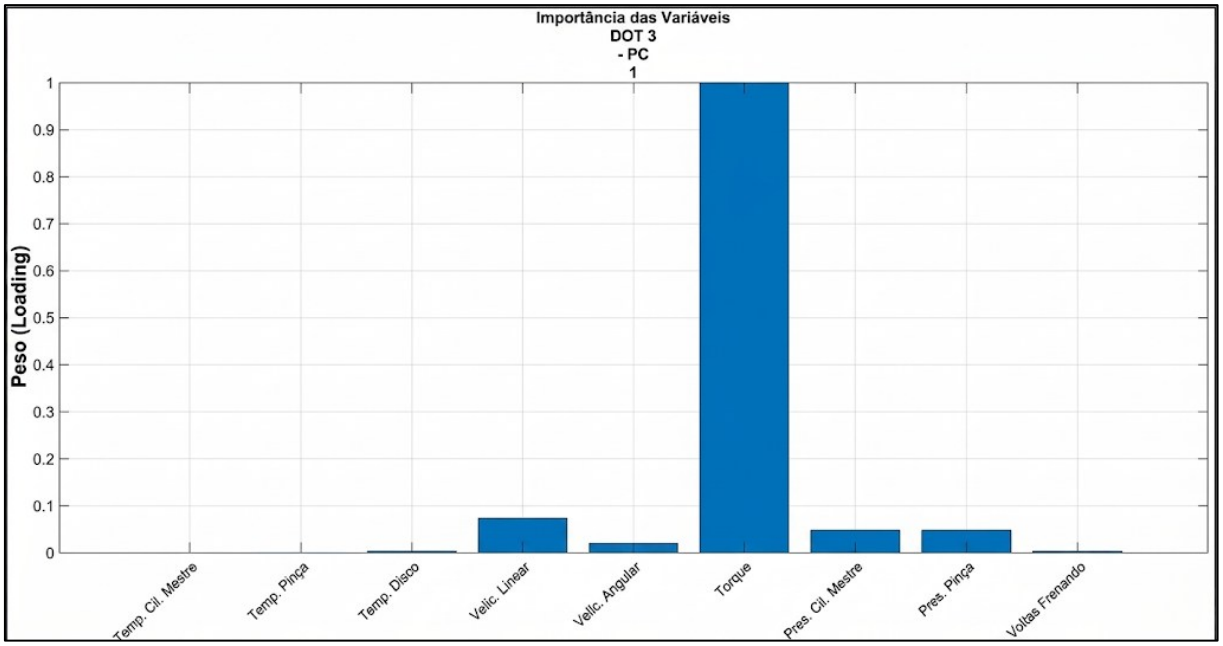
Figura 83 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A análise dos componentes principais para o DOT 3 revela que o primeiro componente principal (PC1), ilustrado na Figura 84, é dominado de forma praticamente exclusiva pela variável Torque, que apresenta um peso (*loading*) próximo de 1,0. Essa estrutura indica que o PC1 captura essencialmente a variabilidade associada ao torque aplicado no sistema de frenagem, representando a dimensão mecânica principal de força e resistência ao movimento. Tal resultado sugere que o torque constitui o principal eixo de variação no comportamento do sistema DOT3, refletindo naturalmente as diferenças operacionais e de carga que se manifestam diretamente na magnitude do torque gerado.

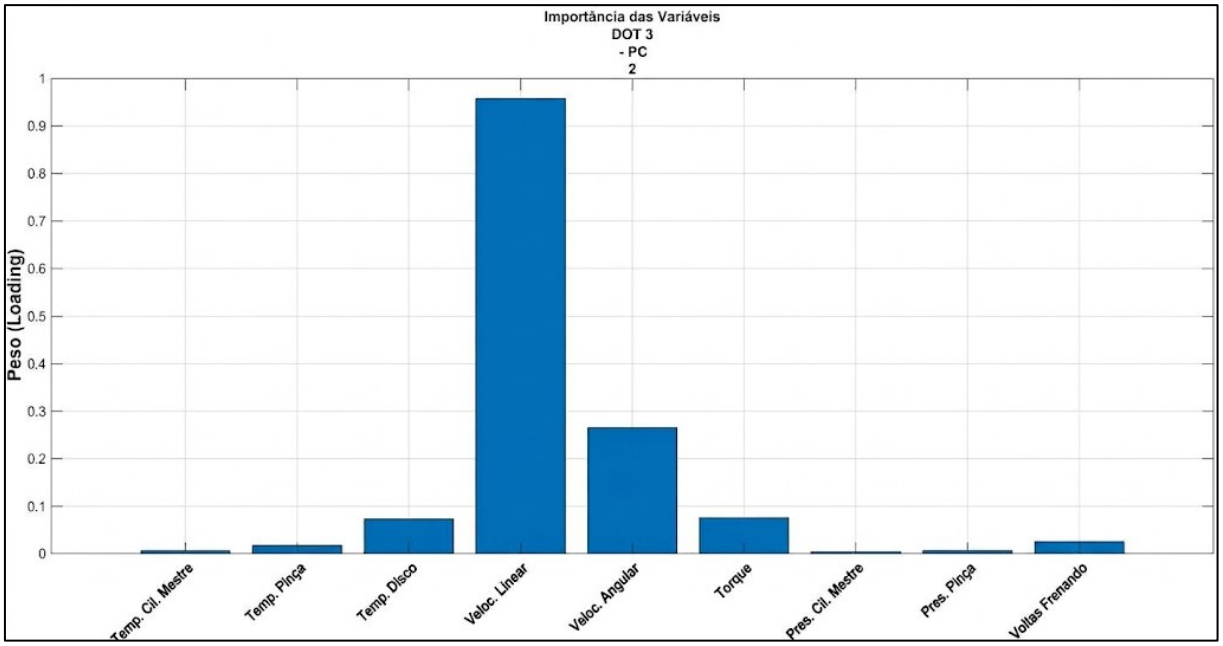
Figura 84 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

No segundo componente principal (PC2), ilustrado na Figura 85, observa-se uma dominância acentuada da Velocidade Linear, com *loading* superior a 0,95, acompanhada por uma contribuição moderada da Velocidade Angular (aproximadamente 0,26). As demais variáveis apresentam contribuições mínimas ou nulas. Essa composição aponta para uma dimensão cinemática do sistema, na qual a velocidade linear do veículo ou do componente de frenagem emerge como o principal fator de variabilidade, com a velocidade angular atuando como coadjuvante. O PC2, portanto, parece diferenciar os comportamentos do sistema com base na dinâmica de movimento, separando regimes de alta e baixa velocidade de forma clara e robusta.

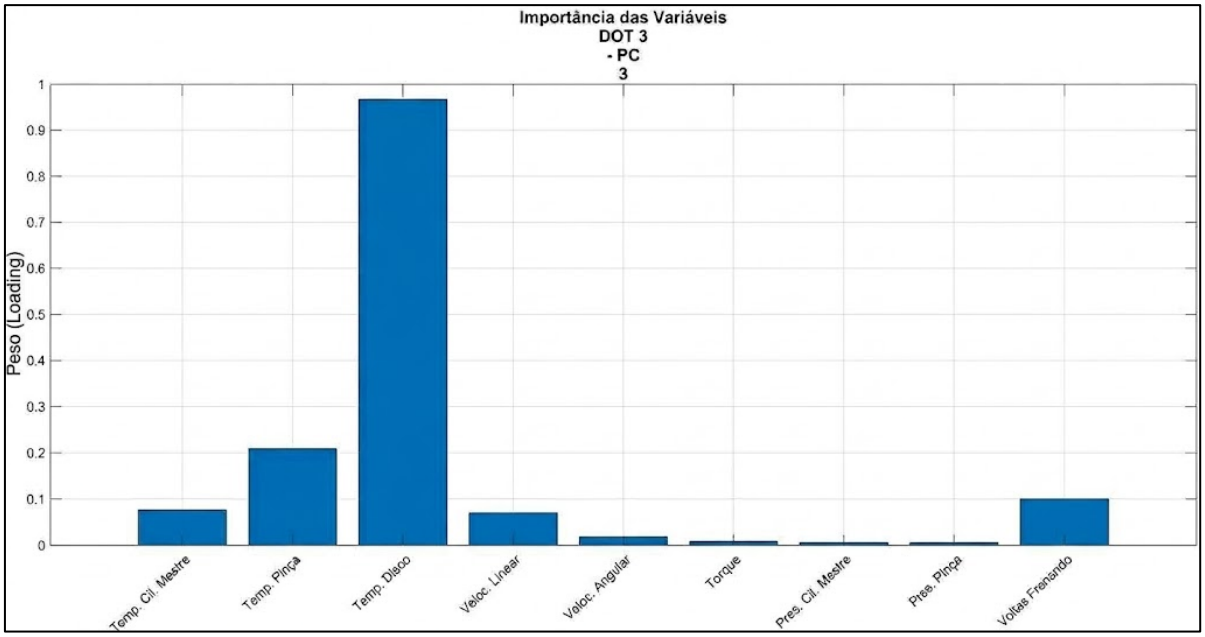
Figura 85 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

O terceiro componente principal (PC3), conforme ilustrado na Figura 86, é influenciado pela Temperatura do Disco, com *loading* próximo de 0,96, seguido por uma contribuição secundária da Temperatura da Pinça (cerca de 0,21). Essa configuração indica que o PC3 captura a variabilidade térmica associada principalmente ao disco de freio, elemento que tipicamente absorve a maior parte da energia cinética convertida em calor durante a frenagem. A menor participação da temperatura da pinça reforça a ideia de que o disco atua como o principal dissipador térmico no sistema, tornando esse componente relevante para a análise de desempenho térmico e possíveis efeitos de fade em operações repetidas.

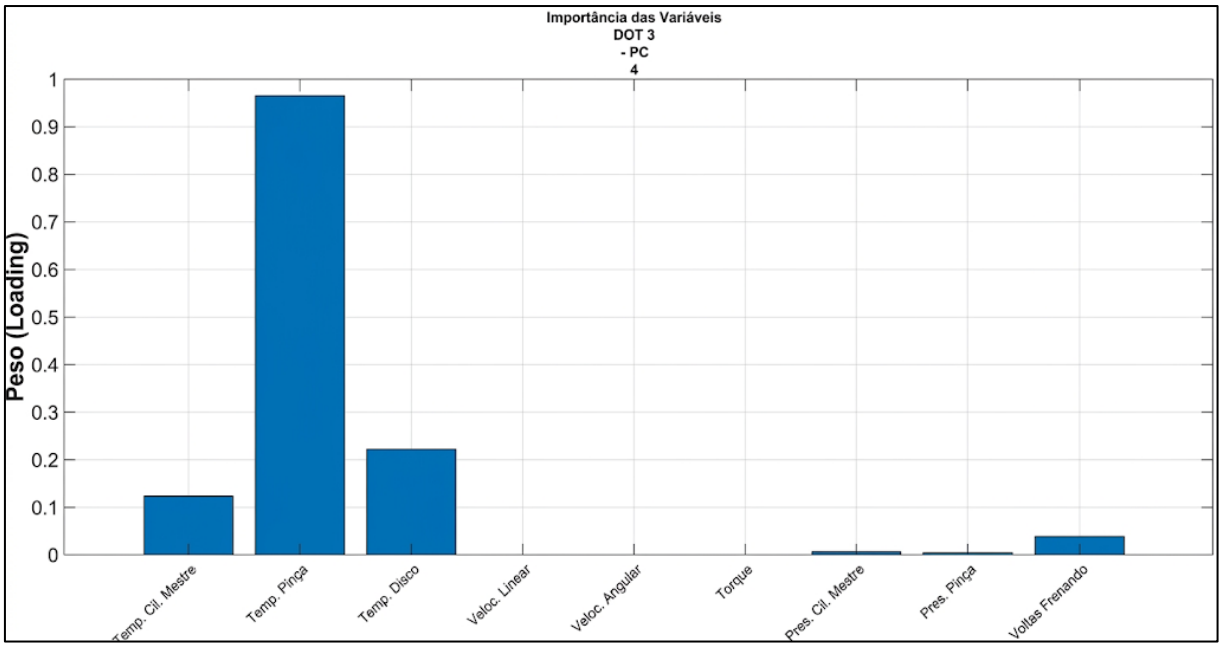
Figura 86 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Já o quarto componente principal (PC4), ilustrado na Figura 87, apresenta dominância da Temperatura da Pinça (*loading* superior a 0,95), com contribuição secundária da Temperatura do Disco (aproximadamente 0,22).

Figura 87 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.

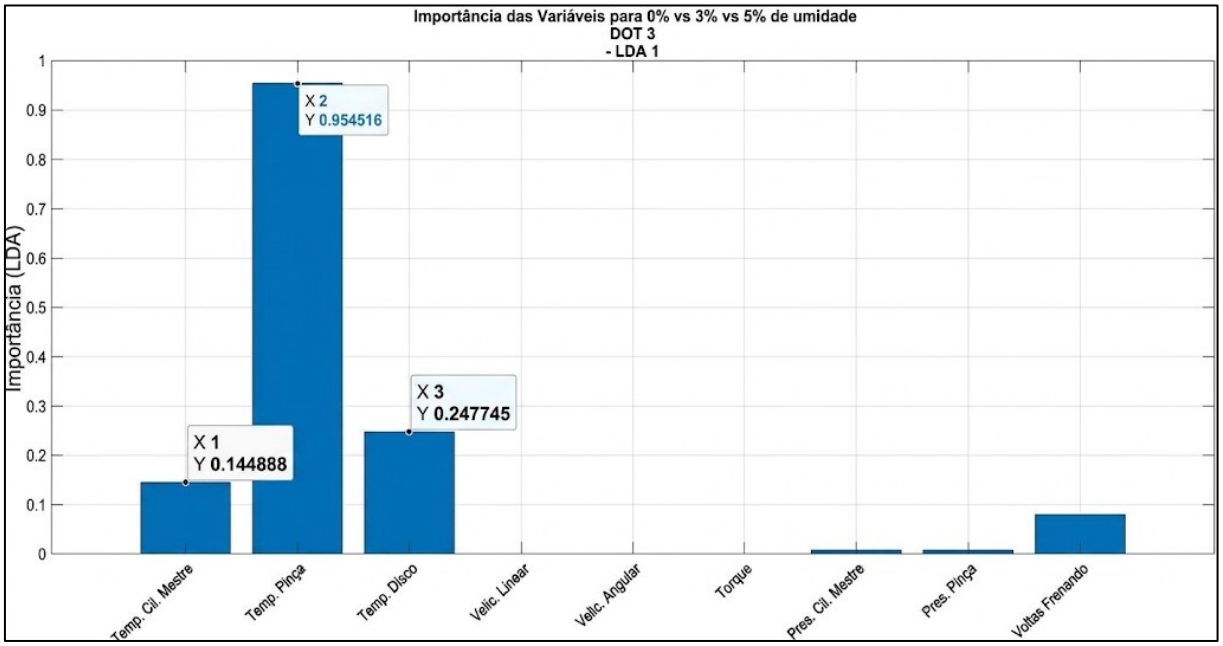


Fonte: Autor.

Essa inversão em relação ao PC3 sugere que o PC4 isola uma dimensão térmica específica relacionada à pinça, possivelmente refletindo variações no comportamento térmico desse componente em condições distintas daquelas que afetam predominantemente o disco. Juntos, PC3 e PC4 evidenciam a importância da gestão térmica no sistema de frenagem DOT 3, separando os efeitos térmicos entre os principais elementos dissipadores.

A análise discriminante linear (PCA + LDA), ilustrada na Figura 88, complementa os achados da PCA ao se concentrar na capacidade de separação entre classes ou condições do sistema. No primeiro discriminante linear (LD1), a Temperatura da Pinça novamente se destaca com *loading* extremamente alto (aproximadamente 0,95), seguida pela Temperatura do Disco (cerca de 0,25) e contribuições menores de outras variáveis, como Temperatura do Cilindro Mestre e Voltas Frenando. Esse padrão reforça o papel central das variáveis térmicas, especialmente da pinça, na caracterização discriminante do comportamento do sistema, sugerindo que diferenças térmicas são altamente informativas para distinguir regimes operacionais ou classes de desempenho no DOT 3.

Figura 88 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.

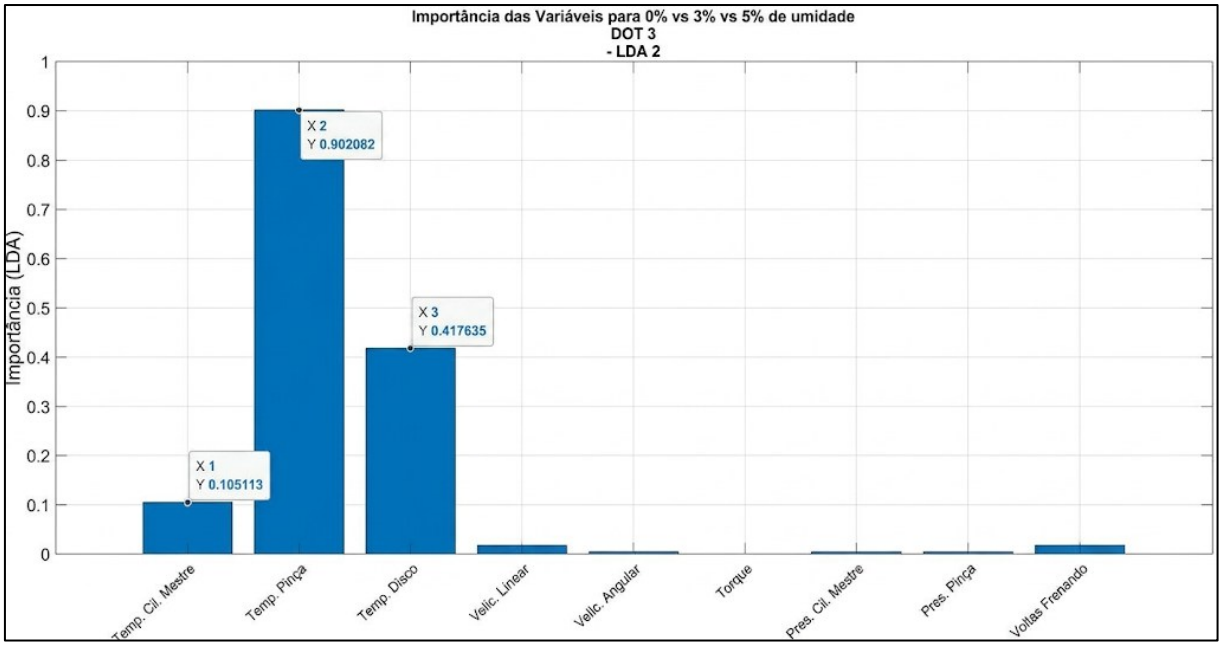


Fonte: Autor.

No segundo discriminante linear (LD2), ilustrado na Figura 89, demonstra a predominância da influência da Temperatura da Pinça (*loading* em torno de 0,90), com

contribuições relevantes da Temperatura do Disco (aproximadamente 0,42) e participações menores da Velocidade Linear. A persistência da dominância térmica nos discriminantes lineares indica que as variáveis de temperatura são as mais eficazes para a separação supervisionada das condições do sistema, complementando a redução de dimensionalidade não supervisionada da PCA. Esses resultados sugerem que o monitoramento térmico, particularmente da pinça e do disco, é fundamental tanto para explicar a variância total quanto para discriminar comportamentos distintos no sistema de frenagem DOT 3, oferecendo subsídios robustos para modelagem preditiva e otimização de desempenho.

Figura 89 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



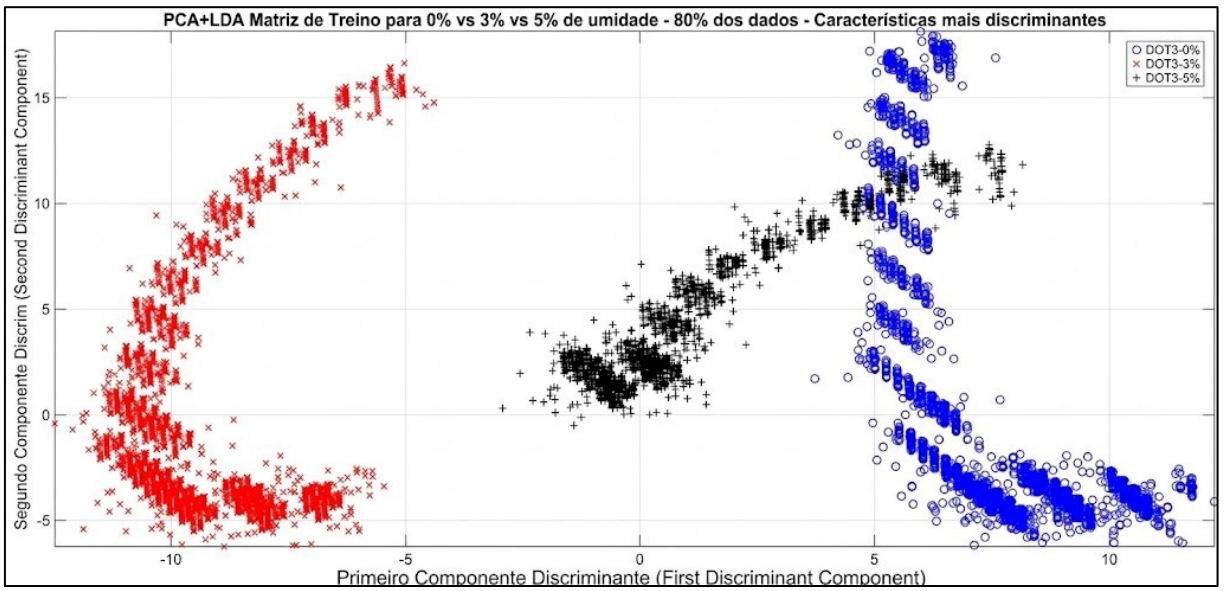
Fonte: Autor.

A projeção dos dados de treinamento (80% do *dataset*), nos dois primeiros componentes discriminantes obtidos pela combinação de PCA e LDA demonstra uma separação clara e estruturada entre as três classes analisadas no sistema DOT3, conforme ilustrado na Figura 90.

Os pontos correspondentes à classe DOT3 (0%) (marcados em vermelho) formam um agrupamento extenso e curvo na região esquerda do gráfico, caracterizado por valores negativos elevados no primeiro componente discriminante e uma ampla dispersão ao longo do segundo componente. Em contraste, a classe DOT3 (3%) (marcados em preto) concentra-se em uma região central compacta, com valores próximos de zero no primeiro componente e predominantemente negativos no segundo. Já a classe DOT3 (5%) (marcados em azul) ocupa a

região direita, exibindo valores positivos no primeiro componente discriminante e uma tendência ascendente. Essa configuração indica que o modelo discriminante é capaz de capturar efetivamente as diferenças multivariadas entre as condições, com o primeiro componente atuando como o principal eixo de separação entre os níveis de contaminação ou condição do fluido, enquanto o segundo componente auxilia na distinção de variações internas.

Figura 90 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de treino com 80% dos dados.



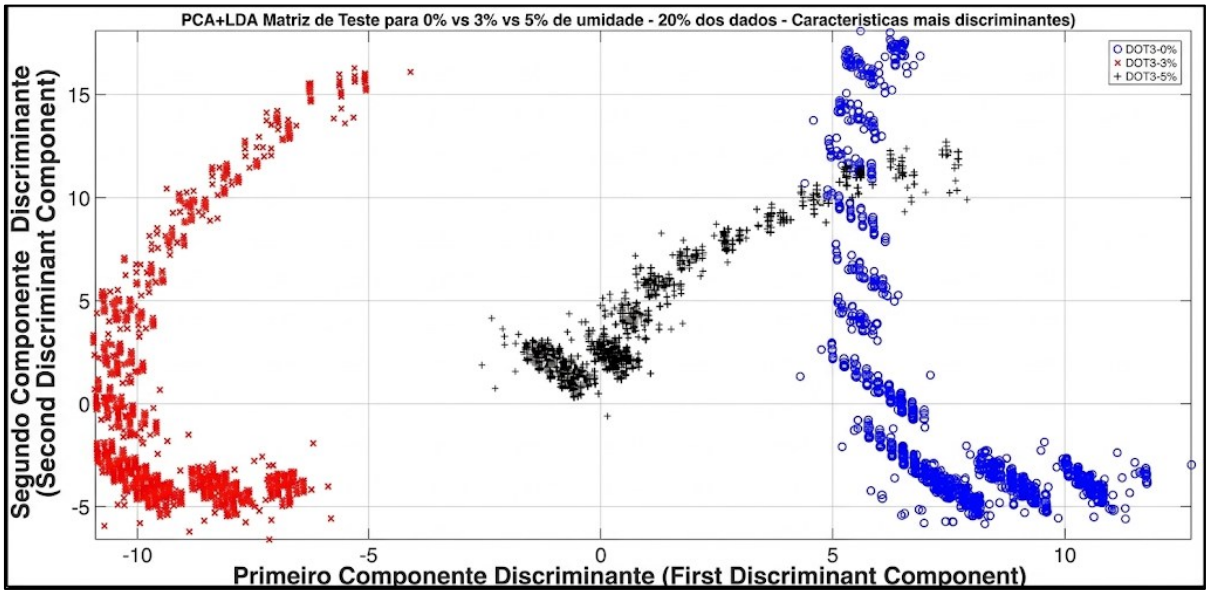
Fonte: Autor.

No conjunto de teste (20% do *dataset*), a projeção nos mesmos dois componentes discriminantes revela um padrão de separação consistentemente similar ao observado no treinamento, evidenciando boa capacidade de generalização do modelo, conforme ilustrado na Figura 91.

Os pontos da classe DOT3 (0%) mantêm-se na região esquerda com configuração curvilínea, embora com ligeira redução na amplitude vertical em comparação ao treinamento. A classe DOT3 (3%) continua concentrada na região central, com densa aglomeração, e a classe DOT3 (5%) preserva sua posição na região direita, com clara tendência positiva no primeiro componente. Observa-se uma sobreposição mínima entre as classes, restrita a poucos pontos de transição, o que sugere robustez do classificador mesmo em dados não vistos. A manutenção da estrutura espacial entre treino e teste reforça a confiabilidade das variáveis selecionadas

(principalmente térmicas e cinemáticas) para a discriminação supervisionada do comportamento do sistema DOT 3 sob diferentes condições.

Figura 91 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de teste com 20% dos dados.



Fonte: Autor.

Em conjunto, os resultados das projeções nos espaços discriminantes confirmam que a abordagem PCA + LDA é eficaz tanto para redução de dimensionalidade quanto para classificação das condições do fluido de freio DOT 3. A separação nítida entre as classes, especialmente ao longo do primeiro discriminante, indica que as características extraídas conseguem distinguir com elevada acurácia os comportamentos associados aos diferentes percentuais analisados (0%, 3% e 5). Essa performance valida o uso de variáveis como temperaturas da pinça e do disco, velocidades e torque como preditores potentes, abrindo caminho para aplicações em monitoramento em tempo real e diagnóstico preditivo de sistemas de frenagem em condições operacionais variáveis.

A consolidação da capacidade preditiva e a validação estatística do modelo supervisionado para o fluido DOT 3 foram realizadas por meio do acoplamento do classificador baseado no algoritmo dos KNN ($K = 1$), submetido a um processo estocástico de validação cruzada contendo 50 interações independentes.

Para avaliar a robustez do algoritmo frente ao sobreajuste (*overfitting*), a matriz de dados original foi sistematicamente particionada em subconjuntos ortogonais, destinando 80% das

amostras para a etapa de treinamento e os 20% restantes para a etapa de classificação e teste. Os resultados consolidados desse processo são apresentados na Tabela 5, a qual detalha a distribuição dos acertos e erros do classificador para cada nível de contaminação. Das 200.000 instâncias pertencentes à classe de referência (0%), 199.825 amostras foram corretamente preditas, registrando-se apenas 175 falsos positivos direcionados erroneamente para a classe de máxima contaminação (5%). Para a classe intermediária de 3%, o classificador atingiu a acurácia perfeita de 100%, mapeando com exatidão todas as 200.000 amostras em sua respectiva categoria real. Por fim, a classe de 5% de umidade apresentou 199.781 classificações corretas e apenas 219 omissões (*misses*) direcionadas para o grupo de 0%, evidenciando um limiar de decisão extremamente assertivo entre as fronteiras dinâmicas dos dados.

Tabela 5 – Matriz de confusão média para o fluido DOT 3 após 50 interações.

Taxa de Contaminação	**Predição**		
(%m/m) Classe Real	**(0%)**	**(3%)**	**(5%)**
(0%)	199825	0	175
(3%)	0	200000	0
(5%)	219	0	199781

Fonte: Autor.

A quantificação do desempenho analítico do classificador KNN reflete o grau de separabilidade alcançado previamente pelas funções discriminantes lineares. O modelo registrou métricas globais idênticas de precisão (*precision*), sensibilidade (*recall*) e F_1-score na ordem de 99,94%, associadas a uma acurácia global também estabelecida em 99,94%. Sob a análise interativa de 50 repetições, a acurácia média estabilizou-se em 99,93%, o que atesta a repetibilidade e a estabilidade matemática do algoritmo diante de diferentes permutações das matrizes de treinamento e teste. Esse comportamento comprova que as assinaturas físicas e térmicas extraídas ao longo do ensaio mecânico não sofrem degradação estatística quando submetidas a algoritmos de aprendizado de máquina de baixa complexidade computacional, validando a eficácia da arquitetura proposta para aplicações de monitoramento em tempo real.

Complementarmente à eficiência numérica, o modelo foi submetido à rotina de diagnóstico automatizado para atestar sua viabilidade prática na identificação de falhas e degradação em sistemas térmicos e mecânicos automotivos. Utilizando as assinaturas do fluido DOT 3 a 0% de umidade como o padrão de referência absoluto para o comportamento não

contaminado, o algoritmo foi provocado com vetores de teste desconhecidos oriundos de amostras com 3% de umidade. O sistema computacional convergiu de forma robusta e inequívoca, gerando um diagnóstico positivo de fluido contaminado para as amostras degradadas por umidade e de fluido não contaminado para a classe controle, conforme esquematizado no Quadro 1. Esse resultado consolida a tese de que a abordagem metodológica desenvolvida neste trabalho transcende a modelagem estatística puramente descritiva, constituindo uma ferramenta de diagnóstico preditivo viável, rápida e de alta sensibilidade para a engenharia automotiva e de materiais.

Quadro 1 – Diagnóstico automatizado de falha com base na classificação supervisionada (DOT 3).

Condição Avaliada	**Fluido de Referência**	**Diagnóstico do Sistema**
Teste 1 (Amostra 0%)	DOT 3 — 0% de umidade	Fluido NÃO contaminado
Teste 2 (Amostra 3%)	DOT 3 — 0% de umidade	Fluido CONTAMINADO

Fonte: Autor.

5.4.2 Fluído DOT4

A metodologia de redução de dimensionalidade e reconhecimento de padrões foi aplicada utilizando a mesma estratégia dos fluídos DOT3 ao explorar a matriz de dados (*dataset*) através de análise do PCA para as amostras DOT4 com 0% de contaminação por umidade com as amostras contaminadas com 3% e 5% de umidade.

Em um segundo momento os resultados do PCA são submetidos a simulações de LDA para as amostras do fluido de freio DOT4 com o objetivo de avaliar o impacto de diferentes níveis de contaminação por umidade (0%, 3% e 5%) em suas propriedades físico-químicas monitoradas.

A análise de componentes principais (PCA) ilustrada na Figura 92, foi empregada para projetar o espaço de dados de alta dimensão nas direções de maior variância global. Os resultados dessa projeção revelam que a distribuição dos dados não assume uma conformação estocástica ou em agrupamentos isotrópicos convencionais; pelo contrário, manifesta-se por meio de estruturas lineares bem definidas na forma de estrias ou bandas paralelas que convergem para uma zona de alta densidade volumétrica na Primeira Componente Principal.

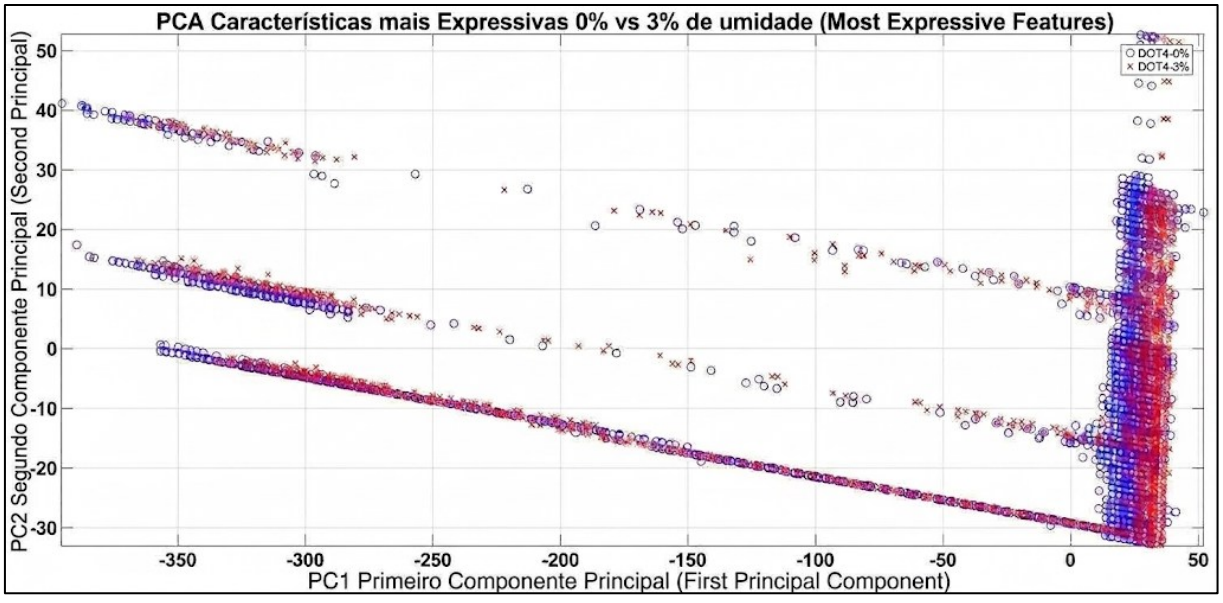
Na Figura 92, o gráfico demonstra a projeção de um conjunto de dados multivariados no espaço bidimensional definido pelos dois primeiros componentes principais, PC_1 (Primeiro

Componente Principal) e PC_2 (Segundo Componente Principal). O objetivo principal desta análise de componentes principais (PCA) é avaliar a capacidade de discriminação e redução de dimensionalidade das características mais expressivas extraídas de amostras sob duas condições experimentais distintas: 0% de umidade (representada pelos círculos azuis, DOT4-0%) e 3% de umidade (representada pelas cruzes vermelhas, DOT3-3%).

Observa-se que, de forma não supervisionada através do PCA, os agrupamentos (*clusters*) referentes ao fluido puro (0%) e contaminado (3%) apresentam zonas de sobreposições (*overlapping*). Na região direita do gráfico, especificamente na região onde $PC_1 > 0$, percebe-se que o comportamento de adensamento na concentração vertical de pontos de ambas as classes que se estende ao longo de quase todo o eixo PC_2 (de -33 a mais de +30).

Essa assinatura geométrica evidencia uma dependência temporal ou transiente intrínseca ao protocolo de ensaio físico, indicando que a variância majoritária capturada pelo PCA está associada à dinâmica interna da própria varredura instrumental. Por conseguinte, ao confrontar as condições de fluido puro DOT4 (0%) e com contaminação incipiente DOT4 (3%) conforme ilustrado na Figura 92, constata-se que o PCA, isoladamente, requer de resolução discriminatória, resultando em uma majoritária sobreposição das assinaturas físicas de ambas as classes.

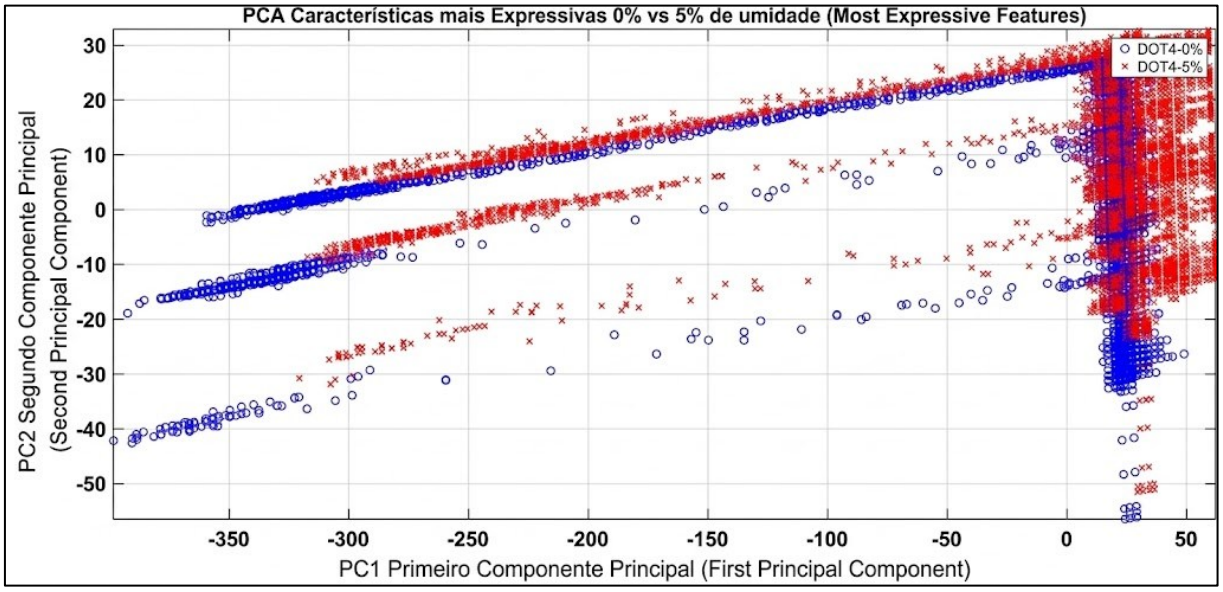
Figura 92 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT4 com 0% e 3% de umidade.



Fonte: Autor.

Á medida que o teor de contaminação por umidade se eleva para o patamar de 5% de contaminação por umidade, conforme ilustrado na Figura 93, o comportamento global mapeado através do PCA passa a caracterizar um deslocamento incremental na região onde $0 < PC_1 < 60$, observa-se que o comportamento de adensamento na concentração dos dados ao longo do eixo da segunda componente principal PC_2 para os pontos de ambas as classes se estendendo ao longo de quase todo o eixo PC_2 (de -48 a +35).

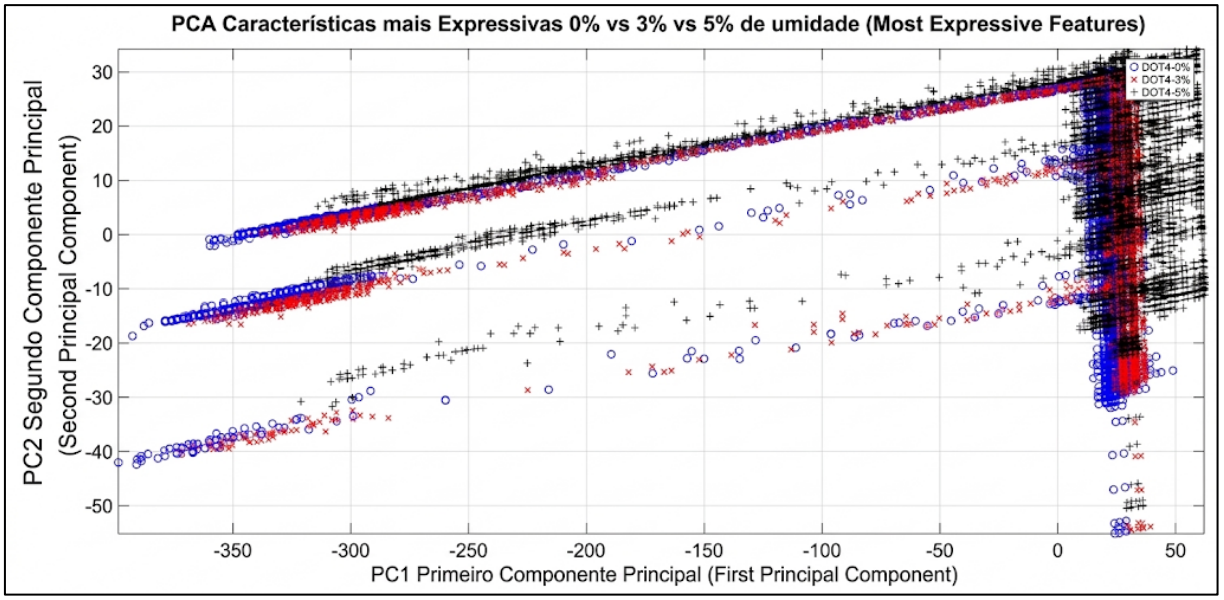
Figura 93 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A visualização simultânea dos três níveis de contaminação, conforme ilustrado na Figura 94, reitera que a variabilidade intra-ensaio se sobrepões a variabilidade interclasse no espaço ortogonal do PCA, o que restringe a aplicação dessa técnica estritamente a um caráter de inspeção expressiva e de compressão de dados, demandando abordagens supervisionadas para fins de diagnóstico e classificação.

Figura 94 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT3 com 0%, 3% e 5% de umidade.



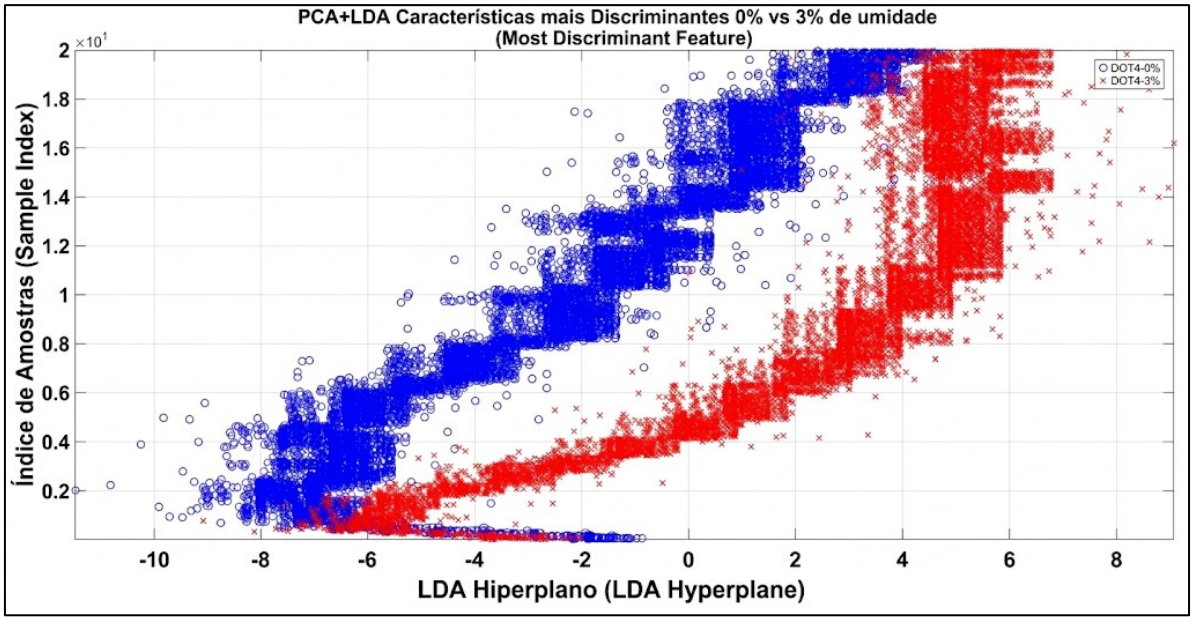
Fonte: Autor.

Para superar as limitações impostas pela sobreposição de variância do PCA, introduz-se a Análise Discriminante Linear (LDA) combinada com o PCA a fim de maximizar a razão entre a variância interclasse e a variância intraclasse.

No cenário de classificação binária entre o fluido sem contaminação e a amostra com 3% de contaminação, a projeção no hiperplano discriminante passa a delinear duas macrorregiões de concentração ao longo do índice amostral.

Conforme ilustrado na Figura 95, o classificador linear obteve sucesso na separação, contudo, há uma zona de transição compartilhada onde os perfis de ambas as classes se interpenetram. Esta característica pode se configurar num limite de detecção onde métodos de decisão puramente lineares operam sob o risco de taxas residuais de falsos positivos ou negativos devido à proximidade das fronteiras de transição do fluido.

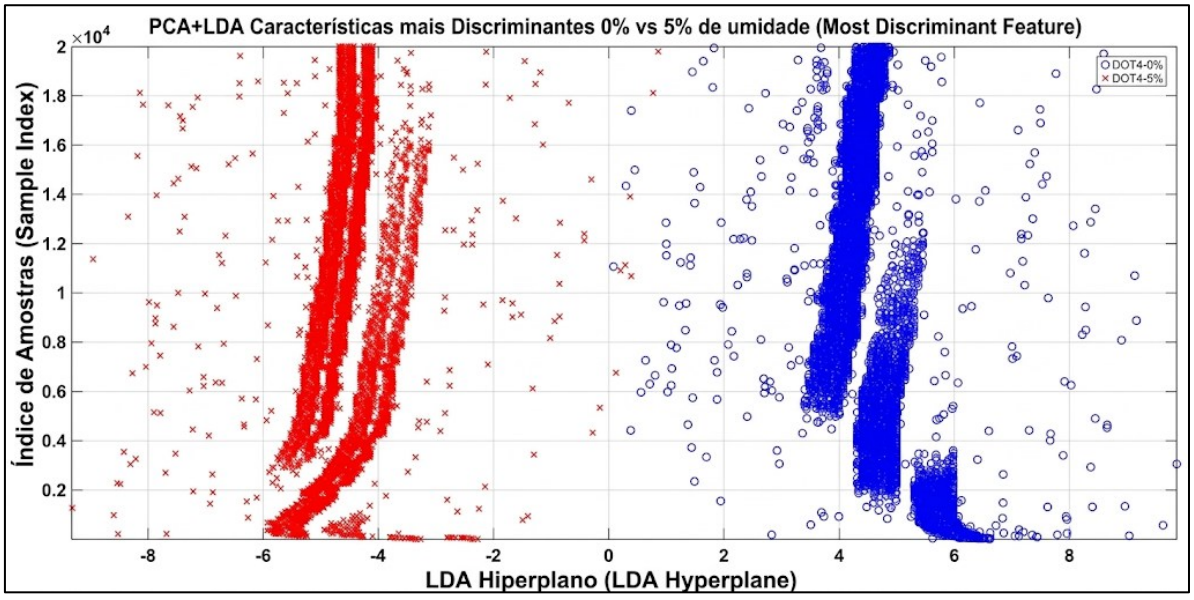
Figura 95 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0% e 3% de umidade.



Fonte: Autor.

Ao realizar a análise entre o fluído de referência com a amostra com 5% de umidade, a técnica do PCA + LDA, conforme ilustrado na Figura 96, alcança uma condição de separabilidade linear robusta, segregando de forma de forma consistente os agrupamentos em hemisférios opostos do hiperplano de decisão.

Figura 96 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0% e 5% de umidade.

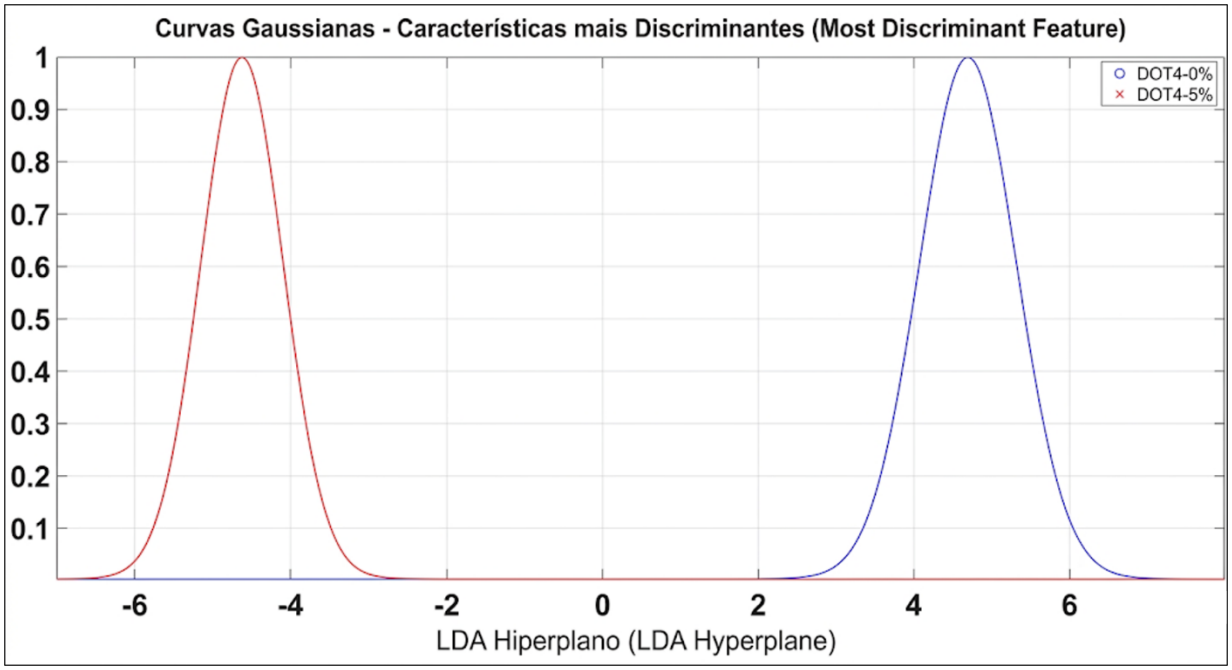


Fonte: Autor.

A robustez matemática dessa segregação é ratificada por meio da modelagem estocástica das densidades de probabilidade baseada em distribuições gaussianas ajustadas sobre o espaço projetado pelo LDA, conforme ilustrado na Figura 97.

A ausência completa de intersecção ou de área de sombreamento entre as funções de distribuição de probabilidade corrobora que o vetor de pesos discriminantes linear obteve sucesso em isolar as assinaturas físicas latentes que governam a transição química do fluido, permitindo a definição de um limiar exato de decisão com acurácia teórica de classificação de 100% para este binômio operativo.

Figura 97 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT4 com 0% e 5%.



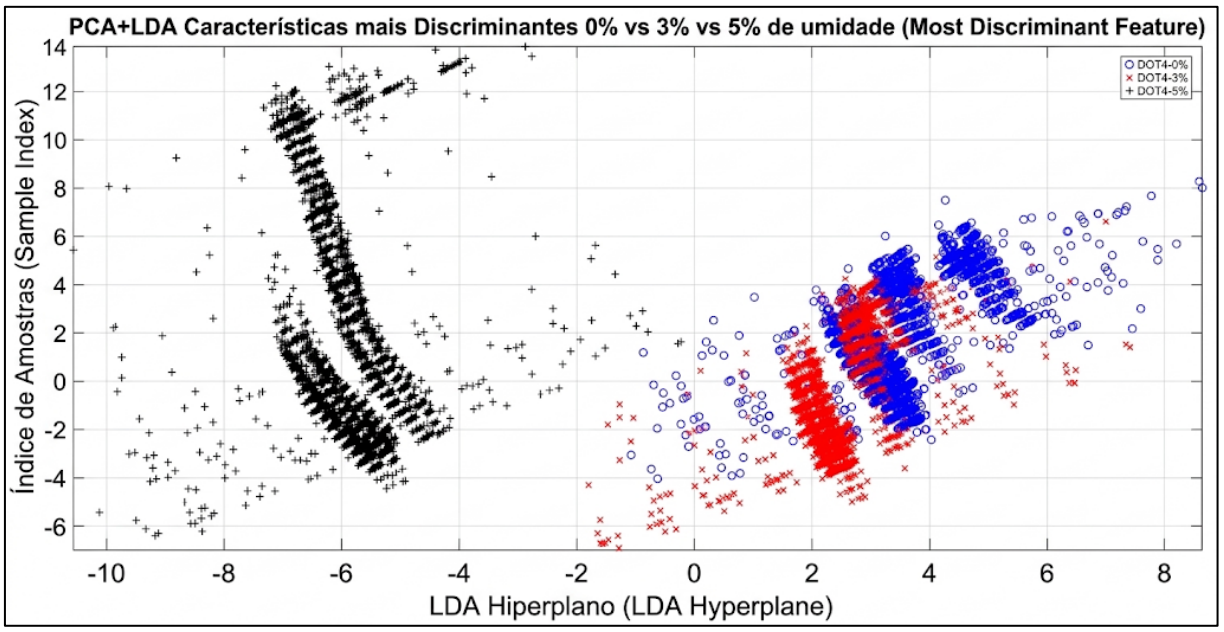
Fonte: Autor.

Por fim, a expansão do modelo discriminante para um cenário multiclasse simultâneo (0% *versus* 3% *versus* 5%) solidifica o entendimento físico sobre o mecanismo de contaminação progressiva do fluido de freio DOT4.

A projeção espacial gerada pelas duas primeiras componentes discriminantes revela, conforme ilustrado na Figura 98, uma trajetória contínua de afastamento conforme a umidade se eleva, na qual o estado de 5% de contaminação estabelece uma topologia completamente isolada e com dinâmica geométrica própria na extremidade negativa do primeiro eixo discriminante.

O aspecto mais relevante sob a óptica de diagnóstico preditivo reside no posicionamento da classe de 3%, que se distribui exatamente na região de fronteira e de transição molecular, preenchendo o espaço geométrico que conecta o fluido ideal (0%) ao fluido com a máxima taxa de contaminação (5%). Essa disposição espacial confere fundamentação analítica para interpretar a evolução da falha no fluido DOT4 não como um evento discreto, mas como um gradiente termodinâmico contínuo passível de ser rastreado e quantificado por meio do arcabouço de inteligência computacional proposto.

Figura 98 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.

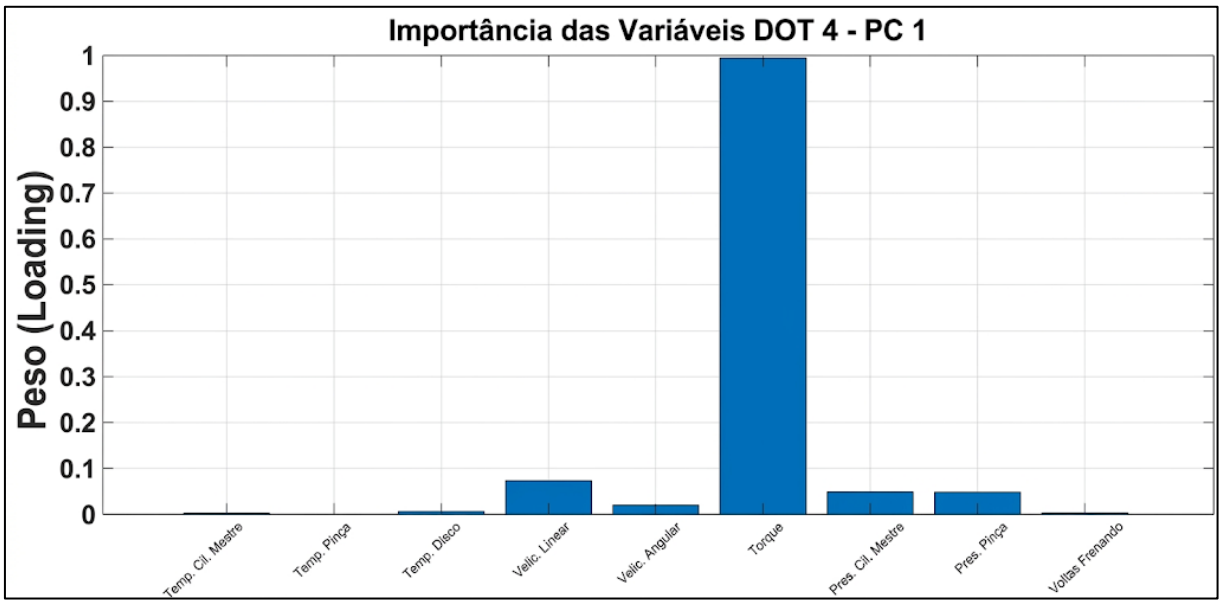


Fonte: Autor.

A compreensão aprofundada dos mecanismos de projeção e classificação exige o mapeamento dos pesos (*loadings*) das variáveis físicas originais sobre os componentes gerados pelo PCA e pelo LDA. A análise das contribuições vetoriais na primeira componente principal (PC1), conforme ilustrado na Figura 99, revela que a variância dominante do sistema é majoritariamente governada pela variável Torque, a qual atinge o patamar unitário de peso representativo. Esse resultado fornece a fundamentação matemática para o comportamento linear em estrias observado nos mapeamentos globais prévios; dado que o ensaio dinâmico impõe flutuações do torque mecânico durante os ciclos de frenagem, a PC1 atua essencialmente como um indexador da severidade da carga mecânica instantânea aplicada ao sistema. As demais variáveis, tais como velocidade linear e pressões hidráulicas, exibem participações

marginais nesta componente, consolidando a PC1 como um eixo predominantemente operativo e cinemático.

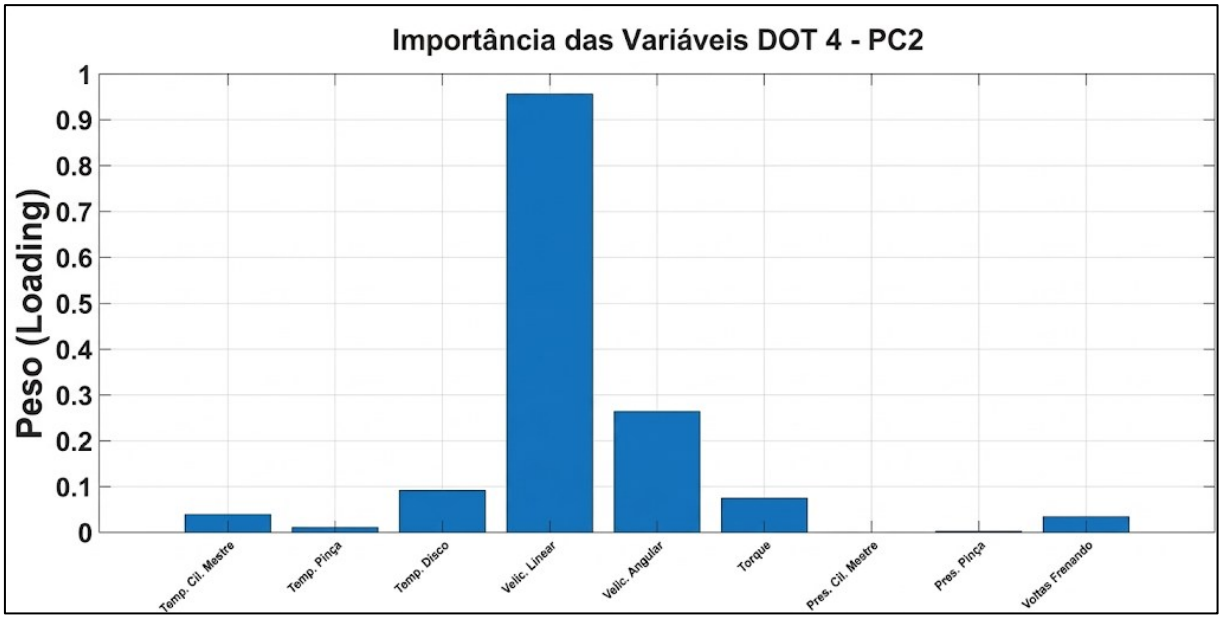
Figura 99 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Ao deslocar o escopo analítico para a segunda componente principal (PC2), observa-se uma inversão na dinâmica de dominância das grandezas físicas. Conforme ilustrado na Figura 100, o Torque deixa de exercer papel central, transferindo o protagonismo vetorial para a Velocidade Linear, que assume peso superior a 0,95, sendo que a Velocidade Angular se apresenta de forma secundária no peso das variâncias. Essa transição indica que, enquanto a PC1 absorve a magnitude dos esforços de torção, a PC2 especializa-se em codificar o estado cinético e de desaceleração do aparato experimental. A decomposição ortogonal promovida pelo PCA consegue, portanto, isolar o binômio dinâmico essencial do ensaio mecânico (Torque versus Velocidade) em seus dois primeiros eixos de projeção.

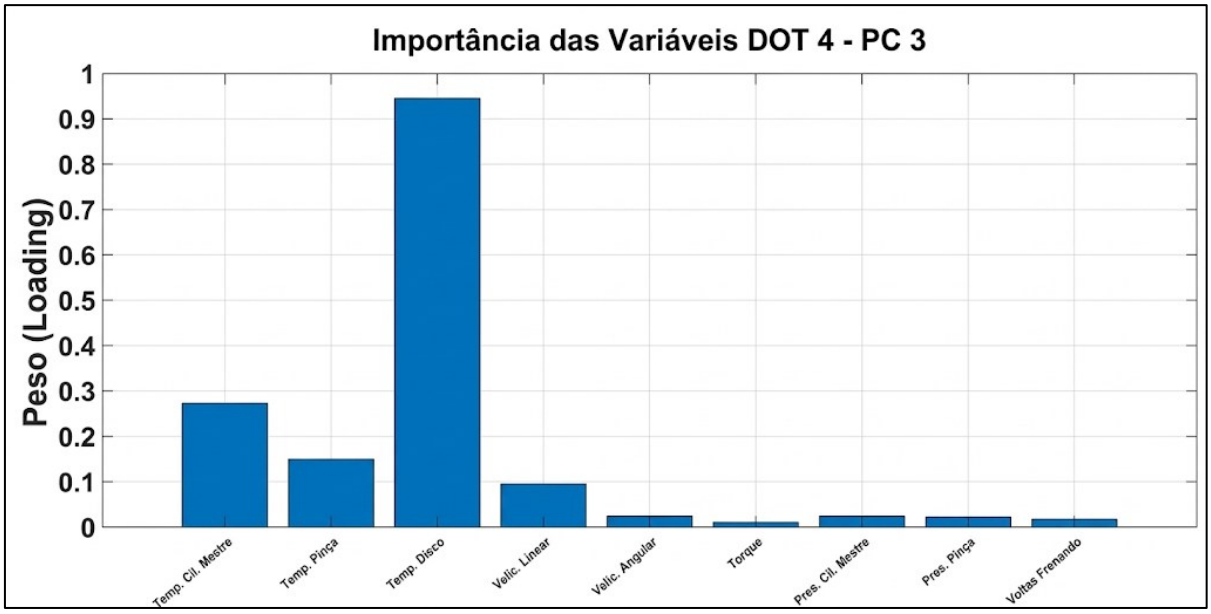
Figura 100 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Por sua vez, conforme ilustrado nas Figuras 101 e 102, a terceira e a quarta componentes principais (PC3 e PC4) passam a registrar o acúmulo das variações térmicas e dos transientes de escoamento do sistema de freio. Na componente principal PC3, a Temperatura do Disco assume a dominância absoluta com peso aproximado de 0,95, espelhando a dissipação de energia cinética em calor diretamente na interface de atrito metálico. A Temperatura do Cilindro Mestre, por estar posicionada hidraulicamente a montante da pinça e isolada do contato direto com o disco, manifesta uma contribuição secundária neste eixo.

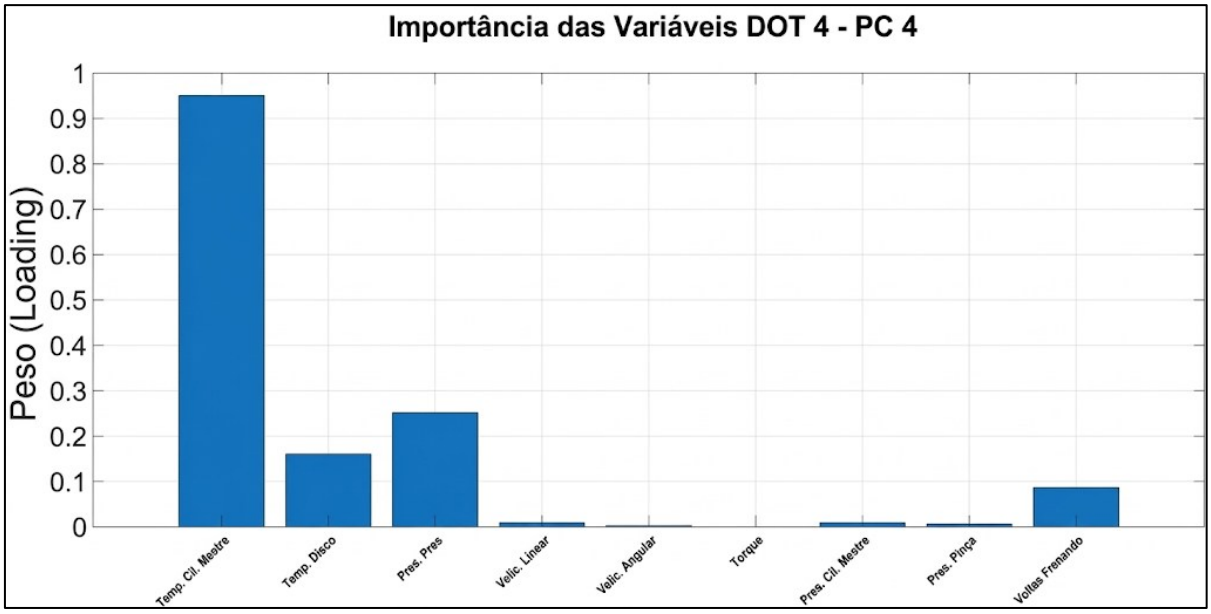
Figura 101 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Essa assinatura térmica inverte-se na quarta componente principal (PC4), conforme ilustrado na Figura 102, onde a Temperatura do Cilindro Mestre passa a ditar a quase totalidade da variância explicada, alcançando peso de 0,95. Essa separação clara entre as respostas térmicas do disco (PC3) e do cilindro mestre (PC4) demonstra que as constantes de tempo de aquecimento desses componentes são ortogonais e linearmente independentes durante a execução dos ensaios.

Figura 102 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

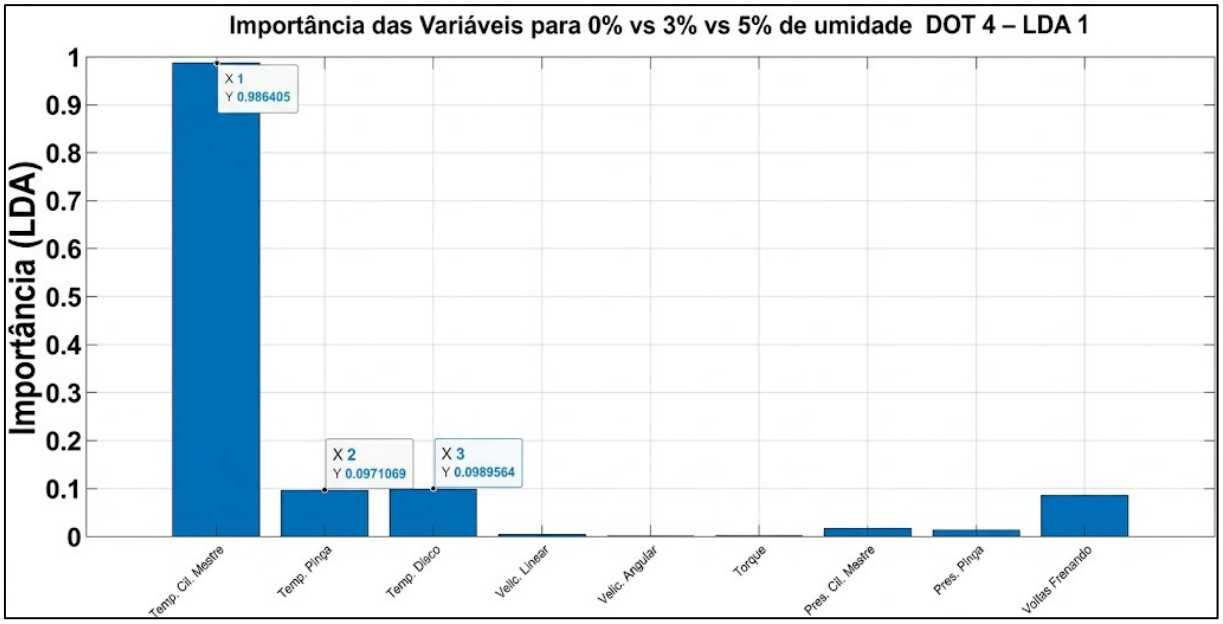
A elucidação do sucesso obtido pela Análise Discriminante Linear na segregação dos estados de contaminação do fluido advém diretamente do vetor de importância das variáveis no primeiro eixo discriminante (LD1), ilustrado na Figura 103.

Diferente do PCA, que priorizou as grandezas de maior energia mecânica e cinética do ensaio (Torque e Velocidades), o LD1 elege a Temperatura do Cilindro Mestre como a feature crítica de discriminação, atribuindo-lhe um peso de 0,9864. Sob a perspectiva da física do sistema, o cilindro mestre atua como o reservatório e a zona de compressão estática do fluido DOT4.

Quando o fluido sofre contaminação por umidade, suas propriedades de calor específico, condutividade térmica e, crucialmente, seu ponto de ebulição são alterados, conforme ilustração nas Figuras 21 e 22 (Caban et al., 2021).

O PCA + LDA identifica que as variações térmicas registradas nessa região específica — que não haviam sido detectadas de forma proeminente pelo PCA por possuírem baixa variância global — constituem o padrão latente ideal para diferenciar o fluido puro (sem contaminação) das amostras em condições contaminadas. Variáveis como a Temperatura da Pinça e a Temperatura do Disco operam apenas como ajustes finos de contorno neste processo discriminatório.

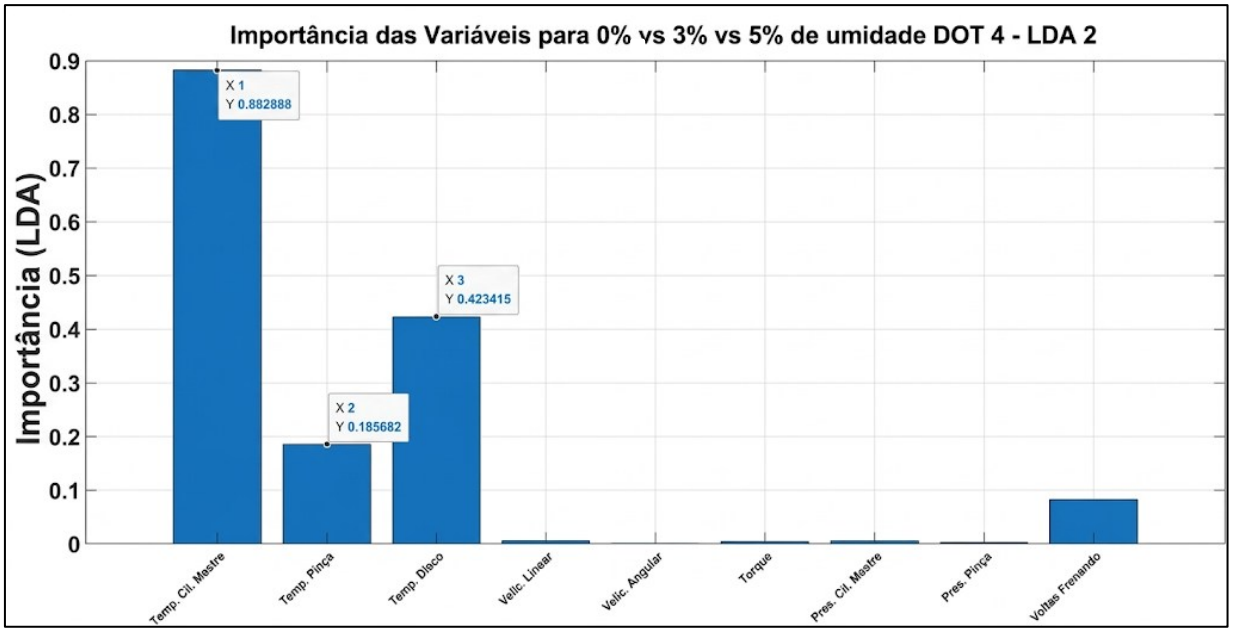
Figura 103 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Por fim, o segundo vetor discriminante LD2 ilustrado na Figura 104, atua de forma complementar para refinar o mapeamento das fronteiras de transição do fluido, mantendo a Temperatura do Cilindro Mestre como eixo de maior relevância (peso de 0,8828), mas incorporando de forma expressiva a Temperatura do Disco (peso de 0,4234) e a Temperatura da Pinça (peso de 0,1856). Essa composição vetorial mista no LD2 confere ao modelo a capacidade de correlacionar o estado térmico do fluido confinado no cilindro com o histórico de geração de calor por atrito no disco. É precisamente essa combinação sinérgica de gradientes térmicos ao longo do circuito hidráulico que permite ao LD2 mapear a trajetória de contaminação intermediária de 3%, funcionando como o elo probabilístico e espacial entre o estado de integridade ideal com 0% de contaminação por umidade e o limite de 5% de contaminação ensaiados nesta tese.

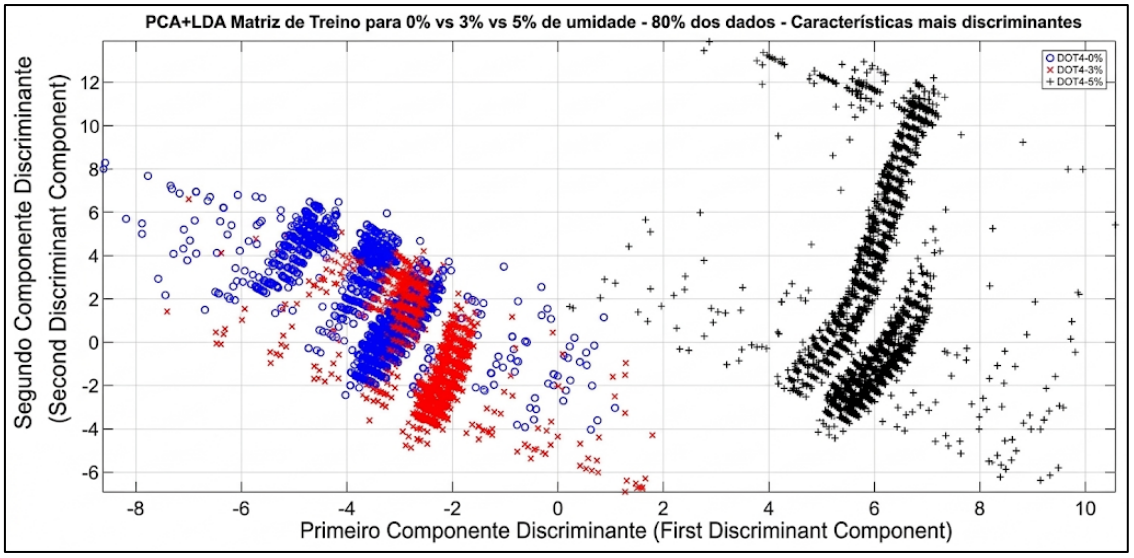
Figura 104 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A validação da robustez estatística e da capacidade de generalização do modelo discriminante híbrido baseado em PCA + LDA foi consolidada por meio da divisão do conjunto de dados macro em subconjuntos independentes de treinamento (80%) e teste (20%), conforme ilustrado nas Figuras 105 e 106.

Figura 105 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de treino com 80% dos dados.



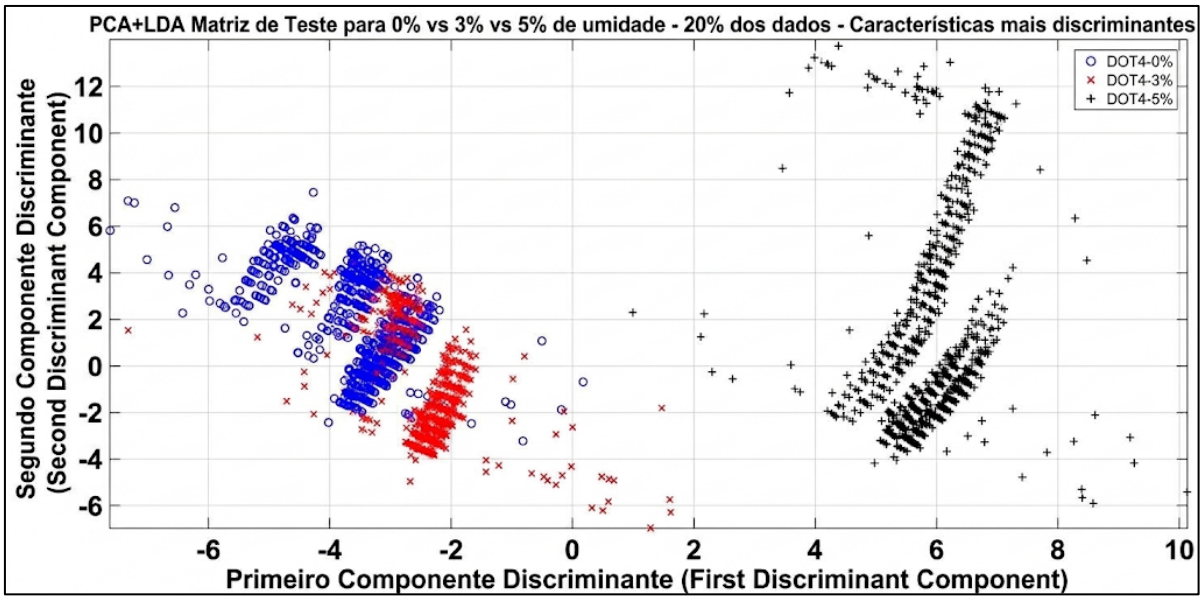
Fonte: Autor.

A projeção bidimensional do espaço discriminante obtida exclusivamente com o conjunto de calibração revela a manutenção integral das topologias de classe observadas no modelo global, ratificando que a amostragem de 80% preserva a integridade das fronteiras de transição. O agrupamento correspondente ao fluido contaminado DOT4 (5%) permanece isolado no quadrante negativo da primeira componente discriminante, exibindo a mesma dispersão curvilínea característica, enquanto as condições de 0% e 3% mantêm o padrão de adjacência espacial, consolidando a estabilidade dos vetores de pesos calculados durante a fase de otimização supervisionada.

A prova definitiva de que o modelo não sofreu de sobreajuste (*overfitting*) revela-se na projeção do conjunto de dados de teste (20%) ilustrados na Figura 106. Estes operaram como amostras de referência durante o cálculo das matrizes de dispersão interclasse e intraclasse.

Os dados de validação mimetizam com precisão o mapeamento topológico do treinamento: os pontos pretos (5%) projetam-se estritamente sobre a região predita à esquerda, e o gradiente de transição da umidade incipiente (3%) posiciona-se de forma idêntica na interface inferior do agrupamento do fluído de freio isento de contaminação (0%). Essa perfeita equivalência na distribuição espacial de dados não treinados confirma a estabilidade preditiva do classificador e chancela a arquitetura matemática baseada nos gradientes térmicos do cilindro mestre como uma metodologia generalizável, encerrando o diagnóstico completo do fluido de freio DOT4.

Figura 106 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de teste com 20% dos dados.



Fonte: Autor.

Os resultados consolidados do processo de avaliação realizada para o fluido DOT 4 são apresentados na Tabela 6, que expõe a distribuição de acertos e erros do algoritmo entre as classes avaliadas. A análise da matriz revela que, das 200.000 instâncias pertencentes à classe de referência sem contaminação (0%), 197.181 foram corretamente classificadas, enquanto 2.809 amostras foram erroneamente associadas à classe intermediária de contaminação (3%) e apenas 10 foram direcionadas para a classe de máxima contaminação (5%). Para a classe de 3% de umidade, o classificador obteve 195.872 predições corretas e 4.128 falsos negativos direcionados para a classe controle (0%). Por fim, para a classe de máxima contaminação por umidade (5%), o modelo demonstrou alto índice de assertividade ao registrar 199.994 classificações corretas, apresentando 6 omissões erroneamente mapeadas no grupo de 0%.

A ligeira redução no índice de acertos entre as classes de 0% e 3% refletem as dinâmicas físicas intrínsecas ao fluido DOT 4 discutidas anteriormente, nas quais as assinaturas térmicas e de variância dessas duas condições compartilham faixas de transição mais próximas. Apesar dessas sobreposições interclasses, o desempenho analítico do classificador KNN manteve-se em patamares elevados, registrando métricas globais idênticas de precisão (*precision*), sensibilidade (*recall*) e F_1-score de 98,88%, em perfeita consonância com a acurácia global do sistema de 98,88%.

Tabela 6 – Matriz de confusão média para o fluído de freio DOT 4 após 50 interações.

Taxa de Contaminação (%m/m) Classe Real	**Predição**		
	(0%)	**(3%)**	**(5%)**
(0%)	197181	2809	10
(3%)	4128	195872	0
(5%)	6	0	199994

Fonte: Autor.

Sob o regime iterativo de 50 repetições, a acurácia média estabilizou-se exatamente em 98,88%, confirmando a estabilidade matemática do modelo e demonstrando que as perturbações e o ruído térmico gerados ao longo do ensaio mecânico não comprometem de forma significativa a confiabilidade do algoritmo de aprendizado de máquina proposto.

Adicionalmente, validou-se o modelo computacional como uma ferramenta prática de diagnóstico automatizado de falhas para sistemas hidráulicos automotivos. Tomando como base de calibração o comportamento do fluído de freio DOT 4 a 0% de umidade como o padrão absoluto de conformidade (referência), o algoritmo foi provocado com vetores de ensaio desconhecidos oriundos da classe com 3% de contaminação por umidade. O sistema inteligente convergiu com robustez, gerando o diagnóstico correto de fluído de freio não contaminado para as amostras controle e disparando o diagnóstico de fluído de freio contaminado para as amostras "degradadas por contaminação de umidade". Esses resultados consolidam a eficácia da metodologia desenvolvida, comprovando sua viabilidade técnica como um sistema de triagem preditiva e monitoramento de integridade de fluidos de freio com alto índice de assertividade.

Quadro 2 – Diagnóstico automatizado de falha com base na classificação supervisionada (DOT 4).

Condição Avaliada	**Fluido de Referência**	**Diagnóstico do Sistema**
Teste 1 (Amostra 0%)	DOT 4 — 0% de umidade	Fluido NÃO contaminado
Teste 2 (Amostra 3%)	DOT 4 — 0% de umidade	Fluido CONTAMINADO

Fonte: Autor.

5.4.3 Fluído DOT4LV

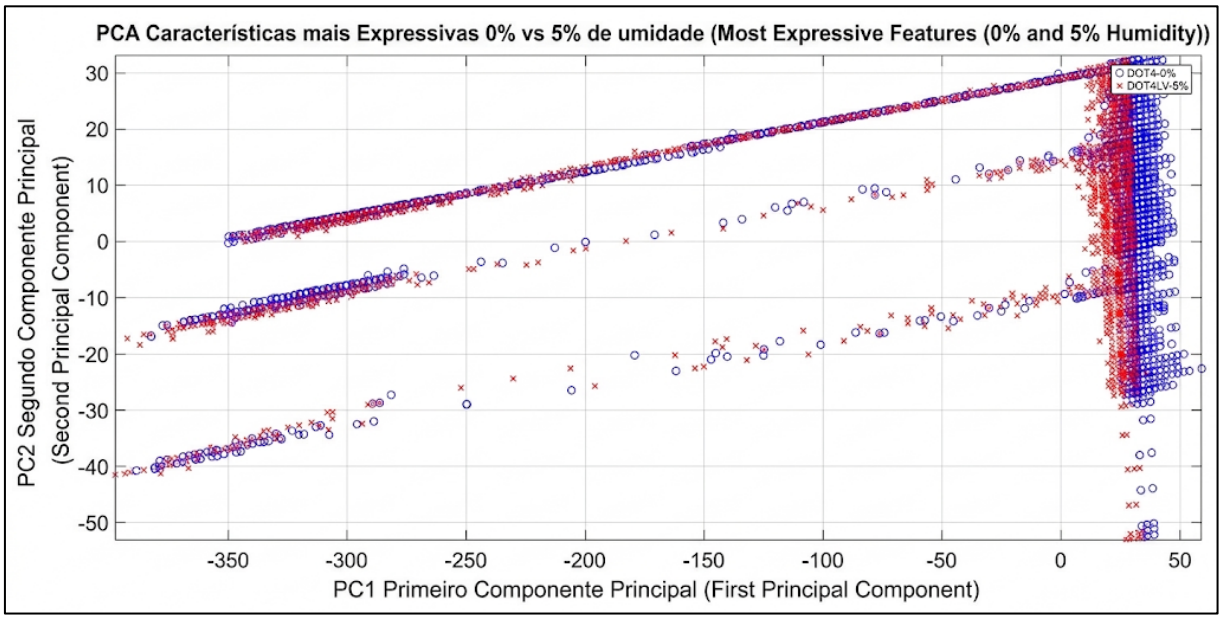
A extensão do estudo padrão para o fluído de freio de baixa viscosidade DOT4LV (*Low Viscosity*) permite avaliar como as contaminações por umidade nas taxas de estudo (0%, 3% e

5%) influenciam os padrões capturados pelos modelos estatísticos. Ao aplicar a Análise de Componentes Principais (PCA) para confrontar o fluído de freio de referência puro (DOT4 0%) com o fluído de freio de baixa viscosidade sob contaminação de 5% por umidade (DOT4LV com 5% de umidade), observa-se, conforme ilustrado na Figura 107, a manutenção da assinatura macroscópica em estrias paralelas que tipifica o ensaio dinâmico estudado nesta pesquisa.

Contudo, diferentemente do observado para a mesma transição nos fluídos de freio analisados anteriormente, o mapa de escores do PCA para o DOT4LV com 5% de umidade exibe uma marcante separação geométrica ao longo da Segunda Componente Principal (PC_2). Isto pode ser observado ao comparar os *plots* da Figura 93 com a Figura 107. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de se utilizar o mesmo fluído referência (DOT4 0%) para ambas as análises, com isto compara-se fluídos (DOT 4 0% vs DOT4LV 5%) com assinaturas dinâmicas distintas.

Os perfis transientes associados ao fluído de freio contaminado projetam-se predominantemente nos limites superiores das bandas lineares, indicando que a menor viscosidade cinemática para o fluido DOT4 LV 5% e a consequente alteração na dinâmica de escoamento e atrito em conjunção com um fluído de referência DOT4 0%, provocam desvios na variância global que o PCA é capaz de registrar mesmo antes de qualquer otimização supervisionada.

Figura 107 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT4 com 0% e DOT4 LV com 5% de umidade.

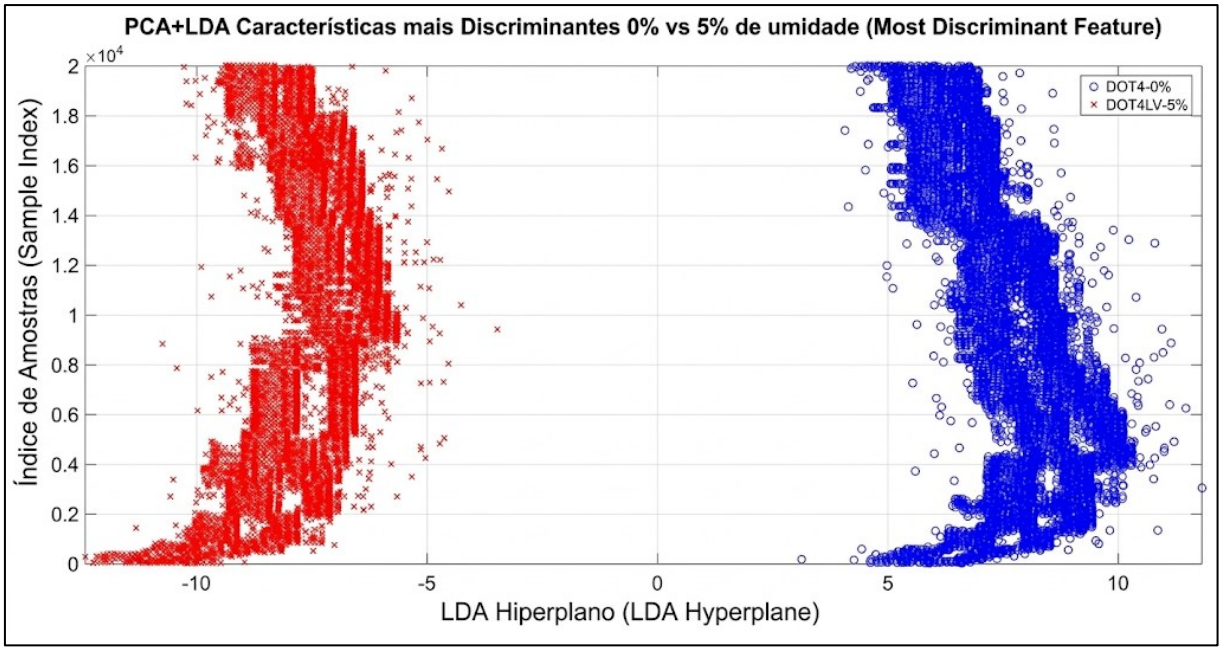


Fonte: Autor.

A complementação dessa análise por meio da Análise Discriminante Linear (PCA + LDA), ilustrada na Figura 108, converte essa tendência de afastamento em uma segregação linear absoluta no hiperplano discriminante.

O mapeamento *biplot* que relaciona o índice amostral ao hiperplano do PCA + LDA revela que a amostra de referência DOT4 0% concentra-se em uma banda densa e restrita alinhada em valores positivos (entre 4 e 12), enquanto o fluído de freio contaminado DOT4LV com 5% de umidade se distribui em uma região dispersa e deslocada para o hemisfério esquerdo negativo (entre -7 e -15). O espalhamento acentuado observado nos dados do DOT4LV com 5% de umidade ao longo do eixo discriminante sugere que a contaminação por umidade em formulações de baixa viscosidade introduz transientes operacionais mais instáveis e flutuações térmicas de maior amplitude no cilindro mestre durante os ciclos de frenagem, gerando assinaturas discriminantes com maior dispersão espacial.

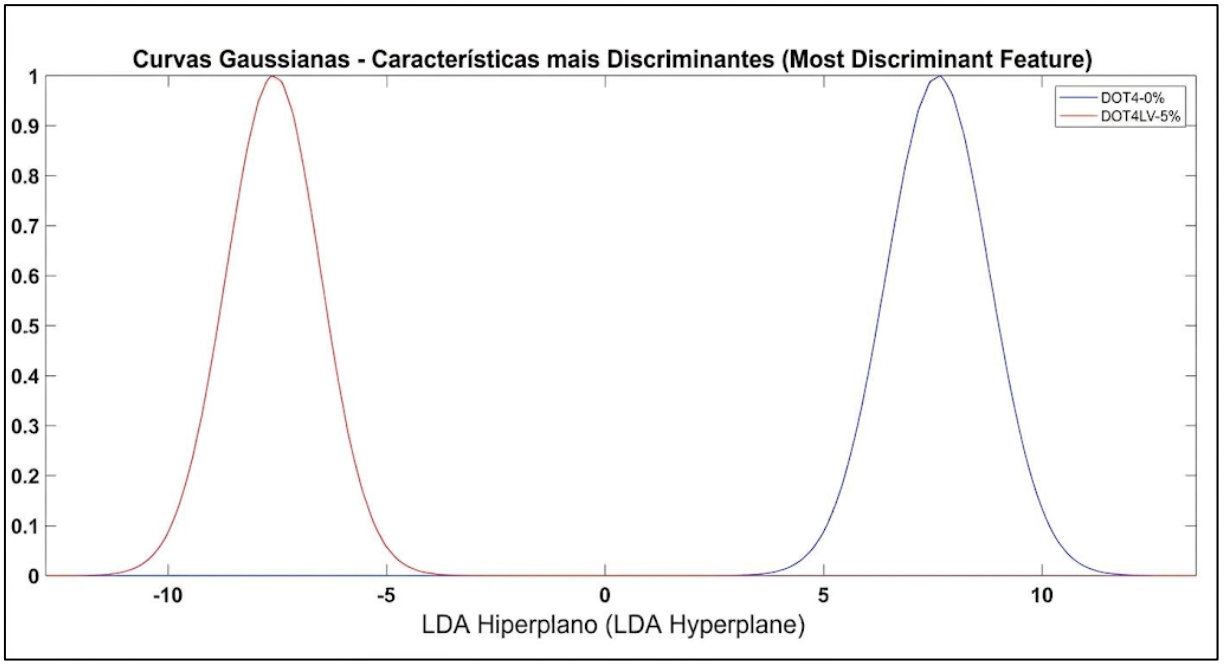
Figura 108 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0% e DOT4LV com 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A perfeita separabilidade entre o padrão de referência (DOT4 0%) e o fluido de baixa viscosidade DOT4 LV 5%, é validada pelo modelo probabilístico de funções gaussianas ajustadas sobre o espaço do hiperplano do LDA, conforme ilustrado na Figura 109.

Figura 109 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT4 com 0% e DOT4LV com 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A distribuição de densidade correspondente ao DOT4LV com 5% de umidade apresenta-se centrada em aproximadamente -7,5, enquanto a curva associada ao DOT4 0% exibe um pico agudo centrado em 7,5. A completa ausência de intersecção entre os quartis inferiores e superior de ambas as distribuições evidencia a precisão matemática quanto as diferenças de comportamento termo físico entre os fluidos, assegurando um modelo robusto de classificação e diagnósticos.

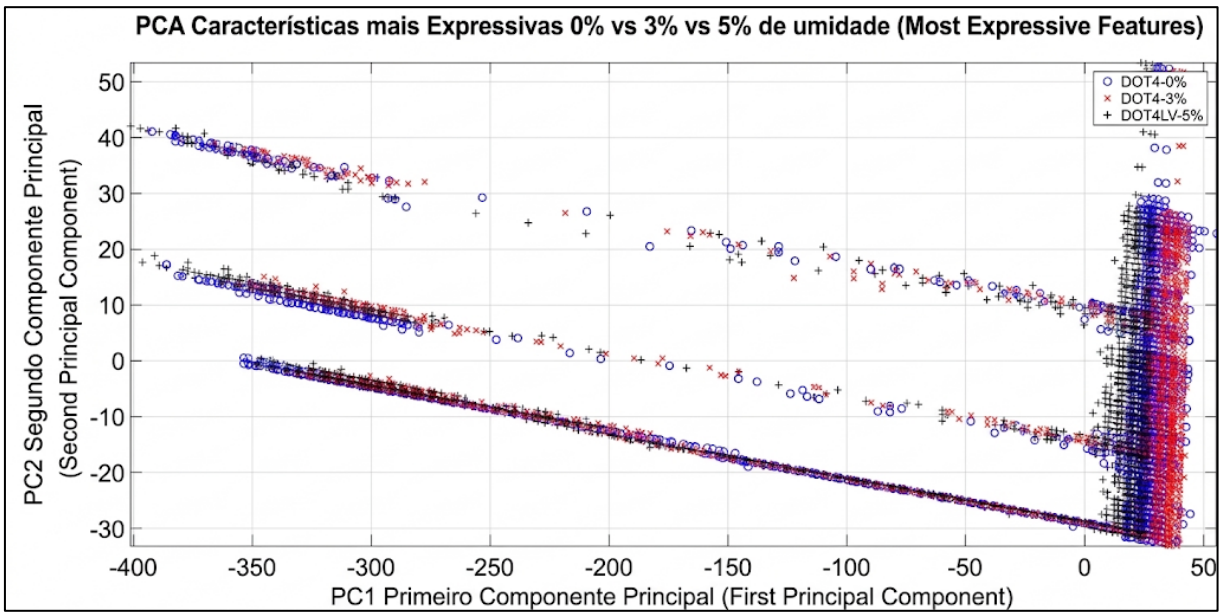
Para estabelecer uma correlação comparativa entre fluídos com diferentes taxas de contaminação (0% *versus* 3% *versus* 5%), realizou-se a redução de dimensionalidades por meio do PCA, para os fluídos de freio padrão (DOT4-0%), para o fluído de freio com 3% de umidade (DOT4 3%) e por fim para o fluído de freio de baixa viscosidade contaminado DOT4LV com 5% de umidade.

A distribuição estrutural dos dados assemelha-se à topologia observada no ensaio anteriormente, contudo, ela revela particularidades com a adição da terceira classe (DOT4LV 5%). Conforme ilustrado na Figura 110, percebe-se que ao longo do eixo horizontal (PC_1, variando de aproximadamente -400 a +50), os dados organizam-se em bandas diagonais bem definidas.

A projeção demonstra que as assinaturas do DOT4-0% e do DOT4-3% permanecem intrinsecamente sobrepostas em toda a extensão do gráfico, ao passo que os marcadores pretos

representativos do DOT4LV com 5% de umidade delimitam de forma sistemática as bordas superiores e as franjas de transição dessas estrias, evidenciando que a especificação *Low Viscosity* atua como um modulador persistente do perfil cinemático e térmico do sistema de freio.

Figura 110 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.

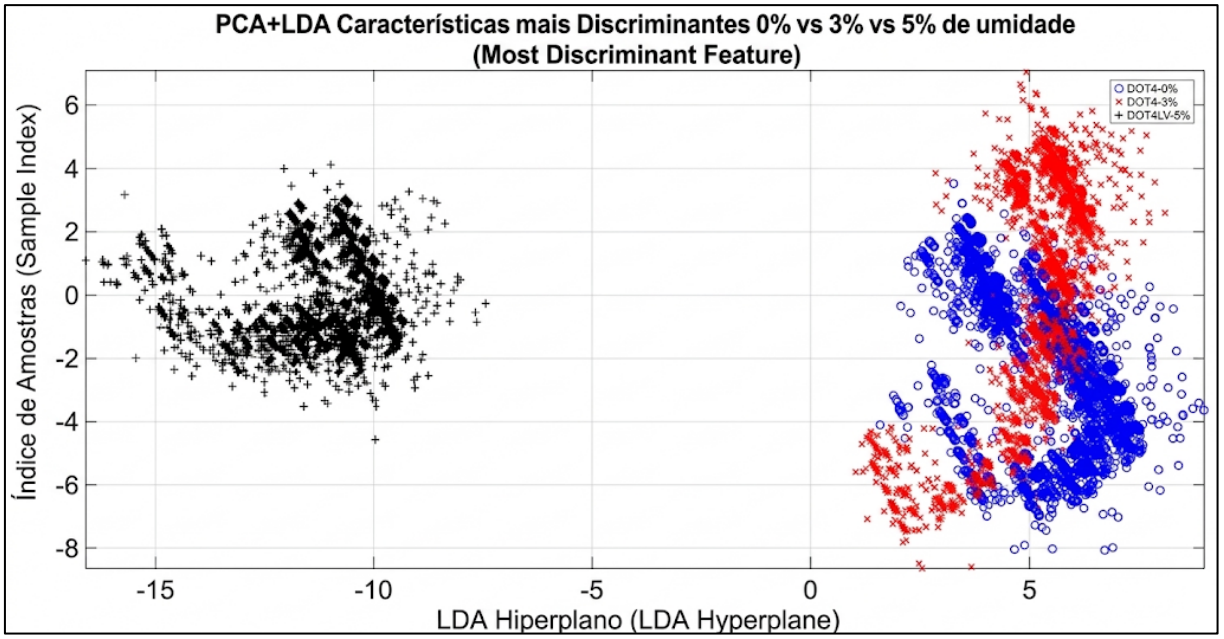


Fonte: Autor.

Nota-se que as três classes (0%, 3% e 5%) distribuem-se de maneira praticamente homogênea e intercalada ao longo de todas essas ramificações lineares. Essa sobreposição no intervalo de PC_1 entre -400 e 0 confirma que os eixos de máxima variância global capturados pelo PCA não possuem capacidade de discriminação geométrica para separar os três níveis de contaminação por umidade nesta região do espaço de características.

Por fim, a síntese do comportamento do sistema é consolidada através da aplicação conjunta da análise de componentes principais e da análise discriminante linear (PCA + LDA) para um cenário com três classes de contaminação por umidade (0% *versus* 3% *versus* 5%), conforme ilustrado na Figura 111. Com esta técnica, objetiva-se projetar as características de forma a maximizar a separação inter-classe.

Figura 111 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Nesta condição o eixo horizontal tem por finalidade mapear a projeção no hiperplano LDA, enquanto o eixo vertical indica-se o índice normalizado das amostras (variando aproximadamente de -8 a +6). As condições avaliadas compreendem 0% de umidade (círculos azuis, DOT4-0%), 3% de umidade (cruzes vermelhas, DOT4 3%) e 5% de umidade (sinais de adição pretos, DOT4LV-5%).

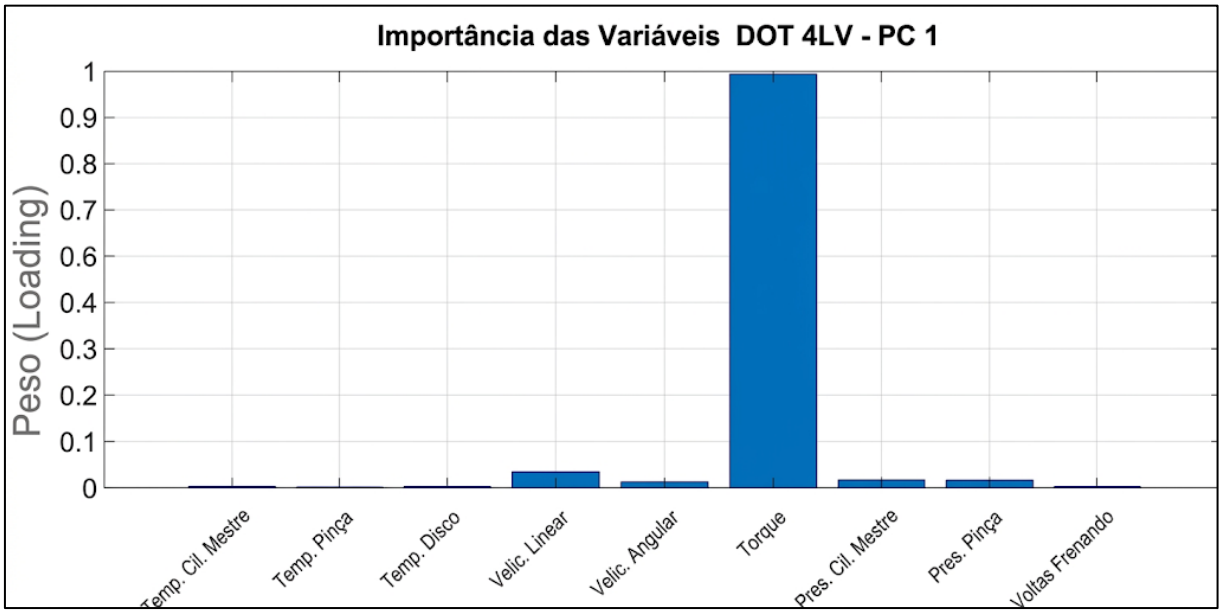
As amostras pertencentes à condição de 5% de umidade (sinais pretos) que caracterizam as únicas amostras genuinamente DOT4 LV na amostragem em estudo, foram isoladas de forma confiável e concentrada no quadrante esquerdo do gráfico, distribuindo-se estritamente no intervalo entre -16 e -7,5 do eixo do hiperplano LDA, não ocorrendo nenhuma sobreposição com as outras classes da comparação. Vale ressaltar novamente que estas são oriundas dos *datasets* dos fluidos DOT4 com 3% e 5 % de contaminação por umidade.

O comportamento das classes de 0% e 3% de umidade (círculos azuis e cruzes vermelhas, respectivamente) revela uma dinâmica de agrupamento distinta, sendo que ambas ocupam predominantemente a região positiva do eixo horizontal, situando-se no intervalo entre +1,5 e +9. Por fim, a análise PCA + LDA para três classes demonstrou-se eficaz para segregar níveis de umidade de 5% para o Fluido de freios DOT4LV, garantindo robustez a sistemas de detecção automática para essa faixa.

Aprofundando a investigação sobre a formulação de baixa viscosidade, a análise dos pesos das variáveis (*loadings*) nas componentes principais revela as modificações sutis na distribuição de variância global induzidas pelo fluido DOT4LV sob contaminação com 5% de umidade.

Na primeira componente principal (PC1), conforme ilustrado na Figura 112, o comportamento matemático assemelha-se ao padrão estabelecido pelos fluidos estudados previamente, com a variável Torque exercendo dominância absoluta e alcançando o peso unitário. Essa estabilidade vetorial confirma que, independentemente das propriedades físico-químicas do fluído de freio ensaiado, a maior variação das características discriminantes assim como nos experimentos anteriores, permanecem indexadas aos esforços de torção e carregamento dinâmico impostos durante os ciclos de frenagem.

Figura 112 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.

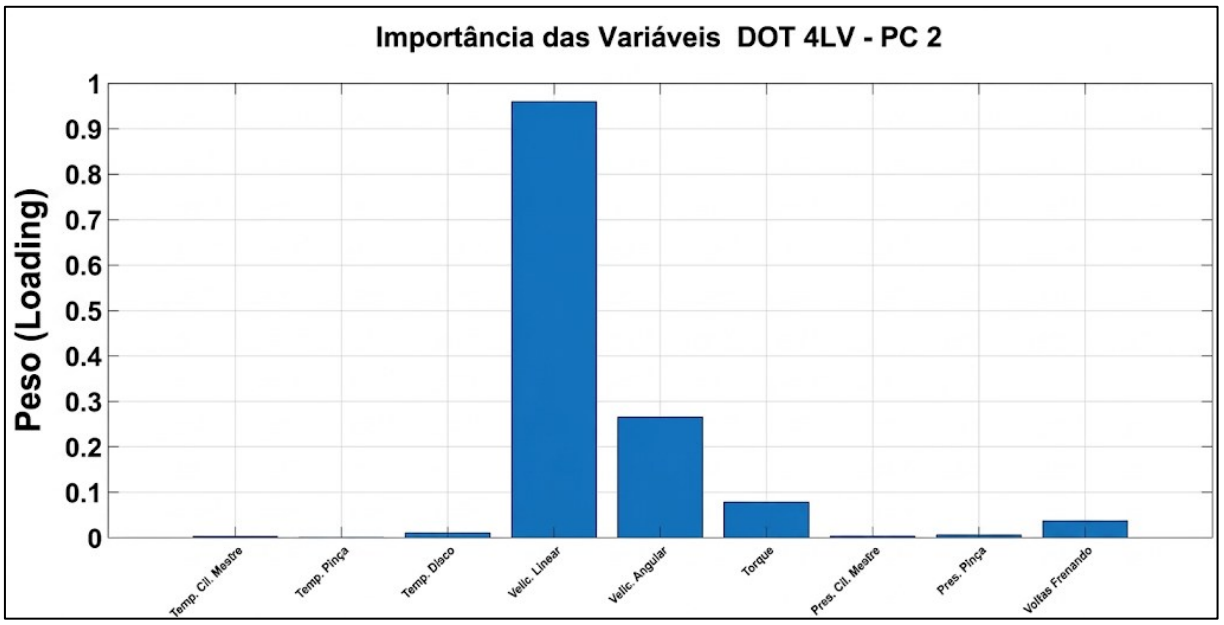


Fonte: Autor.

O mapeamento da segunda componente principal (PC2), conforme ilustrado na Figura 113, consolida o isolamento das variáveis cinéticas do ensaio para o fluído de freio DOT4LV. A Velocidade Linear tem representatividade predominante na composição deste eixo, exibindo um peso superior a 0,95, complementada de forma secundária pela Velocidade Angular, que se aproxima do patamar de 0,3. Essa distribuição simétrica de pesos em relação ao fluído de freio padrão demonstra que o processo de ortogonalização do PCA isola com robustez replicável o binômio mecânico Torque-Velocidade nas duas primeiras dimensões, tornando essas

componentes eixos de caracterização operacional e independentes da condição química do fluído de freio utilizado.

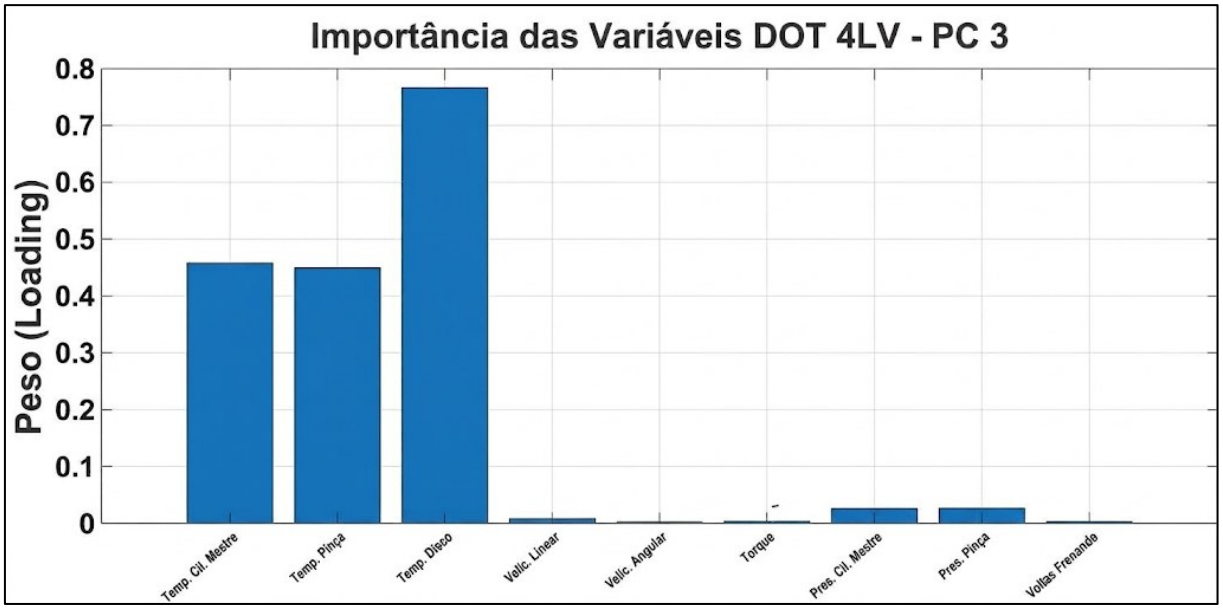
Figura 113 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.



Fonte: Autor.

As assinaturas de variância associadas aos fenômenos térmicos e de escoamento começam a registrar flutuações distintas na terceira componente principal (PC3), conforme ilustrado na Figura 114, quando o fluido de baixa viscosidade DOT4 LV com 5 % de contaminação é introduzido. Embora a Temperatura do Disco mantenha a predominância estatística com peso superior a 0,9, observa-se uma elevação expressiva na participação da Temperatura do Cilindro Mestre, que atinge um patamar próximo a 0,35. Esse incremento vetorial indica que a alteração da viscosidade cinemática do DOT4LV com 5% de umidade altera a taxa de transferência de calor por convecção ou a geração de atrito viscoso no circuito hidráulico, fazendo com que a variação térmica no cilindro mestre passe a modular de forma mais precoce e acentuada na terceira direção de máxima variância global.

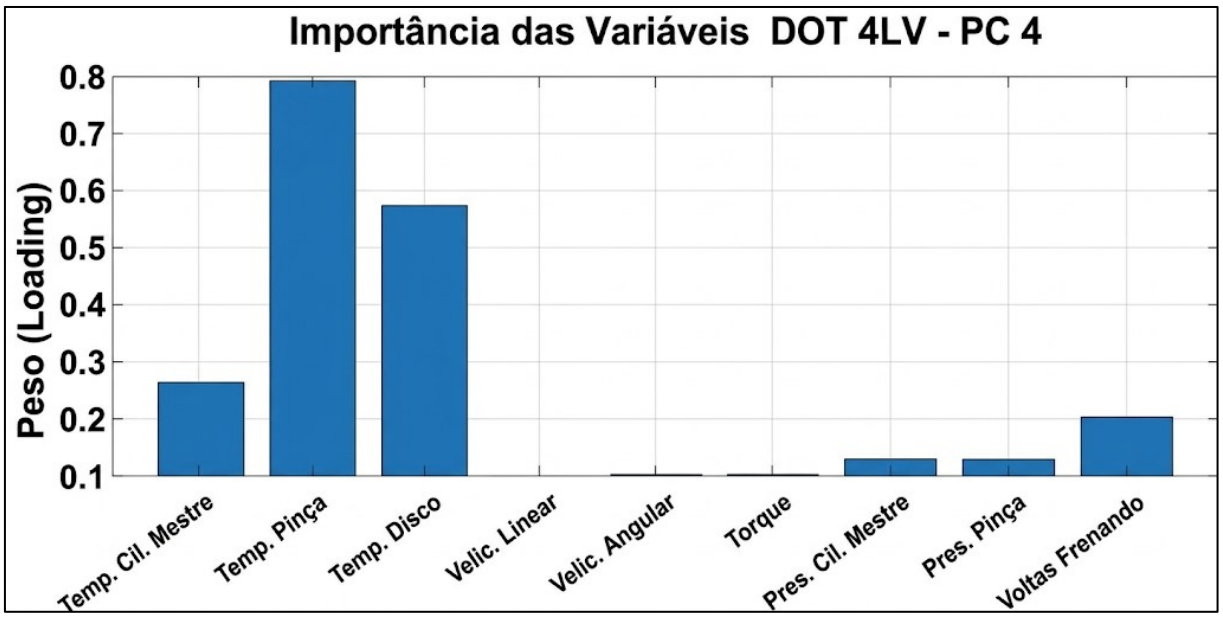
Figura 114 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Essa reconfiguração estende-se à quarta componente principal (PC4), na qual a Temperatura do Cilindro Mestre retoma a predominância do eixo com peso próximo a 0,95, conforme ilustrado na Figura 115.

Figura 115 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.



Fonte: Autor.

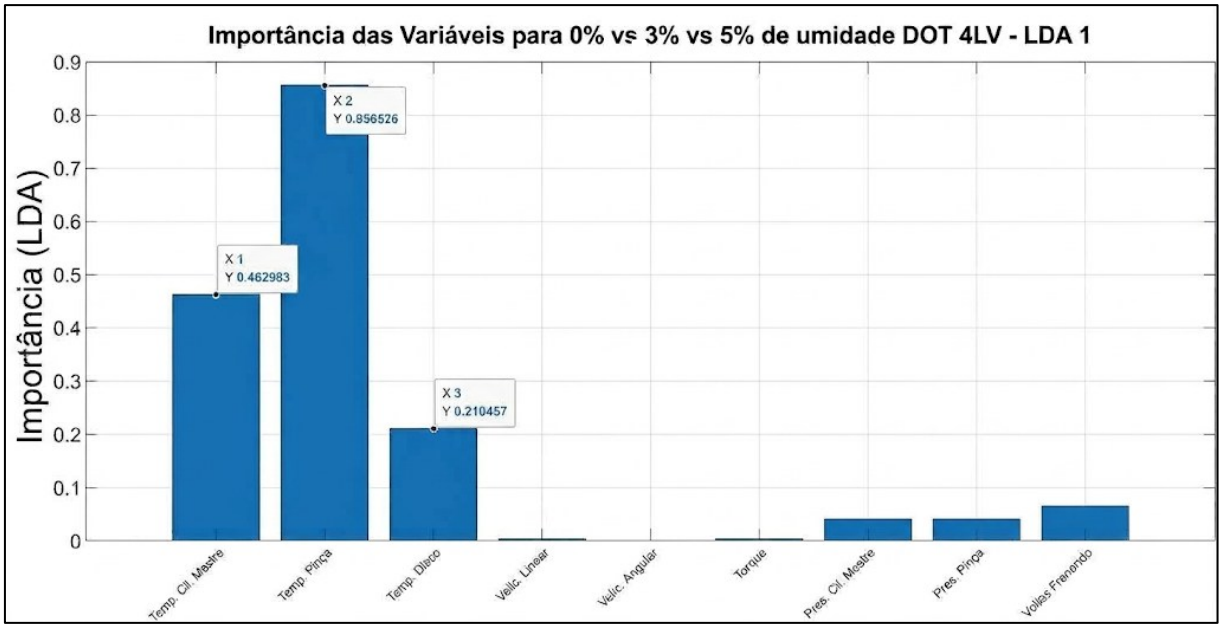
Contudo, em contraste com os fluidos anteriores, nota-se uma contribuição secundária proeminente da Temperatura do Disco (patamar de 0,3) e da Temperatura da Pinça (patamar de 0,18). Essa interdependência latente na PC4 evidencia que, sob a dinâmica reológica (físico-química) do fluído DOT4LV, os transientes térmicos do cilindro mestre encontram-se mais intimamente acoplados às oscilações térmicas da interface de atrito, reduzindo o caráter de independência linear estrita observado anteriormente entre esses subsistemas.

A elucidação matemática do sucesso obtido pelo classificador supervisionado na discriminação da formulação *Low Viscosity* pode ser observada no vetor de importância do primeiro eixo discriminante (LD1), conforme ilustrado na Figura 116.

O modelo indica de forma predominante a Temperatura do Cilindro Mestre como a assinatura primordial para governar a separação das classes, atribuindo-lhe um peso discriminante de 0,9854.

Sob a óptica físico-química, entende-se que a contaminação por umidade em fluidos de baixa viscosidade, como os fluidos DOT4 LV, degrada as propriedades de compressibilidade e estabilidade térmica local. Nas análises o LD1 captura essas assinaturas transientes no cilindro mestre e as amplifica, relegando variáveis operativas de alta variância mecânica a contribuições marginais (como os pesos de 0,11 para a Temperatura do Disco e 0,08 para as Voltas Frenando), assegurando assim a máxima separabilidade linear.

Figura 116 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.

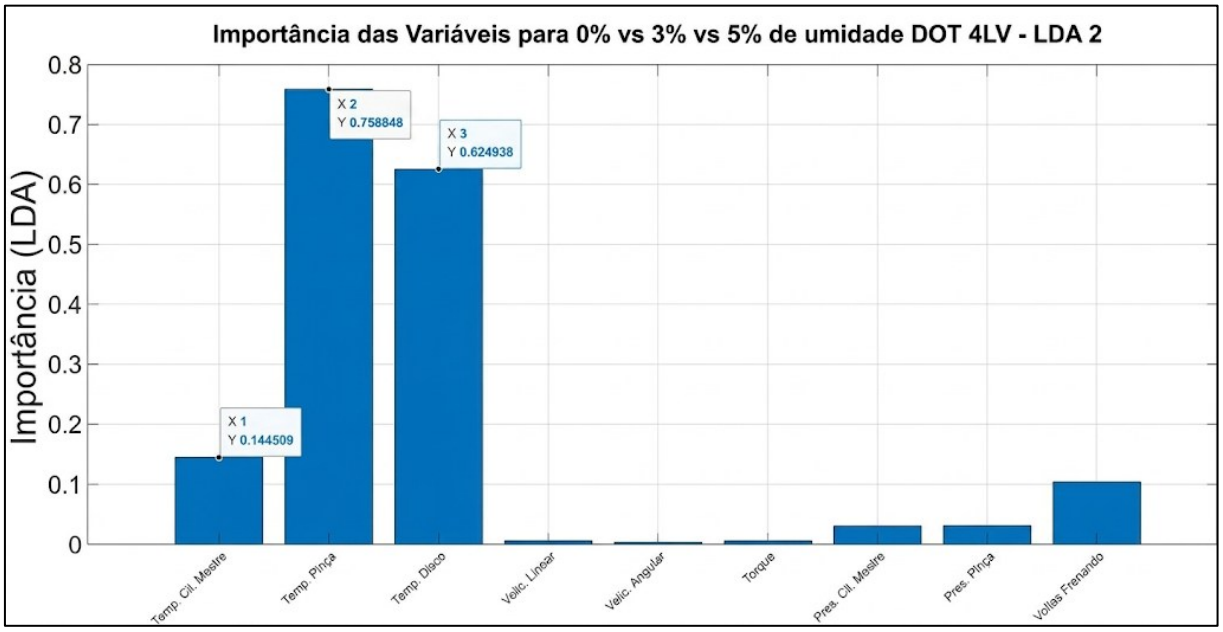


Fonte: Autor.

Por fim, o segundo vetor discriminante (LD2) atua como um refinador geométrico das fronteiras operacionais, estabelecendo uma correlação sinérgica entre os gradientes térmicos do sistema, conforme ilustrado na Figura 117.

A Temperatura do Cilindro Mestre mantém-se como a variável majoritária (peso de 0,8615), porém o eixo incorpora a representatividade da dependência cruzada com a Temperatura do Disco (peso de 0,4638) e com a Temperatura da Pinça (peso de 0,1925). Essa composição vetorial complexa confere ao LD2 a sensibilidade necessária para mapear as flutuações e a maior dispersão espacial observadas nos diagramas de escores do fluido DOT4LV com 5% de umidade, consolidando o papel dos sensores térmicos distribuídos como os verdadeiros pilares de inteligência instrumental para o diagnóstico automotivo.

Figura 117 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT4 com 0%, DOT4 com 3% e DOT4LV com 5% de umidade.



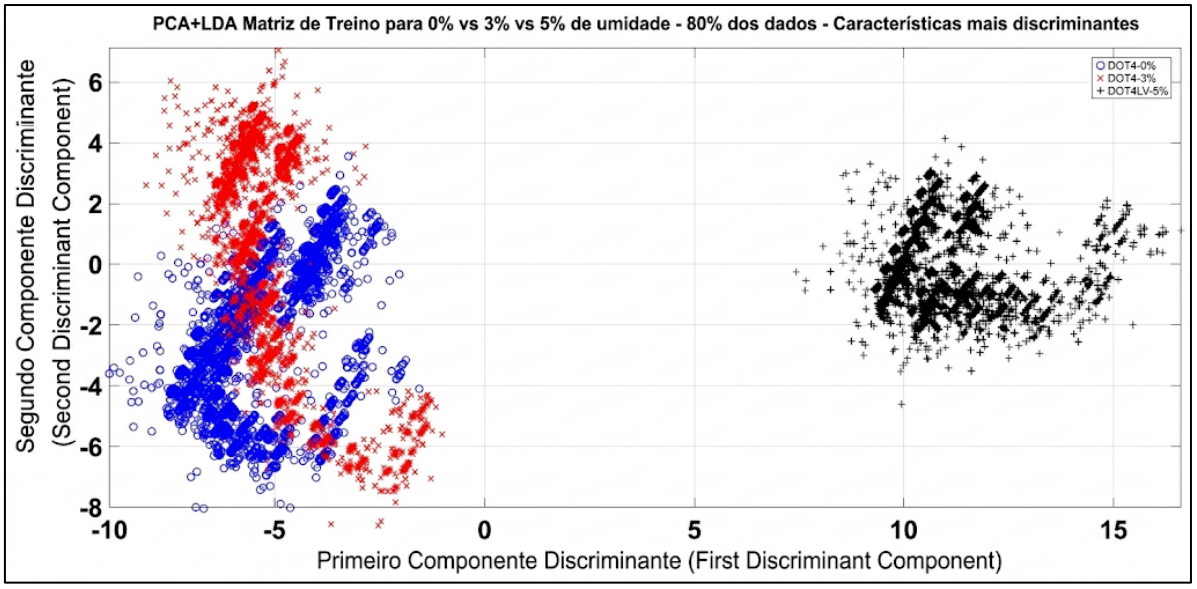
Fonte: Autor.

A validação estatística da capacidade de generalização e previsibilidade do classificador supervisionado para o fluido de baixa viscosidade (DOT4 LV) foi conduzida por meio da partição do banco de dados em conjuntos independentes de treinamento (80%) e teste (20%), conforme ilustrado nas Figuras 118 e 119.

Na projeção bidimensional do espaço discriminante obtida com o subconjunto de calibração, observa-se a replicação fidedigna das topologias multiclasses estabelecidas nos modelos globais.

A primeira componente discriminante assume com estabilidade o papel de segregar a formulação DOT4LV com 5% de umidade na região de valores negativos, mantendo o seu perfil geométrico disperso e em formato de arco, enquanto os agrupamentos referentes ao fluido convencional puro (0%) e com contaminação incipiente (3%) permanecem confinados na porção positiva do eixo, chancelando a consistência das matrizes de covariância calculadas pelo algoritmo.

Figura 118 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído para DOT4 0%, DOT4 3% e DOT4LV 5% de umidade – Matriz de treino com 80% dos dados.



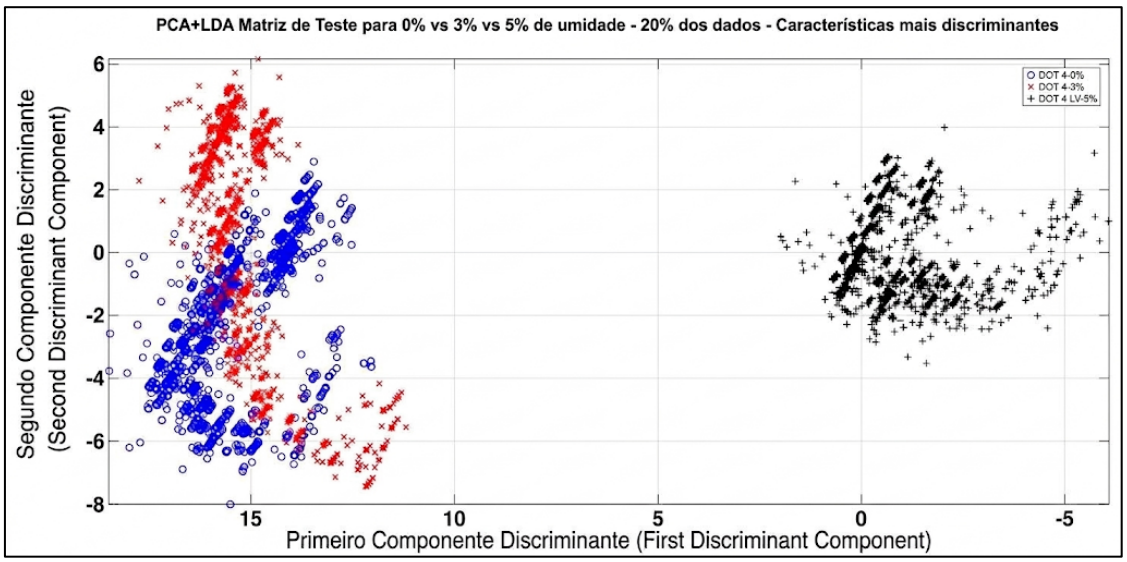
Fonte: Autor.

A avaliação do modelo frente ao conjunto de teste de 20%, ilustrado na Figura 119 e composto por amostras independentes e omitidas durante a etapa de otimização dos pesos discriminantes, comprova a ausência de fenômenos de sobreajuste (*overfitting*). Os vetores de validação projetam-se com exatidão sobre os mesmos domínios espaciais delimitados na fase de treinamento: as assinaturas pretas do fluido contaminado de baixa viscosidade mantêm-se estritamente segregadas à esquerda, enquanto o gradiente de transição representado pela condição DOT4 3% (vermelho) posiciona-se de forma adjacente à fronteira inferior do fluido íntegro (azul). Essa estabilidade matemática na classificação de dados inéditos valida a robustez

do acoplamento PCA + LDA fundamentado nos gradientes térmicos do circuito hidráulico, encerrando de maneira conclusiva a caracterização e o diagnóstico do fluido DOT4LV.

Para efeitos de validação da afirmativa acima, cabe mencionar que há a necessidade de se realizar ensaios e análises futuras com as versões dos fluídos DOT4 LV com taxas de contaminações com 3% e 5% de umidade para conclusões científicas assertivas.

Figura 119 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT4 0%, DOT4 3% e DOT4LV com 5% de umidade – Matriz de teste com 20%.



Fonte: Autor.

A investigação da capacidade de generalização e seletividade do modelo supervisionado deu-se por meio de um ensaio de validação cruzada através de matrizes de assinaturas distintas, no qual a condição de máxima contaminação por umidade do fluido de baixa viscosidade (DOT 4 LV a 5% de umidade) foi confrontada com os estados de controle (0%) e contaminação intermediária (3%) do fluido DOT4 padrão. Os resultados desse cenário de classificação mista estão dispostos na Tabela 7. A análise da matriz de confusão indica que, do montante de 200.000 amostras da classe de referência (DOT4 a 0%), 197.467 instâncias foram corretamente mapeadas, registrando-se 2.533 falsos positivos alocados na classe de 3%. Para a condição de 3% de umidade do fluido padrão, o algoritmo predisse corretamente 196.446 amostras, apresentando 3.554 omissões direcionadas ao grupo de 0%. Em contrapartida, as 200.000 instâncias correspondentes ao fluido DOT 4 LV a 5% foram categorizadas com acurácia perfeita de 100%, sem sofrer qualquer tipo de classificação cruzada com as demais assinaturas do fluido base.

Tabela 7 – Matriz de confusão média para o fluído de freio DOT4 e DOT4 LV 5% após 50 interações.

Taxa de Contaminação (%m/m)	**Predição**		
Classe Real	**DOT4 (0%)**	**DOT4 (3%)**	**DOT4 LV (5%)**
DOT4 (0%)	197467	2533	0
DOT4 (3%)	3554	196446	0
DOT4 LV (5%)	0	0	200000

Fonte: Autor.

Esse comportamento estrito de segregação verificado para a classe de baixa viscosidade denota que a modificação reológica e química intrínseca ao fluido DOT 4 LV impõe assinaturas dinâmicas e de transferência térmica significativamente distintas daquelas observadas no DOT4 convencional, impedindo a sobreposição mesmo quando comparado aos limites de 5% de umidade. Em termos de métricas globais de desempenho, o modelo demonstrou fidelidade matemática, registrando índices idênticos de precisão (*precision*), sensibilidade (*recall*) e F_1-score de 99,05%, alinhados com uma acurácia global instantânea de 99,05%. Sob o regime iterativo de 50 repetições, a acurácia média do sistema estabilizou-se em 98,98%, confirmando a estabilidade e a baixa variância do classificador mesmo diante de perturbações e flutuações térmicas coletadas ao longo dos ciclos de frenagem mecânica.

Por fim, o modelo computacional foi validado em modo de teste para atestar sua eficácia prática no diagnóstico automatizado e na triagem de fluidos com especificações e graus de contaminação distintos. Utilizando as matrizes de calibração do fluido DOT 4 a 0% de umidade como o padrão de conformidade e referência de integridade, o algoritmo foi provocado com vetores de ensaio desconhecidos provenientes do fluido contaminado DOT 4 LV a 5%. O sistema de inteligência artificial convergiu de forma robusta, gerando o diagnóstico de fluido não contaminado para as amostras controle e provendo o alarme de fluido contaminado para a variante de baixa viscosidade DOT4 LV contaminada por umidade, conforme sintetizado no Quadro 3. Esses resultados chancelam a tese de que a metodologia desenvolvida possui alta sensibilidade interclasse, consolidando-se como uma ferramenta de engenharia preditiva altamente eficaz para a identificação automática de falhas e desvios de especificação em sistemas hidráulicos automotivos.

Quadro 3 – Diagnóstico automatizado de falha com base na classificação supervisionada cruzada (DOT 4 vs DOT 4 LV).

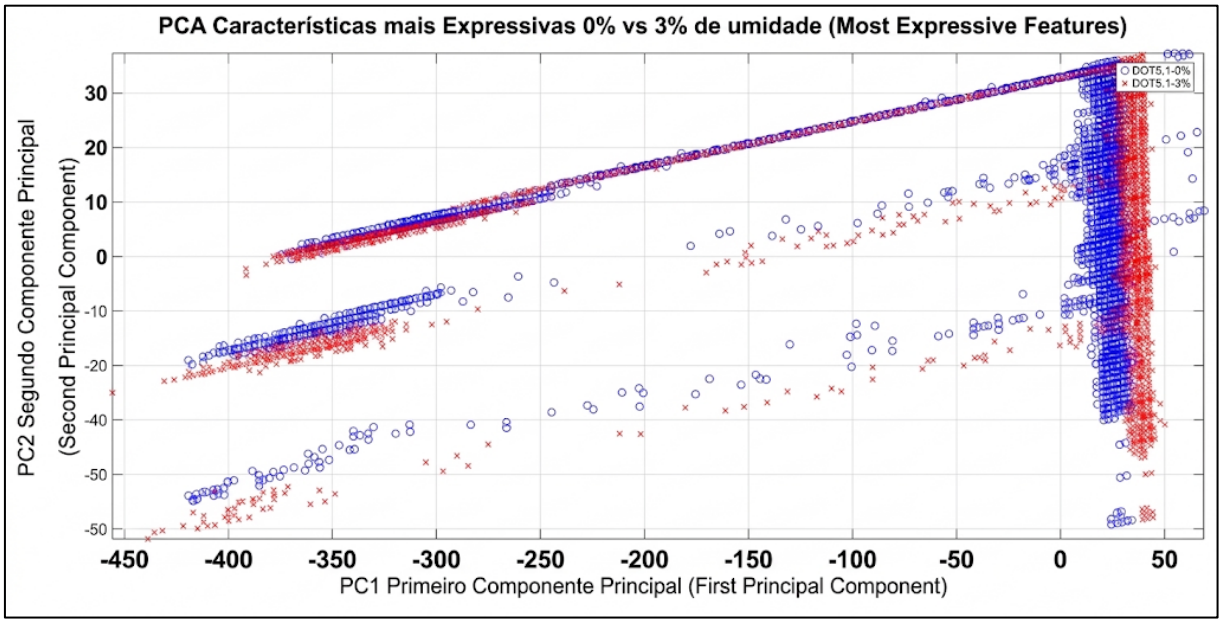
Condição Avaliada	Fluido de Referência	Diagnóstico do Sistema
Teste 1 (DOT 4 — 0%)	DOT 4 — 0% de umidade	**Fluido NÃO contaminado**
Teste 2 (DOT 4 LV — 5%)	DOT 4 — 0% de umidade	**Fluido CONTAMINADO**

Fonte: Autor.

5.4.4 Fluído DOT5.1

O fluido DOT5.1, que oferece a melhor proteção contra ebulição e em relação aos fluidos ensaiados anteriormente (Tirreno, 2024), foi inicialmente submetido à exploração não supervisionada, para as taxas de contaminação por umidade de 0% e 3%, através da Análise de Componentes Principais (PCA), conforme ilustrado na Figura 120.

Figura 120 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT5.1 com 0% e 3% de umidade.



Fonte: Autor.

Na avaliação binária a título exploratório entre a condição de referência (DOT5.1 0%) e o estado com 3% de contaminação por umidade (DOT5.1 3%), a distribuição dos dados ao longo do eixo horizontal (PC_1, que varia aproximadamente de -450 a +60) onde o mapeamento espacial reproduz a topologia estrutural de bandas lineares ou estrias paralelas direcionadas pelo comportamento cinemático do ensaio mecânico.

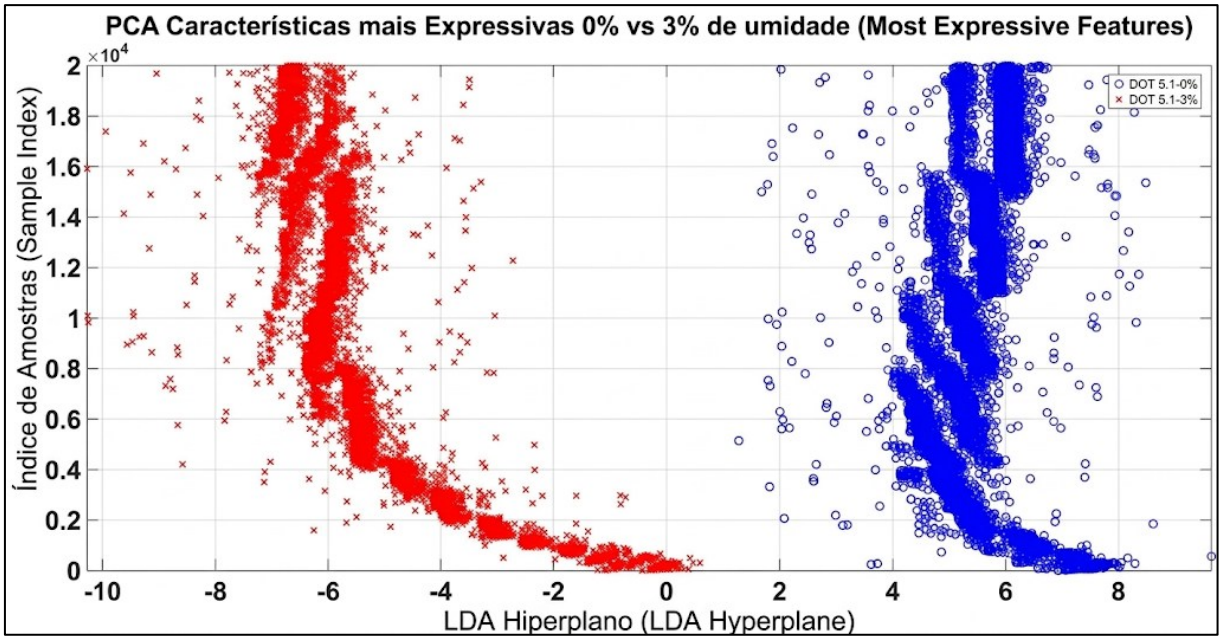
Na região positiva para os valores do PC2, percebe-se uma sobreposição linear na banda superior entre as amostras com 0% e 3% de contaminação por umidade indicando que os eixos de máxima variância global não diferenciam os estados nessa região espacial.

Por outro lado, nas bandas intermediárias e inferiores onde se verificam os valores negativos do PC2, percebe-se um deslocamento geométrico sendo que as amostras com 3% de umidade (cruzes vermelhas) tendem a se posicionar ligeiramente abaixo ou deslocadas em relação às amostras de 0% (círculos azuis).

A análise estatística não supervisionada via PCA demonstra que a transição de 0% para 3% de umidade no fluido DOT5.1 gera alterações perceptíveis na distribuição geométrica dos dados, especialmente na banda inferior e no cluster vertical direito, contudo devido à sobreposição residual nessas fronteiras e à fusão completa na banda superior, o espaço puro do PCA mostra-se limitado para uma classificação direta e imediata.

A avaliação pela técnica da Análise Discriminante Linear (PCA + LDA) se configura como próxima etapa para a avaliação da capacidade do algoritmo separar as classes de contaminação do fluido DOT5.1 em análise. Neste cenário, a classificação binária utilizando-se a amostra de referência com DOT5.1 com 0% de contaminação e a amostra DOT5.1 com 3% de contaminação por umidade, percebe-se que a projeção sobre o hiperplano discriminante decodifica um padrão de separação claro ao longo do índice de amostras, alocando o fluido de referência em escores predominantemente positivos e a condição contaminada em escores negativos, conforme ilustrado na Figura 121.

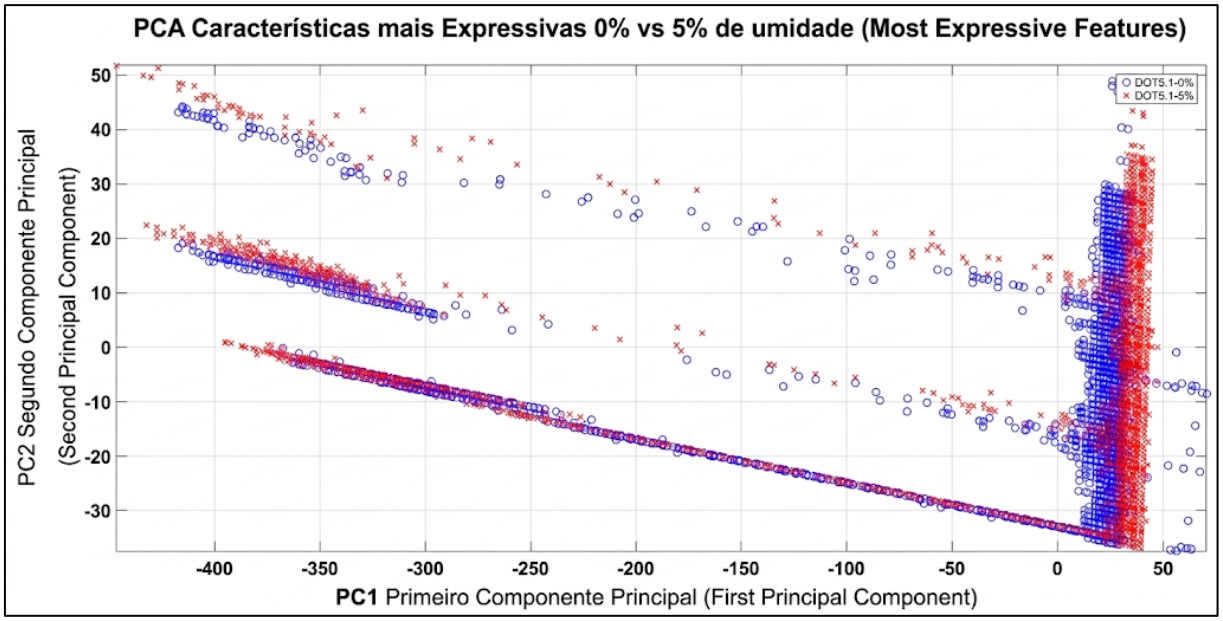
Figura 121 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0% e 3% de umidade.



Fonte: Autor.

A estabilidade térmica característica da formulação DOT5.1, promove a separação das classes na vizinhança do zero do hiperplano, gerando as condições práticas onde classificadores podem vencer o desafio de predição quanto a presença de contaminação por umidade com sucesso. A análise exploratória através do PCA para as classes de fluidos DOT5.1 com 0% e 5% de contaminação por umidade é ilustrada pela Figura 122.

Figura 122 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT5.1 com 0% e 5% de umidade.



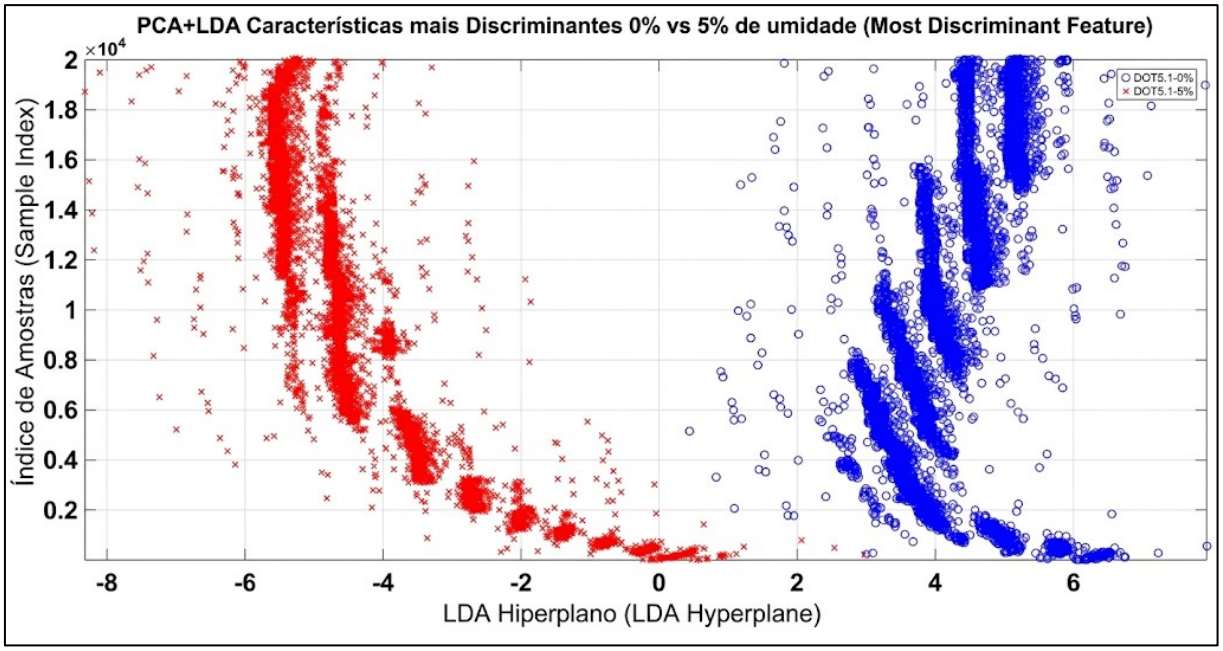
Fonte: Autor.

Observa-se que os dados adquiridos nos ensaios se dividem em ramos diagonais paralelos ao longo do eixo horizontal (PC1, variando de aproximadamente -430 a +70) apresentando uma concentração de forma geométrica vertical na direita do gráfico. Para o PC2, os pontos vermelhos (5%) apresentam dispersão nas bordas externas, virtualmente compartilhando o mesmo coeficiente angular médio que define a inclinação e trajetória dos círculos azuis (0%). Esta característica sugere que a variância da geometria da nuvem de pontos não reflete as variações de taxa de contaminação por umidade.

Para a região delimitada (PC2 de -35 a +50), percebe-se o alinhamento linear bem definido e sobreposto entre as classes em estudo. O modelo demonstra a sobreposição entre as amostras e as classes (0% e 5%) demonstram uma fusão ao longo da extensão da projeção no PC1. Esta característica inviabiliza a discriminação matemática por meio do PCA para as amostras em estudo exigindo uma abordagem de partição supervisionada do espaço de dados.

Assim como nas etapas anteriores para as outras classes de fluidos com diferentes taxas de contaminação, faz-se novamente necessária a avaliação pela técnica da Análise Discriminante Linear (PCA + LDA) como etapa subsequente ao PCA para a avaliação da capacidade do algoritmo separar as classes de contaminação do fluido DOT5.1 com 0% e 5% de contaminação por umidade, conforme ilustrado na Figura 123.

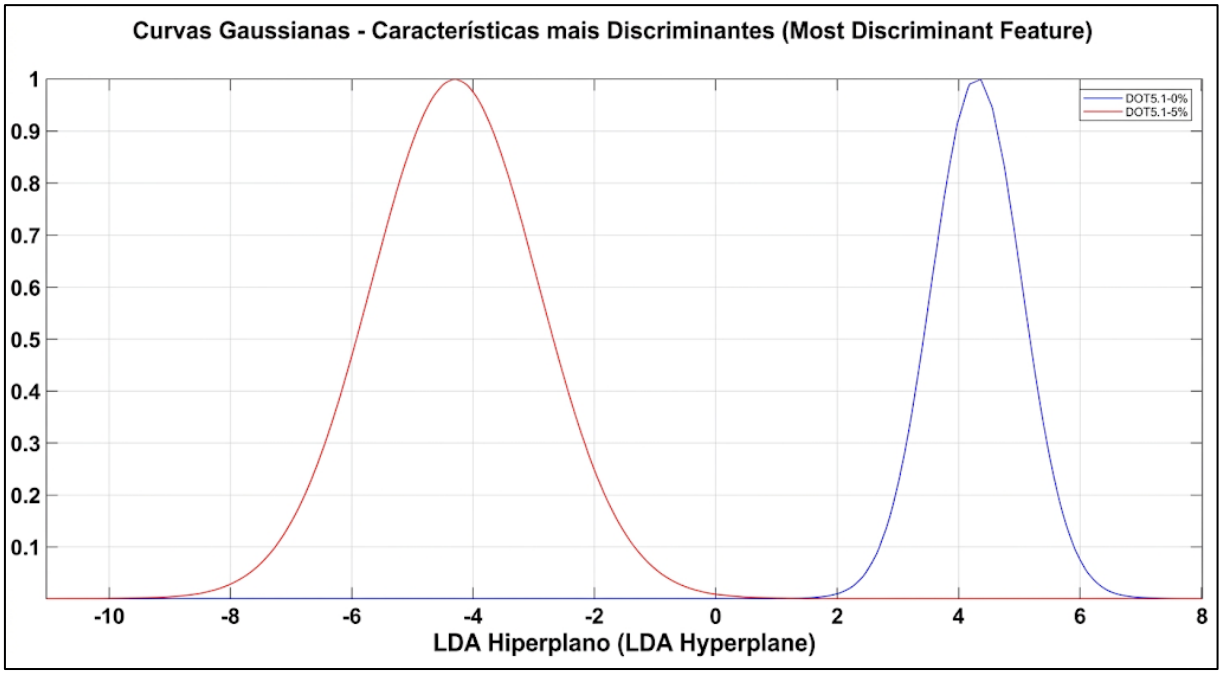
Figura 123 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A análise das características mais discriminantes (PCA + LDA), projetadas no hiperplano no eixo “X” e o índice de amostras projetadas no eixo “Y”, demonstram uma separação bem clara, praticamente não havendo sobreposição, percebe-se que as amostras da classe com 5% de umidade (em vermelho) estão concentradas de forma predominante no lado esquerdo do gráfico, apresentando valores de LDA negativos. As amostras de referência, classe de contaminação por umidade de 0% em azul, se concentraram no lado direito, onde os valores do LDA são positivos. Portanto, a combinação PCA + LDA permite a diferenciação e classificação das amostras de fluidos DOT5.1 com 0% e 5% de contaminação por umidade.

Figura 124 – Curvas Gaussianas dos componentes discriminantes principais do fluído DOT5.1 com 0% e 5%.



Fonte: Autor.

A análise dos resultados do PCA + LDA, da Figura 123 são corroboradas pelas características ilustradas na Figura 124, onde são ilustradas duas curvas gaussianas projetadas no hiperplano obtido no estudo. A curva vermelha, representa a classe DOT5.1 com 5% de contaminação e a azul a classe de referência (DOT5.1 com 0% de contaminação por umidade). Percebe-se que há uma separação clara entre as curvas o que confirma a robustez do classificador para as amostras em estudo.

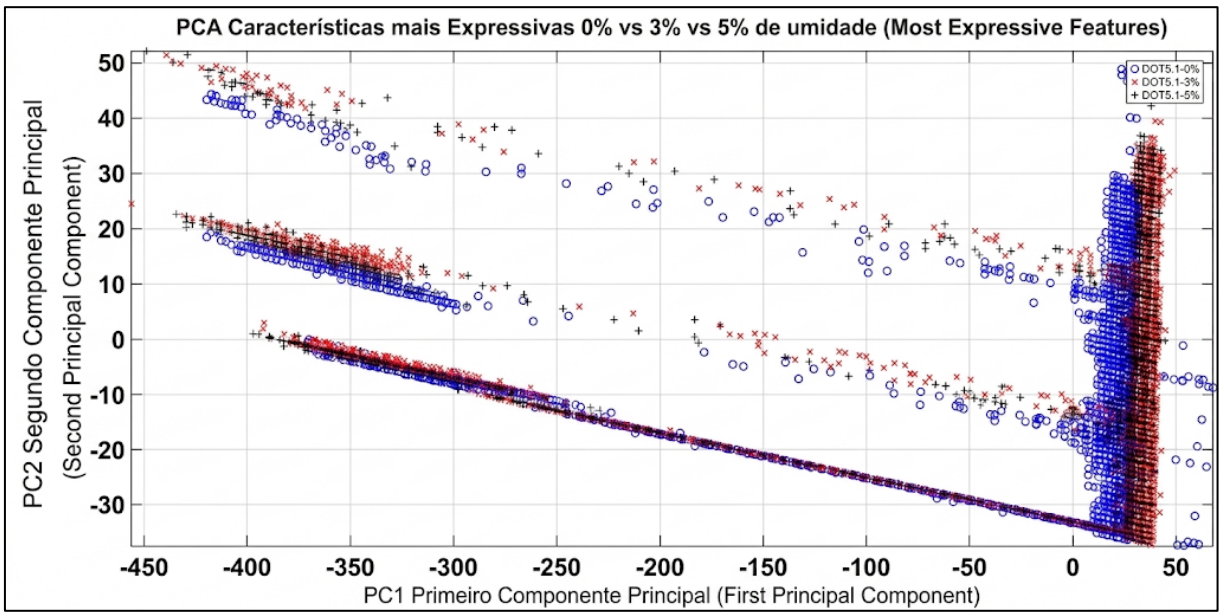
Na sequência do estudo, para estabelecer uma correlação comparativa entre fluídos com diferentes taxas de contaminação (0% *versus* 3% *versus* 5%), conforme ilustrado na Figura 125, realizou-se a redução de dimensionalidades por meio do PCA, para os fluídos de freio padrão (DOT5.1-0%), para o fluído de freio com 3% de umidade (DOT5.1-3%) e por fim para o fluído de freio DOT 5.1 contaminado com 5% de umidade.

A dispersão dos dois primeiros componentes na análise de componentes principais, demonstram uma baixa separabilidade entre as três classes em estudo: DOT5.1-0% em azul, DOT5.1- 3% em vermelho e DOT5.1-5% em preto.

O PCA se concentra em maximizar a variância global dos dados e não na separação das classes. Percebe-se que o comportamento linear inclinado e os agrupamentos verticais podem sugerir a correlação entre as variáveis. Os dados se apresentam distribuído em três linhas

diagonais e paralelas, sendo que há a presença de um comportamento padronizado ao se perceber a grande concentração vertical dos dados. Portanto, a análise sugere que para a separação das classes, deve-se utilizar técnicas supervisionadas para a separação das amostras por taxa de contaminação.

Figura 125 – Análise das duas primeiras componentes principais do fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.

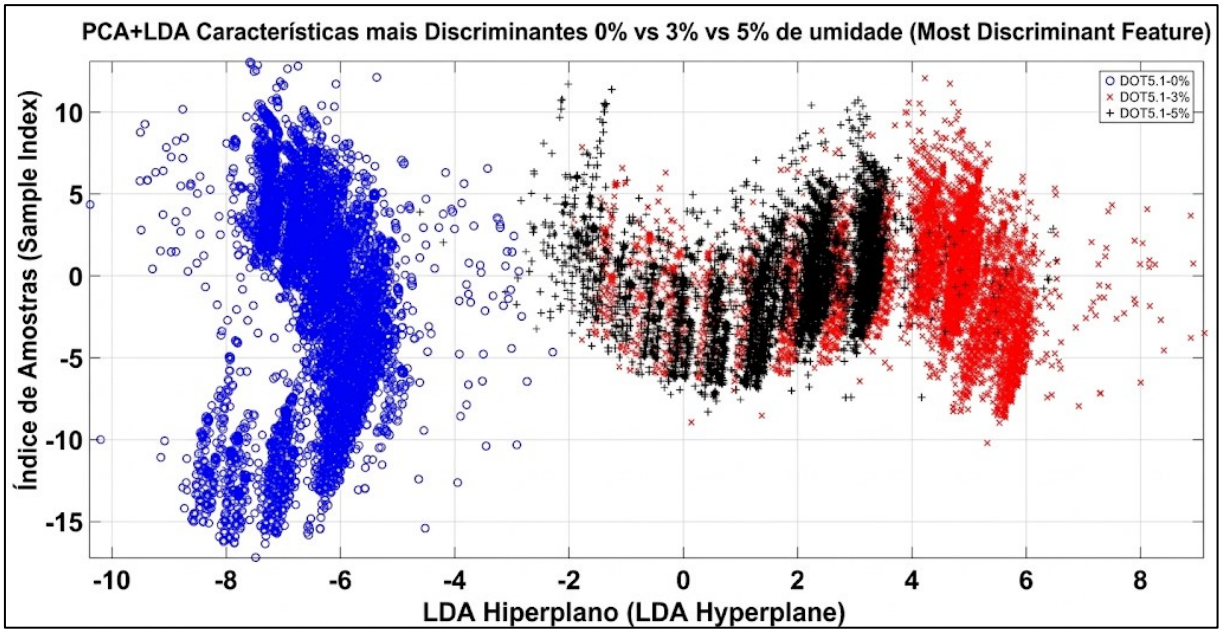


Fonte: Autor.

A aplicação da técnica conjugada (PCA + LDA) para as classes em estudo tem a finalidade de projetar os dados no hiperplano mais discriminante, separando as três classes em estudo, conforme ilustrado na Figura 126. A aplicação da técnica demonstrou-se que de forma robusta ela é uma maneira eficiente para a separabilidade linear. O modelo segrega com sucesso os agrupamentos em lados opostos do hiperplano discriminante, confinando o fluido DOT5.1 0% à região negativa extrema e o fluido de referência puro ao hemisfério positivo.

Por outro lado, é apresentada uma região de intersecção entre as classes DOT5.1 3% (vermelho) e DOT5.1 5% (preto), concentrada principalmente na faixa entre +2 e +4 do eixo LDA. Isso mostra que discriminar variações maiores de umidade pode ser mais desafiador para o modelo.

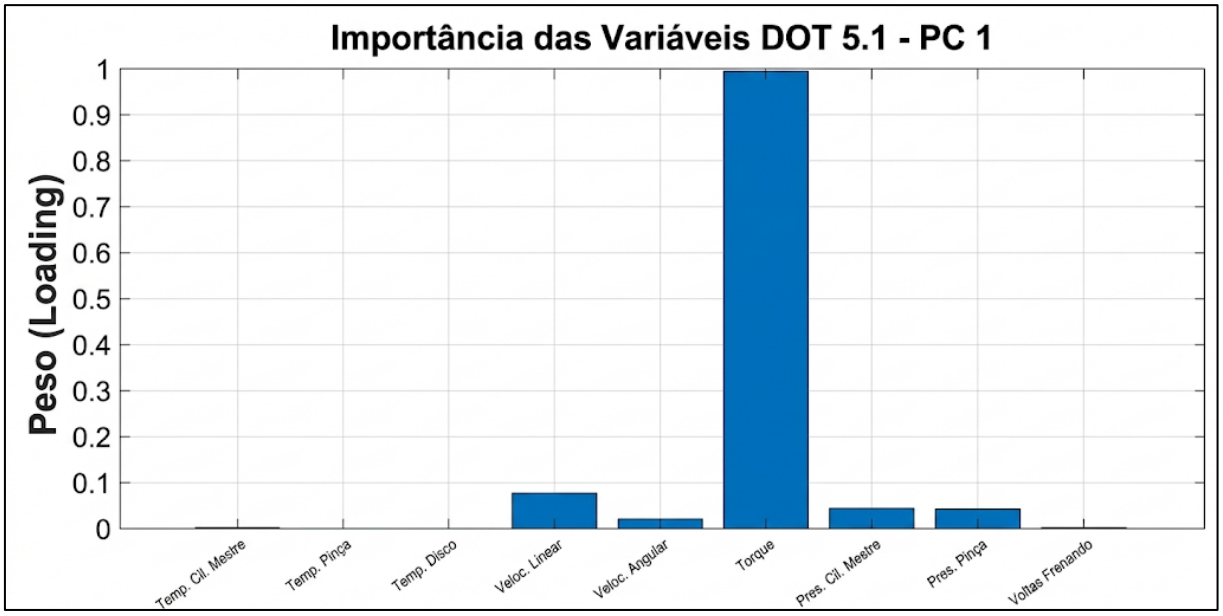
Figura 126 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

A síntese do comportamento do fluido DOT5.1 é consolidada no diagrama multiclasse gerado pelas duas primeiras componentes discriminantes, reunindo os três estados de contaminação monitorados. A investigação sobre os coeficientes de projeção (*loadings*) associados ao fluido DOT5.1 permite interpretar como as propriedades físico-químicas com maior estabilidade térmica e maior ponto de ebulição se refletem nos eixos de máxima variância e discriminação. Na primeira componente principal (PC1), conforme ilustrado na Figura 127, observa-se a manifestação do padrão, onde a variável Torque assume a dominância estatística absoluta com peso unitário. Esse comportamento reitera que, independentemente da especificação do fluido de freio (seja DOT3, DOT4, DOT4LV ou DOT5.1), o carregamento mecânico e os esforços de torção cíclicos ditam a direção primordial de dispersão dos dados brutos no espaço ortogonal não supervisionado.

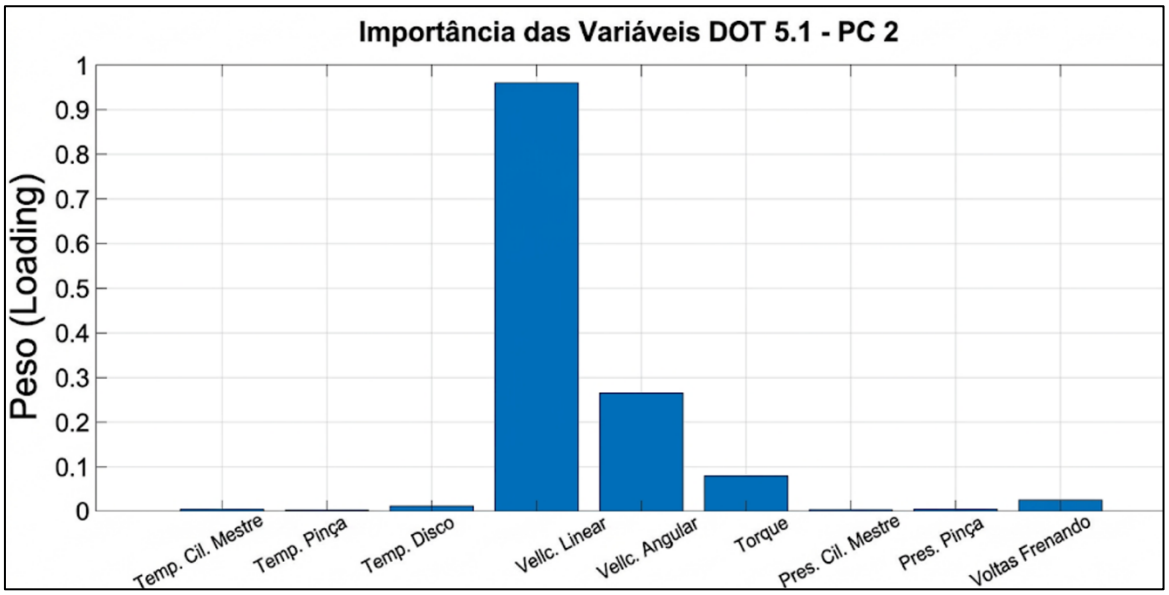
Figura 127 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC1) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

No mapeamento da segunda componente principal (PC2), conforme ilustrado na Figura 128, a dinâmica cinemática do ensaio é isolada de forma análoga aos fluidos anteriores. A variável Velocidade Linear assume o protagonismo vetorial com peso superior a 0,95, seguida de forma secundária pela Velocidade Angular com coeficiente próximo a 0,3.

Figura 128 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC2) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.

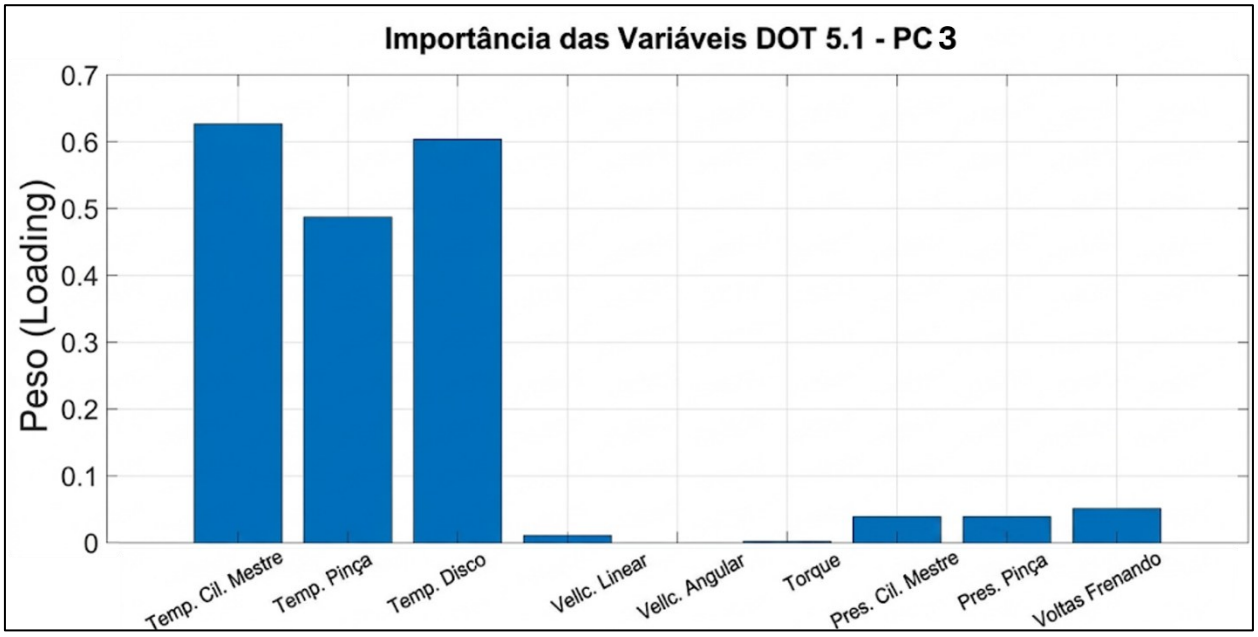


Fonte: Autor.

Essa estabilidade na definição dos dois primeiros eixos de variância (PC1 e PC2) consolida o caráter ortogonal e puramente operativo do binômio Torque-Velocidade, demonstrando que o PCA atua de forma robusta na separação das forças motrizes do ensaio dinâmico, independentemente das variações nas propriedades físico-químicas introduzidas pelas classes de fluidos.

Como ilustrado na Figura 129, as assinaturas térmicas e os efeitos de acoplamento convectivo passam a apresentar flutuações singulares na terceira componente principal (PC3) sob a operação com o fluido DOT5.1.

Figura 129 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC3) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.



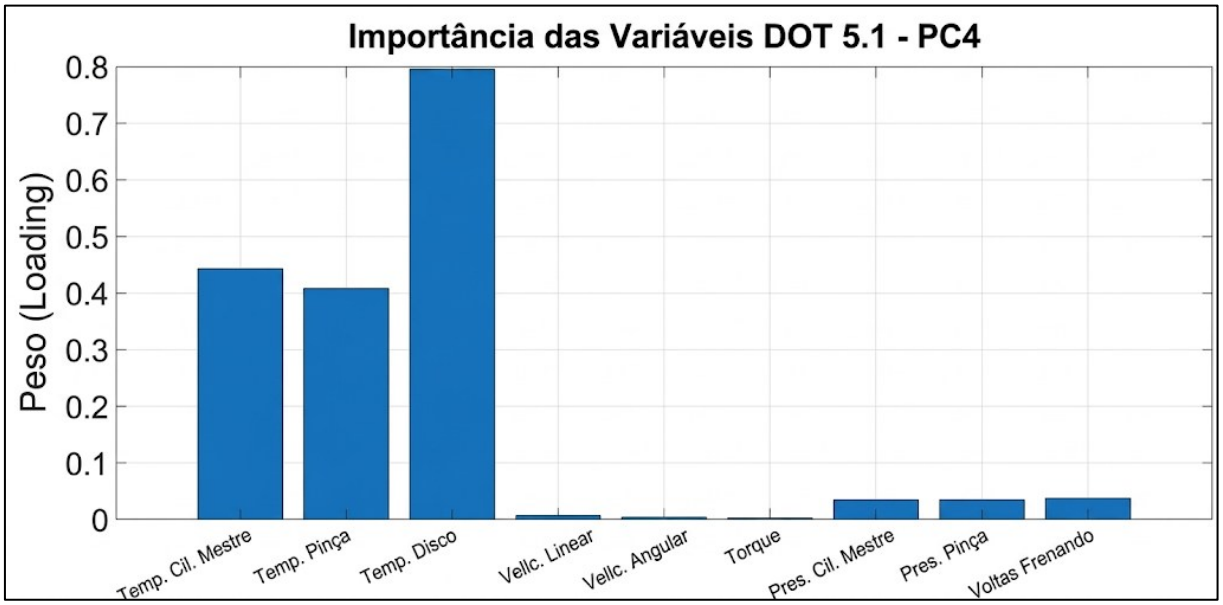
Fonte: Autor.

Embora a Temperatura do Disco retenha a maior contribuição vetorial (peso próximo a 0,95), a Temperatura do Cilindro Mestre registra uma participação marginal reduzida se comparada ao comportamento dos fluidos em estudo. Essa atenuação reflete a maior inércia térmica e a menor suscetibilidade da formulação DOT5.1 a transientes de aquecimento precoce na linha hidráulica, confinando a PC3 a um eixo quase que estritamente indexado à dissipação de calor por atrito na interface metálica do disco.

Essa seletividade térmica, ilustrada na Figura 130, estende-se à quarta componente principal (PC4), onde a Temperatura do Cilindro Mestre assume a dominância da variância

residual, estabelecendo seu coeficiente no patamar de 0,95. As contribuições secundárias da Temperatura do Disco e da Temperatura da Pinça apresentam-se minimizadas, o que indica que, para o fluido DOT5.1, as constantes de tempo de aquecimento e os gradientes de condução de calor entre o ponto de atrito (disco) e a zona de compressão estática (cilindro mestre) operam de forma desacoplada e linearmente independente, mimetizando a independência estrutural observada originalmente no fluido DOT4 padrão.

Figura 130 – Peso das variáveis nas componentes principais (PC4) consideradas para fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.

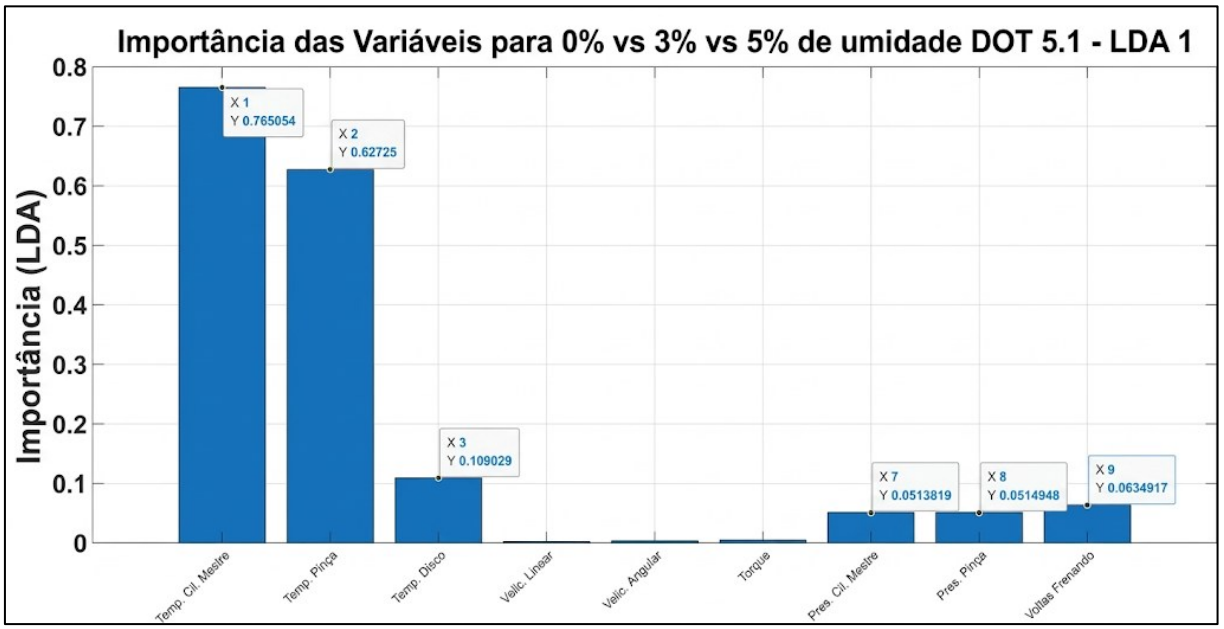


Fonte: Autor.

A fundamentação matemática do modelo supervisionado emerge de forma clara ao analisar os pesos das variáveis no primeiro eixo discriminante (LD1), conforme ilustrado na Figura 131.

O algoritmo identifica que a *feature* crítica para segregar os estados de contaminação por umidade no fluido DOT5.1 é a Temperatura do Cilindro Mestre, atribuindo-lhe um peso discriminante de 0,765054. Como o fluido DOT5.1 possui características físico-químicas projetadas para reter sua estabilidade térmica mesmo em condições severas, as flutuações operacionais globais são sutis; o LD1 obtém sucesso ao isolar e amplificar especificamente a assinatura térmica local do cilindro mestre, onde a presença de umidade altera o calor específico do meio, relegando variáveis mecânicas de alta variância (como Torque e Velocidade) a coeficientes praticamente nulos.

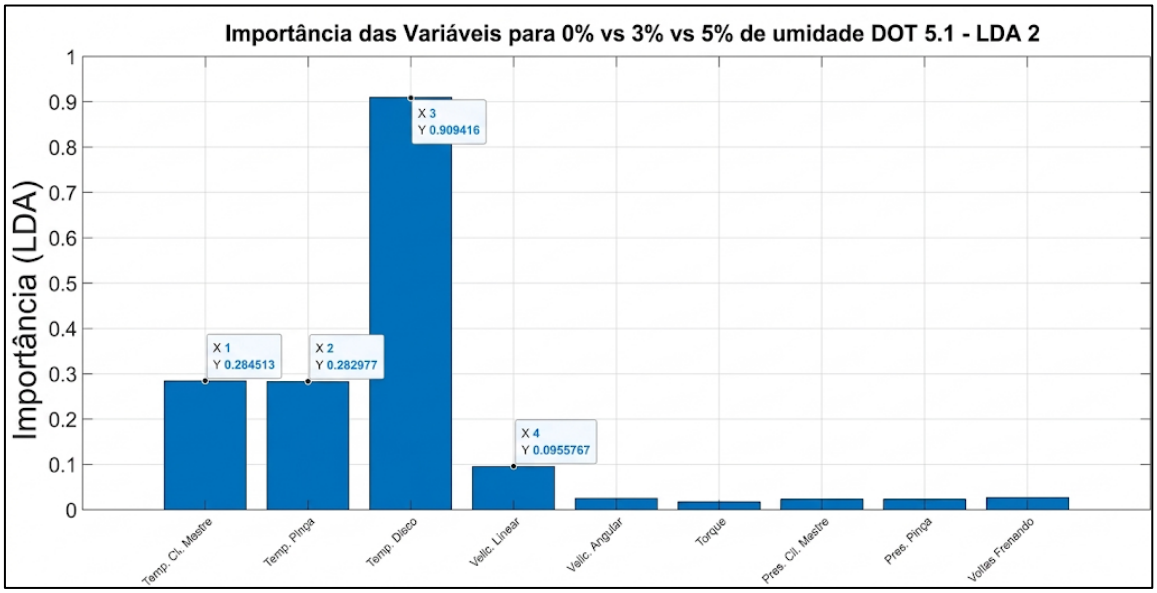
Figura 131 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD1) no fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.



Fonte: Autor.

Por fim, conforme ilustrado na Figura 132, o segundo vetor discriminante (LD2) atua como um refinador geométrico complementar para mapear a trajetória de contaminação do sistema, trazendo a Temperatura do Disco como o eixo de maior peso (0,9094).

Figura 132 – Contribuição das variáveis nas componentes discriminantes (LD2) no fluido DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade.

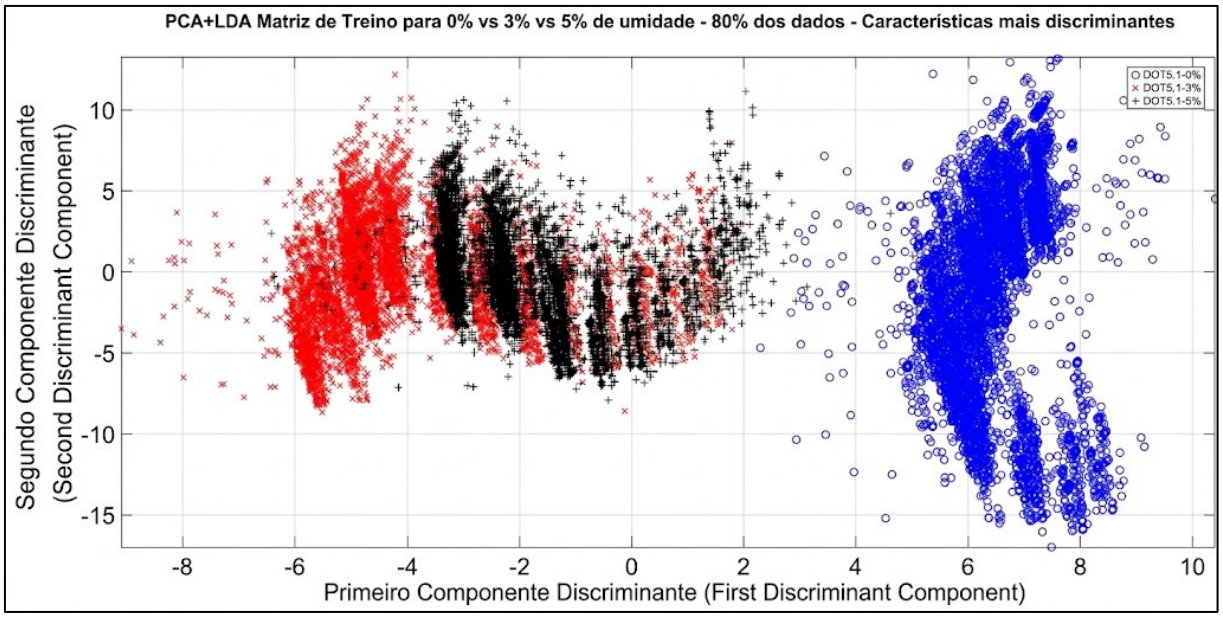


Fonte: Autor.

De forma sinérgica, o LD2 incorpora contribuições ortogonais da Temperatura do Cilindro Mestre (peso de 0,2845) e da Temperatura da Pinça (peso de 0,2829). A combinação ponderada de gradientes térmicos ao longo do circuito hidráulico confere ao modelo a sensibilidade necessária para discriminar a condição intermediária de 3% de umidade, posicionando-a de forma ordenada na fronteira de transição e permitindo o rastreamento contínuo da taxa de contaminação por umidade do fluido DOT5.1.

A validação do desempenho preditivo e da generalização do modelo de discriminante para o fluido DOT5.1 foi efetuada por meio do particionamento do banco de dados em conjuntos independentes de treinamento (80%) e teste (20%), conforme ilustrado nas Figuras 133 e 134. A projeção bidimensional das duas primeiras componentes discriminantes obtida exclusivamente com o subconjunto de treinamento revela a conservação das estruturas topológicas observadas nas análises globais. O agrupamento correspondente à contaminação com 5 % de umidade (DOT5.1 5%) permanece isolado no quadrante esquerdo negativo da primeira componente discriminante, apresentando baixa dispersão interna, enquanto as amostras do fluido de referência (0%) e com contaminação intermediária (3%) mantêm-se adjacentes no hemisfério positivo, o que corrobora a estabilidade matemática das matrizes de dispersão frente à redução do volume de dados de treinamento.

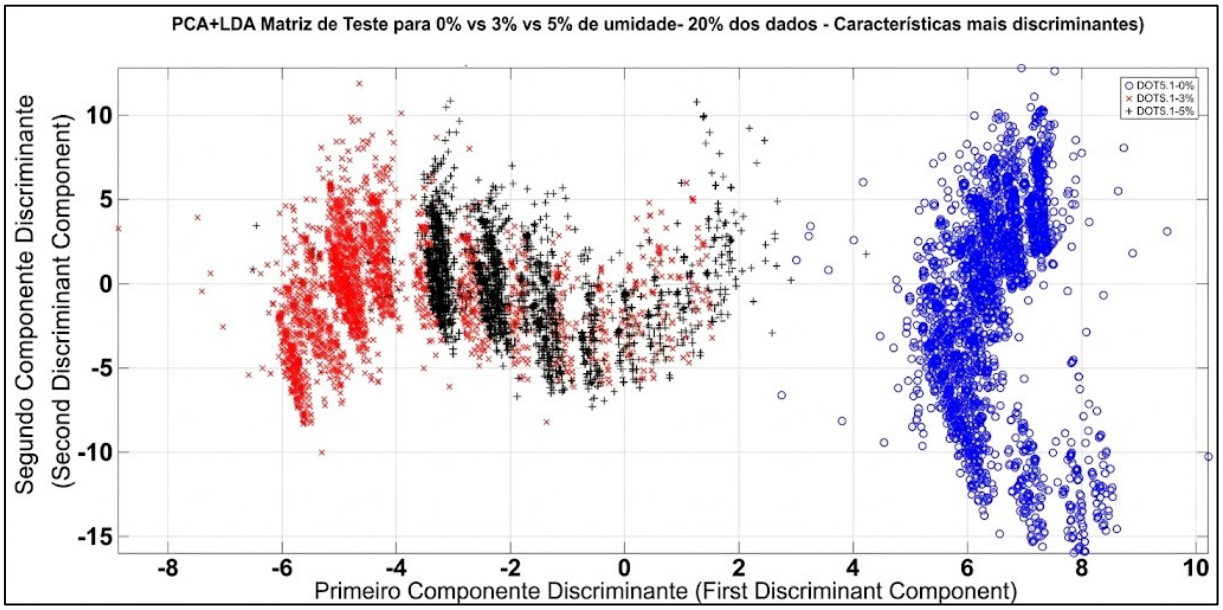
Figura 133 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de treino com 80% dos dados.



Fonte: Autor.

A avaliação do classificador utilizando o conjunto de teste de 20%, ilustrado na Figura 134, cujas amostras foram completamente omitidas durante a etapa de otimização dos pesos vetoriais, atesta a ausência de sobreajuste (*overfitting*) e a alta capacidade de generalização do modelo. Os escores de validação projetam-se com exatidão sobre as regiões de decisão previamente delimitadas: os pontos pretos associados ao fluido contaminado com 5% de umidade, confinam-se estritamente à esquerda do espaço discriminante, enquanto as amostras correspondentes à taxa de contaminação de 3% (vermelho) posicionam-se de forma adjacente à fronteira inferior do fluido de referência com 0% de contaminação por umidade (azul). Essa perfeita aderência espacial de dados inéditos chancela o uso dos gradientes térmicos do cilindro mestre como uma assinatura latente robusta e universal, encerrando de maneira robusta e conclusiva todo o diagnóstico da contaminação por umidade no fluido DOT5.1.

Figura 134 – LDA Projeção nas componentes discriminantes principais após aplicação do PCA no Fluído DOT5.1 com 0%, 3% e 5% de umidade - Matriz de teste com 20% dos dados.



Fonte: Autor.

A etapa final de validação do modelo preditivo consistiu na avaliação do comportamento do fluido DOT 5.1 submetido simultaneamente às três condições experimentais de contaminação por umidade (0%, 3% e 5% de umidade). Os resultados consolidados para esta variante reológica estão apresentados na Tabela 8. A análise da matriz de confusão demonstra que a classe de referência (0%) obteve um índice de assertividade quase absoluto, classificando

corretamente 199.916 das 200.000 instâncias, registrando-se apenas uma omissão direcionada à classe de 3% e 83 falsos positivos alocados no grupo de máxima contaminação (5%). Contudo, observa-se uma dispersão estatística mais acentuada nas transições entre as amostras contaminadas: para a classe de 3%, o modelo predisse corretamente 191.104 amostras, direcionando 8.896 falsos positivos para a classe de 5%.

Tabela 8 – Matriz de confusão média acumulada para o fluido DOT 5.1 após 50 interações.

Taxa de Contaminação	**Predição**		
(%m/m) Classe Real	**(0%)**	**(3%)**	**(5%)**
(0%)	199916	1	83
(3%)	0	191104	8896
(5%)	75	8514	191411

Fonte: Autor.

De maneira recíproca, das 200.000 instâncias reais pertencentes à classe de 5%, 191.411 foram mapeadas com sucesso, enquanto 8.514 amostras sofreram classificação cruzada retrógrada para o nível intermediário de 3% e apenas 75 foram incorretamente associadas à classe controle (0%). Essa elevação na taxa de erro de classificação (*classification*) entre os estados de 3% e 5% refletem características físicas particulares do fluido DOT 5.1, cuja formulação química estabilidade térmica e maior ponto de ebulição em comparação aos fluidos anteriores.

Essa propriedade reológica amortece o impacto térmico e mecânico decorrente do acúmulo de umidade, fazendo com que as assinaturas dinâmicas coletadas nas fases intermediária (3%) e extrema de contaminação (5%) compartilhem um espaço de características mais compacto e sobreposto. Apesar dessa maior proximidade estatística, as métricas globais de mérito do classificador mantiveram-se em patamares excelentes para sistemas de diagnóstico por aprendizado de máquina, alcançando precisão (*precision*) de 97,13%, sensibilidade (*recall*) de 97,12%, F_1-score de 97,13% e uma acurácia global instantânea de 97,12%. Sob o regime de 50 repetições acumuladas, a acurácia média estabilizou-se em 97,10%, evidenciando a robustez geral do modelo e confirmando sua imunidade a flutuações e ruídos estocásticos que possam ter ocorridos durante os ensaios de frenagem.

Paralelamente, o algoritmo provou sua eficácia operacional na implementação de rotinas de diagnóstico automatizado de falhas para sistemas hidráulicos. Adotando a matriz de escores do fluido DOT 5.1 a 0% de umidade como a linha de base referencial de integridade, o

sistema inteligente foi desafiado com dados de teste não identificados pertencentes à classe contaminada com 3% de umidade. O classificador convergiu, gerando os respectivos diagnósticos normativo e restritivo, conforme consolidado no Quadro 4.

Quadro 4 – Diagnóstico automatizado de falha com base na classificação supervisionada (DOT 5.1).

Condição Avaliada	**Fluido de Referência**	**Diagnóstico do Sistema**
Teste 1 (Amostra 0%)	DOT 5.1 — 0% de umidade	**Fluido NÃO contaminado**
Teste 2 (Amostra 3%)	DOT 5.1 — 0% de umidade	**Fluido CONTAMINADO**

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

A presente investigação estabeleceu um arcabouço de aquisição, processamento e classificação para identificar a contaminação nos fluidos de freio DOT 3, DOT 4, DOT 4 LV e DOT 5.1, integrando redução de dimensionalidades e algoritmos de estatística multivariada. A análise comparativa dos métodos aplicados revelou aspectos fundamentais sobre a natureza dos dados experimentais e a dinâmica física do sistema de frenagem.

Inicialmente, a Análise de Componentes Principais demonstrou que a variância dominante no sistema é regida pelas variáveis de torque e velocidade linear — reflexo da natureza cíclica intrínseca ao ensaio — e não necessariamente à contaminação do fluido (0%, 3% e 5%). Este achado indica que a maior variabilidade estatística dos dados brutos não se correlaciona diretamente aos estados de falha ou contaminação.

Por outro lado, a aplicação complementar da Análise de Discriminantes Lineares (PCA + LDA) apresentou desempenho destacável superior ao priorizar a separação entre classes em detrimento da variância global. Os resultados indicaram que as variáveis térmicas possuem a maior relevância na distinção dos níveis de contaminação. Conclui-se, portanto, que a contaminação do fluido altera predominantemente o comportamento térmico do sistema. A absorção de umidade e a consequente redução do ponto de ebulição manifestam-se como assinaturas térmicas detectáveis antes do *fading* hidráulico (falha catastrófica).

A integração do classificador KNN ao espaço transformado pelo PCA + LDA consolidou a eficácia da metodologia, atingindo elevada acurácia média com baixa incidência de erros. A simplicidade do KNN (K = 1), aliada ao poder discriminante do PCA + LDA, comprova a viabilidade de classificações precisas com baixíssimo custo computacional.

A pesquisa se limitou ao processo de classificação de padrões multifuncionais e multivariados em bancada concebida especificamente para ensaios de frenagem em condições urbanas conforme preconizado na literatura para ensaios desta natureza. Ensaios em condições extremas para o conjunto disco e pastilhas como *fading* ou mesmo regeneração de energia de frenagem, embora possam ser adaptados futuramente na bancada, não são comtemplados neste estudo. Para ensaios de *fading* ou regeneração de energia a estrutura física da bancada e seus sistemas elétrico, de controle, sensores e processamento de sinais devem ser revistos e redimensionados. Ensaios físico-quimicos, ponto de ebulição, viscosidade cinemática e influência da degradação dos fluidos por contaminação por umidade não fizeram parte do escopo desta pesquisa. A seleção das taxas de contaminação, bem como o procedimento de preparação de amostras foram realizados pelo próprio fabricante dos fluídos em seus

laboratórios de Pesquisa e Desenvolvimento. As classes dos fluidos escolhidos (DOT3, DOT4, DOT4 LV e DOT5.1) representam a totalidade de produtos disponibilizados pela empresa no mercado mundial, com atenção especial ao DOT4 LV que segundo o fabricante é amplamente utilizado nos veículos híbridos e elétricos.

Portanto, a pesquisa se limita a ensaios pré-definidos com padrões referenciados na literatura científica utilizando a bancada concebida e os fluídos padrões em cada classe pesquisada, com 0% de contaminação por umidade como referência. As escolhas das taxas de contaminações foram realizadas em conjunto com o fabricante de fluídos com base nas experiências contaminações por umidade que ocorrem em situações de exposição do conjunto pastilha de freios, disco e pinça a alagamentos ou prolongada exposição a umidade.

Como contribuição prática, o trabalho aponta a viabilidade de sistemas de monitoramento embarcados. A demonstração de que sensores de temperatura são suficientes para alimentar o modelo treinado viabiliza o desenvolvimento de sistemas de manutenção preditiva em tempo real. Tal avanço impacta diretamente a segurança viária, permitindo a detecção precoce da perda de eficiência hidráulica e mitigando riscos de falhas críticas de frenagem.

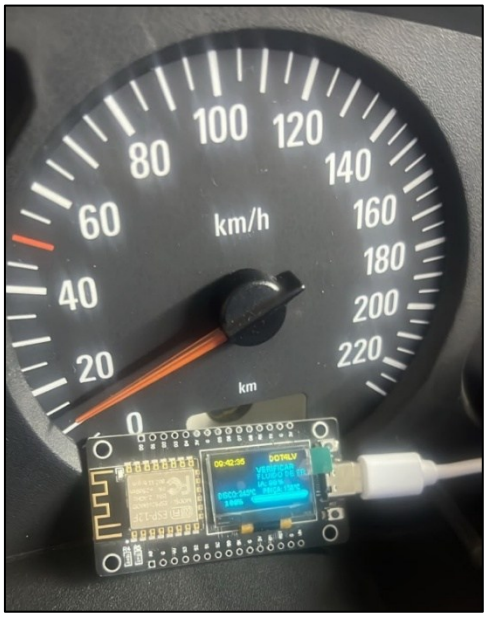
Uma possibilidade futura de evolução do arcabouço proposto e implementado nesta tese é a integração com sistemas de monitoramento em tempo real por meio de uma interface gráfica dedicada. Essa interface permitiria acompanhar parâmetros críticos, como a pressão e temperatura do fluído de freio, em representações visuais intuitivas, organizadas em etapas sequenciais de análise até o resultado. A Figura 135 exemplifica esse passo a passo em seis telas, mostrando a progressão do monitoramento e da análise dos dados. Já a Figura 136 apresenta uma solução inicial: uma placa de circuito (como um Arduino) conectada ao carro, exibindo uma dessas possíveis telas intermediárias. Essa proposta sugere a viabilidade dessa integração, capaz de atender às demandas de monitoramento e diagnóstico em aplicações científicas e industriais subsequentes.

Figura 135 – Interface gráfica de monitoramento do fluído em etapas.



Fonte: Autor, 2026.

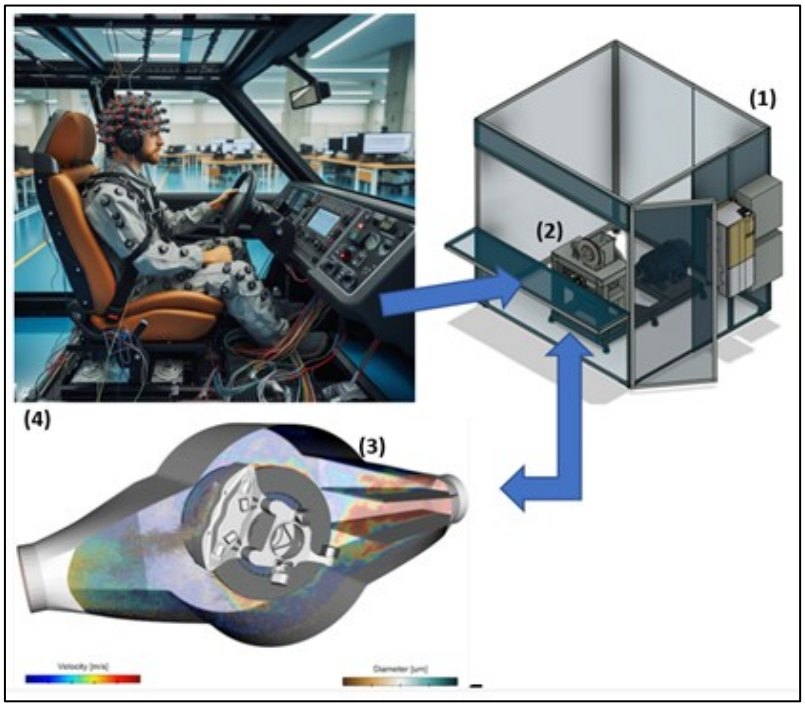
Figura 136 – Protótipo inicial de integração com placa de circuito.



Fonte: Autor, 2026.

Vislumbra-se também como evolução do arcabouço desenvolvido a instalação de funcionalidades para pesquisas de interação homem-máquina conforme ilustrado na Figura 137.

Figura 137 – Bancada com interações homem-máquina, além do sistema de freios.



Fonte: Autor, 2025.

O modelo de utilidade consiste em uma cabine com os sistemas de controle e alimentação elétrica (1) e em seu interior uma bancada com a instalação de um sistema de transmissão acionado por motor elétrico, que por sua vez transmite movimento para o conjunto de disco e pastilha (2), a fim de reproduzir as condições operacionais no veículo. Pode-se instalar um sistema de coleta de particulados (3) no interior da cabine para medição da emissão de particulados durante os ciclos de ensaios. O disco de freio, montado na bancada de ensaio, é acionado pelo motorista (4), que se encontra sentado num banco de automóvel com eletrodos na cabeça e no banco, onde ele é submetido a um processo de testes cognitivos, sensoriais e de monitoramento das ondas cerebrais, campo de visão e pressão do corpo contra o banco, entre outros.

Através do monitoramento desses diversos parâmetros funcionais do sistema de freio instalado na cabina bem como dos sinais biológicos e da avaliação prévia das condições de saúde e cognitivas do condutor, pode-se correlacionar uma série de dados a fim de compreender melhor a influência da combinação destes parâmetros e suas eventuais variações na segurança veicular.

Por fim, linhas de pesquisas abrangendo o comportamento do usuário associados aos fatores humanos e suas influências nas emissões de particulados dos sistemas de freios são

linhas de pesquisas potenciais que utilizarão o conhecimento desta tese como base para desdobramentos científicos futuros. Além das proposições acima, pode-se desenvolver estudos de confiabilidade para os componentes da própria bancada através do sensoriamento para a geração de modelos preditivos para manutenção. Pode-se também pesquisar e desenvolver sistemas de regeneração de energia de frenagem, sistema de controle de frenagem autônoma, materiais para discos pastilhas, sistemas eletrônicos para modulação de frenagem. Adicionalmente, a bancada poderá ser adaptada com a adição de estrutura específica para desempenhar a função de dinamômetro para ensaios de durabilidade, desenvolvimento de motores elétricos de baixa potência e de baterias para veículos de pequeno porte como o fórmula elétrico.

REFERÊNCIAS

ABI, L. et al. Study on Braking Sensation Based on Urban Working Conditions. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, 2017. p. 11006. Disponível em: https://doi.org/10.1051/matecconf/20179511006. Acesso em: 12 set. 2026.

AQI. **Weather history for Sao Bernardo Do Campo, State of Sao Paulo, Brazil**. Delhi: AQI India, 2026. Disponível em: https://www.aqi.in/weather/pt/brazil/state-of-sao-paulo/sao-bernardo-do-campo/history. Acesso em: 11 jul. 2026.

ASBACH, C. et al. Entstehung und Möglichkeiten zur Messung von Fein-und Ultrafeinstaub beim Bremsen. In: **XXXVII. Internationales µ-Symposium 2018 Bremsen-Fachtagung: XXXVII International µ-Symposium 2018 Brake Conference October 26th 2018, Bad Neuenahr/Germany Held by TMD Friction EsCo GmbH, Leverkusen**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. p. 45-67. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58024-0_4. Acesso em: 11 jul. 2026.

BELHOCINE, A.; WAN-OMAR, W. CFD modeling and computation of convective heat coefficient transfer of automotive disc brake rotors. **Revista científica**, n. 29, p. 116-128, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.RC.2017.29.a1. Acesso em: 14 set. 2026.

CABAN, J. et al. Operational tests of brake fluid in passenger cars. **Periodica Polytechnica Transportation Engineering**, v. 49, n. 2, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3311/PPtr.14583. Acesso em: 11 jul. 2026.

CHI TIEN, D. et al. Hydrophilic Characterization of Automotive Brake Fluid. **Data in Journal of Testing and Evaluation**, v.34, n 5, p 400-404, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1520/JTE14254. Acesso em: 11 jul. 2026.

CLIMATEMPO. **Análise climática e médias históricas: São Bernardo do Campo (SP)**. São Paulo: Climatempo, 2026. Disponível em: https://www.climatempo.com.br/. Acesso em: 11 jul. 2026.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. 2022. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=429693. Acesso em: 26 fev. 2024.

DAY, A. J. Braking of road vehicles. Oxford: Elsevier, 2014. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780128220054/braking-of-road-vehicles. Acesso em: 13 fev. 2024.

DEPOSITPHOTOS. Depositphotos. [s.d.]. Disponível em: https://depositphotos.com/. Acesso em: 13 fev. 2024.

DIGITAL SCALE CO. LTD. Datasheet – KELI DEE Load Cell. Disponível em: https://digitalscale.co.th/sites/4573/files/u/Digital%20Scale/DATA%20SHEETS/KELI%20DEE.pdf. Acesso em: 27 dez. 2025.

EL WARDI, J.; et al. The quality acceptance specifications of automotive electrical connector using combination of principal component analysis and regression statistical analysis. **Journal of Engineering Research**, 2025. ISSN 2307-1877. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jer.2025.10.005. Acesso em: 29 dez. 2025.

FERRETO, C. J. Ruídos em sistema de freio a disco: correlação da análise de autovalores complexos com métodos experimentais. Acesso em: 13 dez. 2018.

Ford Global Technologies. Vehicle adaptive cruise control noise cancelation. US 20190189104, 2019. Disponível em: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US244367422>. Acesso em: 22 ago. 2026.

FUKUNAGA, K. **Introduction to Statistical Pattern Recognition**. New York: Academic Press, 1990. Disponível em: https://shop.elsevier.com/books/introduction-to-statistical-pattern-recognition/fukunaga/978-0-08-047865-4. Acesso em: 12 set. 2026.

GARCIA, R.; GÓMEZ, J.; JARAMILLO, H. Bibliometric analysis in disc brakes: An overview. **DYNA (Colombia)**, v. 88, n. 217, p. 23–31, 1 abr. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.91091. Acesso em: 12 set. 2026.

GEFRAN S.P.A. Datasheet – Produto ID 14717. Disponível em: https://doc.gefran.com/download/?type=product&id=14717&lang=en. Acesso em: 27 dez. 2025.

GEIER, C. et al. Machine learning-based state maps for complex dynamical systems: applications to friction-excited brake system vibrations. *Nonlinear Dynamics*, v. 112, p. 1-22, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11071-023-08739-6. Acesso em: 14 set. 2026.

GILLES, T. Automotive service: inspection, maintenance, repair. 6. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2024. Disponível em: https://www.cengage.com/c/automotive-service-inspection-maintenance-repair-6e-gilles/9781337794039/. Acesso em: 27 dez. 2025.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale: SAE International, 1992. Disponível em: https://doi.org/10.4271/R-114. Acesso em: 12 set. 2026.

GREGORI, I. R. S. **Estudo da influência do material de atrito dos discos de embreagem sobre o fenômeno de trepidação judder em veículos.** 2010. Mestrado em Engenharia Mecânica – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP. Disponível em: https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/622. Acesso em: 12 set. 2026.

GREGORI, I. R. S.; THOMAZ, C. E.; MARTINS, C. G. Multivariate judder behavior analysis of dry clutches based on torque signal and friction material. In: **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**, [S.l.], out. 2014. p. 1–5. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7007108. Acesso em: 14 set. 2026.

GREGORI, I. R. S.; SANCHES, I.; THOMAZ, C. E. Clutch judder classification and prediction: a multivariate statistical analysis based on torque signals. **IEEE Transactions on Industrial Electronics,** p. 8, out. 2016. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7748470. Acesso em: 14 set. 2026.

HALDAR, S. Advanced braking systems: ABS, EBD and brake assist. International Journal of Automotive Engineering, 2022.

HSIEH, M. C. et al. A Simulation-Based Study of the Effect of Brake Light Flashing Frequency on Driver Brake Behavior from the Perspective of Response Time. **Behavioral Sciences 2022, Vol. 12, Page 332**, v. 12, n. 9, p. 332, 14 set. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/bs12090332. Acesso em: 12 set. 2026.

HOUICHIME, T.; EL AMRANI, Y**.** Context is all you need: a hybrid attention-based method for detecting code design patterns. IEEE Access, v. 13, p. 9689–9707, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3525849. Acesso em: 29 dez. 2025.

HOWSTUFFWORKS. How car brakes work. HowStuffWorks, [s.d.]. Disponível em: https://auto.howstuffworks.com/auto-parts/brakes/brake-types/brake.htm. Acesso em: 13 fev. 2024.

HUANG, Z. P. et al. Structural Analysis and Improvement Design of Brake Pressure Valve Feedback Stage in Multivalve Parallel Brake System. **Shock and Vibration**, v. 2021, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2021/4551799. Acesso em: 12 set. 2026.

IFM ELECTRONIC. Datasheet – Sensor de temperatura TS2759-00. Disponível em: https://media.ifm.com/dam/7ea16766-3514-48e7-8139-446ef5818446/Original/TS2759-00_EN-US.pdf. Acesso em: 14 set. 2026.

ILICHEVA, P. M. et al. Rapid forensic characterization of automotive clear coats by ATR-FTIR combined with chemometrics. Talanta Open, v. 12, 2025, p. 100563. ISSN 2666-8319. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.talo.2025.100563. Acesso em: 29 dez. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **São Bernardo do Campo: panorama**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-bernardo-do-campo/panorama. Acesso em: 11 jul. 2026.

INSTRUTHERM INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. *Testador de Fluído de Freio modelo TFF-200*. São Paulo: Instrutherm, 2026. Disponível em: https://www.instrutherm.com.br/testador-de-fluido-de-freio-modelo-tff-200 Acesso em: 22 ago. 2026.

IRAWAN, A. P. et al. Overview of the Important Factors Influencing the Performance of Eco-Friendly Brake Pads. **Polymers**, v. 14, n. 6, 1 mar. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/polym14061180. Acesso em: 12 set. 2026.

JAHAN, F. et al. Selection of Automotive Brake Material Using Different MCDM Techniques and Their Comparisons. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 15, n. 1, p. 24–33, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.25103/JESTR.151.04. Acesso em: 14 set. 2026.

JEGADEESHWARAN, R.; SUGUMARAN, V. Fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using statistical features and support vector machines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 52–53, n. 1, p. 436–446, 1 fev. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.08.007. Acesso em: 12 set. 2026.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6. ed. [S.l.]: Pearson, 2007.

KALEL, N. et al. Eco-Friendly Brake-Pads Using Ferritic Stainless-Steel Particles of Varying Sizes: Influence on Performance Properties. **SAE Technical Papers**, n. 2020, 5 out. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.4271/2020-01-1602. Acesso em: 12 set. 2026.

KALEL, N.; DARPE, A.; BIJWE, J. Propensity to noise and vibration emission of copper-free brake-pads. **Tribology International**, v. 153, p. 106651, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X20304783. Acesso em: 12 set. 2026.

KILIÇ, H.; MISIRLI, C. Investigation of tribological behavior of 20NiCrBSi-WC12Co coated brake disc by HVOF method. **Materials Research Express**, v. 7, n. 1, p. 016560, 13 jan. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab61be. Acesso em: 14 set. 2026.

KIM, S. W. et al. Thermophysical Properties of Automotive Metallic Brake Disk Materials. **Int J Thermophys**, v. 29, p. 2179–2188, 2008. Disponível em: 10.1007/s10765-008-0537-3. Acesso em: 12 set. 2026.

KIM, Y.-J.; WOO, S.; CHUNG, J.-G. Triple ID flexible MAC for CAN security improvement. IEEE Access, v. 9, p. 126388–126399, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3109952. Acesso em: 29 dez. 2025.

KIM, W. et al. Vehicular multilevel data arrangement-based intrusion detection system for in-vehicle CAN. Security and Communication Networks, 2022, art. 4322148, 11 p. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2022/4322148. Acesso em: 29 dez. 2025.

KOCH, S. et al. ON THE INFLUENCE OF MULTIPLE EQUILIBRIUM POSITIONS ON BRAKE NOISE. **Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 613–632, 1 dez. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.14279/depositonce-17517. Acesso em: 12 set. 2026.

LIMPERT, R. Brake design and safety. 4. ed. Warrendale: SAE International, 2022.

MA, Q.; WANG, Y. Fault diagnosis and analysis of hydraulic brake based on friction vibration signal. **Journal of Vibroengineering**, v. 25, n. 5, p. 908–920, 4 abr. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.21595/jve.2023.23078. Acesso em: 12 set. 2026.

MAO, T.; XU, J. **Do Neural Networks Really Beat the Curse of Dimensionality? A Bit-Complexity View**. *arXiv*, [S. l.], 2026. Disponível em: https://arxiv.org/pdf/2608.01357. Acesso em: 23 ago. 2026.

MENG, D.; ZHANG, L.; YU Z. A dynamic model for brake pedal feel analysis in passenger cars. **Article in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering**, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1177/0954407015598030. Acesso em: 12 set. 2026.

MICROSOFT MSN. **Previsão do tempo e tendências climáticas: São Bernardo do Campo, São Paulo**. Redmond: Microsoft MSN Clima, 2026. Disponível em: https://www.msn.com/pt-br/clima/forecast/in-S%C3%A3o-Bernardo-do-Campo,S%C3%A3o-Paulo. Acesso em: 11 jul. 2026.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. Race car vehicle dynamics. Warrendale: SAE International, 1995. Disponível em: https://openlibrary.org/books/OL1111145M/Race_car_vehicle_dynamics#editions-list. Acesso em: 12 set. 2026.

MLADENOV, G.; DAMYANOV, I.; VALKOVSKI, T. **Research and selection of parameters determining the efficiency of the braking system of cars to improve traffic safety and environmental performance**. 2021 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2021 - Proceedings. **Anais**...2021. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9483507. Acesso em: 14 set. 2026.

MULANI, S. M. et al. A review on recent development and challenges in automotive brake pad-disc system. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 447-454, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322004850. Acesso em: 12 set. 2026.

NEWASE, Srushti. Thermal analysis of disc brake system. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 9, p. 1819-1826, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37662. Acesso em: 14 set. 2026.

NIEMANN, H. et al. System identification method for brake particle emission measurements of passenger Car disc brakes on a dynamometer. SAE Technical Paper, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.4271/2018-01-1884. Acesso em: 14 set. 2026.

NIEMANN, H. et al. Influence of Disc Temperature on Ultrafine, Fine, and Coarse Particle Emissions of Passenger Car Disc Brakes with Organic and Inorganic Pad Binder Materials. v. 11, p. 1060, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/atmos11101060. Acesso em: 14 set. 2026.

NIVEDITHA, S. et al. Kernelized deep networks for speech signal segmentation using clustering and artificial intelligence in neural networks. In: **IEEE 12th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)**, 2023, Bhopal, India. Anais… Bhopal, India: IEEE, 2023. p. 667–674. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/10134609. Acesso em: 12 set. 2026.

OMRON CORPORATION. E6B2-C Incremental 40-mm-dia. Rotary Encoder: general-purpose encoder with external diameter of 40 mm: datasheet. Kyoto: OMRON Corporation, 2023. Disponível em: https://files.omron.eu/downloads/latest/datasheet/en/q085_e6b2-c_incremental_rotary_encoder_40_mm_datasheet_en.pdf?v=1. Acesso em: 27 dez. 2025.

OTTO, J.; OSTERMEYER, G. P. High-frequency vibrations in the contact of brake systems. **Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering**, v. 17, n. 2, p. 103–112, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.22190/FUME190326017O. Acesso em: 12 set. 2026.

PISATURO, M.; CIRRINCIONE, M.; SENATORE, A. Influence of the temperature on the dry-clutch engagement control in gear-shift manoeuvres. **Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)**, p. 8, jun. 2015. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7158737. Acesso em: 12 set. 2026.

RAADNUI, S.; INTASONTI, S. Capacitive sensing of solid debris in used lubricant of transmission system: multivariate statistics classification approach. Lubricants, v. 13, n. 7, p. 304, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/lubricants13070304. Acesso em: 29 dez. 2025.

REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. The automotive chassis: engineering principles. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2021. Acesso em: 12 set. 2026.

RESISPAR. Página inicial. Ribeirão Preto: Resispar, [s.d.]. Disponível em: https://www.resispar.com.br/. Acesso em: 27 dez. 2025.

RENCHER, A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. 2. ed. [S.l.]: Wiley Interscience, 2002. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1002/9781118391686. Acesso em: 12 set. 2026.

SAFIRATEC LTDA. Safira Tecnologia. Disponível em: https://www.safiratec.com.br/. Acesso em: 27 dez. 2025.

SAHOO, B. P. et al. A review on automotive brake friction materials. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2023.

SEJKOROVÁ, M. et al. Analysis of operation wear of brake fluid used in a Volvo car. In: **Transport Means: proceedings of the international scientific conference**. Kaunas University of Technology, 2018.

SHAH, R.; MITTAL, V.; LOTWIN, M. Recent advances in vibration analysis for predictive maintenance of modern automotive powertrains. Vibration, v. 8, n. 4, p. 68, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/vibration8040068. Acesso em: 29 dez. 2025.

SHLENS, J. **A tutorial on Principal Component Analysis**, p. 12, abr. 2014. Disponível em: https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.1100. Acesso em: 12 set. 2026.

SIREGAR, R. et al. **Study the brake performance of a passenger car based on the temperature that occurs in each brake unit**. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1063/5.0003747. Acesso em: 12 set. 2026.

SOUZA, J. de L.. **Investigação das falhas do sistema de acionamento de embreagem do tipo cilindro escravo concêntrico em veículos comerciais pesados sob as condições operacionais do mercado brasileiro**. 2006. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Disponível em: https://doi.org/10.11606/D.3.2006.tde-23122014-110603. Acesso em: 12 set. 2026.

STENDER, M. et al. Deep learning for brake squeal: Brake noise detection, characterization and prediction. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 149, p. 107181, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107181. Acesso em: 12 set. 2026.

SUN, H. et al. A water-stable Schiff base fluorophore: AIEE behavior, reversible mechanofluorochromism, detection of water content and viscosity of automobile brake fluid, and cell imaging. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 441, p. 114730, 1 jul. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114730. Acesso em: 12 set. 2026.

TESLA. **Checking Brake Fluid**. Disponível em: https://service.tesla.com/docs/Public/diy/2012_2020_models/en_us/GUID-1D888517-65DF-4501-9F8A-90A7E879068F.html. Acesso em: 30 abr. 2024.

THARWAT, A. et al. Linear discriminant analysis: a detailed tutorial. AI Communications, v. 30, n. 2, p. 169–190, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.3233/AIC-170729. Acesso em: 12 set. 2026.

THOMAZ, C. E.; GILLIES, D. F.; FEITOSA, R. Q. A new covariance estimate for Bayesian classifiers in biometric recognition. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, v. 14, n. 2, p. 214–223, 2004. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1269754. Acesso em: 12 set. 2026.

THOMAZ, C. E.; KITANI, E. C.; GILLIES, D. F. A maximum uncertainty LDA-based approach for limited sample size problems – with application to face recognition. **Journal of the Brazilian Computer Society**, v. 12, n. 2, p. 7–18, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF03192391. Acesso em: 12 set. 2026.

TIRRENO. **Fluidos de Freios | TIRRENO**. Disponível em: http://tirreno.com.br/produtos/linha-automotiva/fluidos-de-freios. Acesso em: 9 mar. 2024.

TOPOURIS, S. et al. Heat Dissipation from Stationary Passenger Car Brake Disc. **Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering**, v. 66, n. 1, p. 15-28, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6002. Acesso em: 12 set. 2026.

UN ECE R13. **Regulation No 13 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking [2016/194] - Publications Office of the EU**. Disponível em: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0a43f880-d612-11e5-a4b5-01aa75ed71a1/language-en. Acesso em: 16 fev. 2024.

UNECE. **UNECE adopts groundbreaking regulation introducing methodology to measure particle emissions from cars and vans' braking systems | UNECE**. Disponível em: https://unece.org/environment/press/unece-adopts-groundbreaking-regulation-introducing-methodology-measure-particle. Acesso em: 2 mar. 2024.

UNITED NATIONS. 74/299. Improving global road safety. 2020.
Disponível em: https://www.un.org/pga/76/wp-content/uploads/sites/101/2021/11/A_RES_74_299_E.pdf
Acesso em: 26 jan 2024

UNITED NATIONS. **ONU**.
Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/156091-oms-lan%C3%A7a-d%C3%A9cada-de-a%C3%A7%C3%A3o-pela-seguran%C3%A7a-no-tr%C3%A2nsito-2021-2030
Acesso em: 26 jan. 2024.

UNITED NATIONS. **Landmark road safety leaders' summit boosts action to reduce road crash deaths worldwide**. Disponível em: https://www.who.int/news/item/27-06-2023-landmark-road-safety-leader-s-summit-to-combat-road-crash-deaths-worldwide
Acesso em: 30 abr. 2024.

US DOT. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION LABORATORY TEST PROCEDURE FOR FMVSS 135 Light Vehicle Brake Systems. 2005. Disponível em: https://unece.org/DAM/trans/doc/wp29compendium/6-3.pdf. Acesso em: 9 mar 2024.

USPTO. **US6339050B1 - Brake fluid composition for an automobile - Google Patents**. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US6339050B1/en. Acesso em: 9 mar. 2024.

WOO, S.-H. et al. Characterization of brake particles emitted from non-asbestos organic and low-metallic brake pads under normal and harsh braking conditions. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119089. Acesso em: 12 set. 2026.

YIN, F. et al. **A Passenger Car Brake Pedal Feel Analysis Model Based on Integrated Brake by Wire System**. SAE Technical Papers. **Anais**...2021. Disponível em: https://doi.org/10.4271/2021-01-0975. Acesso em: 12 set. 2026.

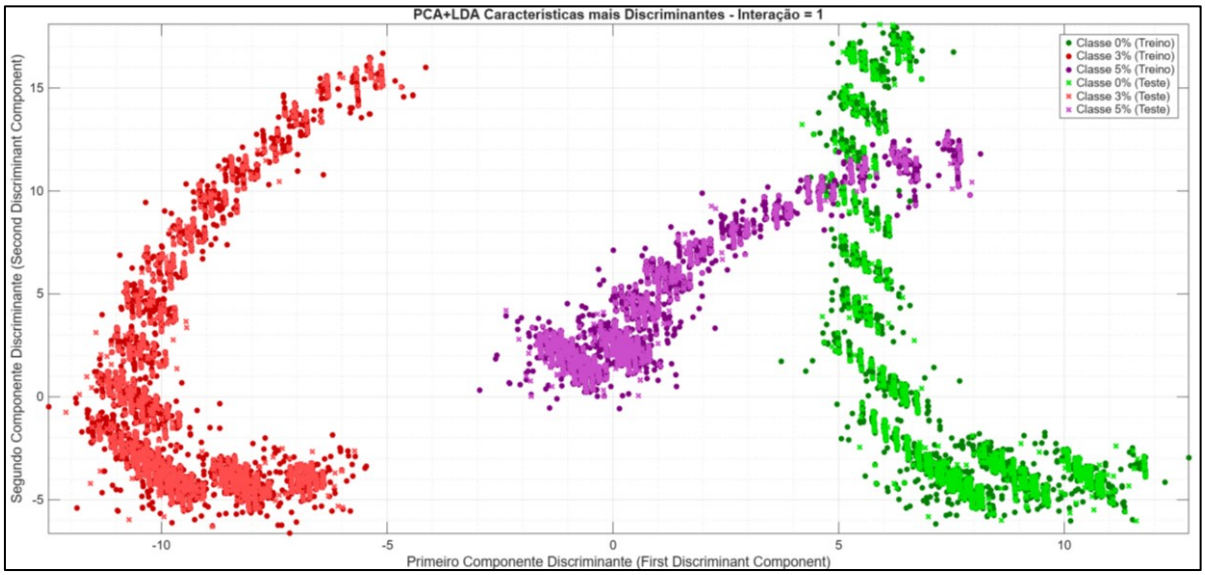
ZHU, B. et al. Personalized Control Strategy of Electronic Brake Booster With Driving Behaviors Identification. **IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY**, v. 70, n. 12, 2021. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9563941. Acesso em: 12 set. 2026.

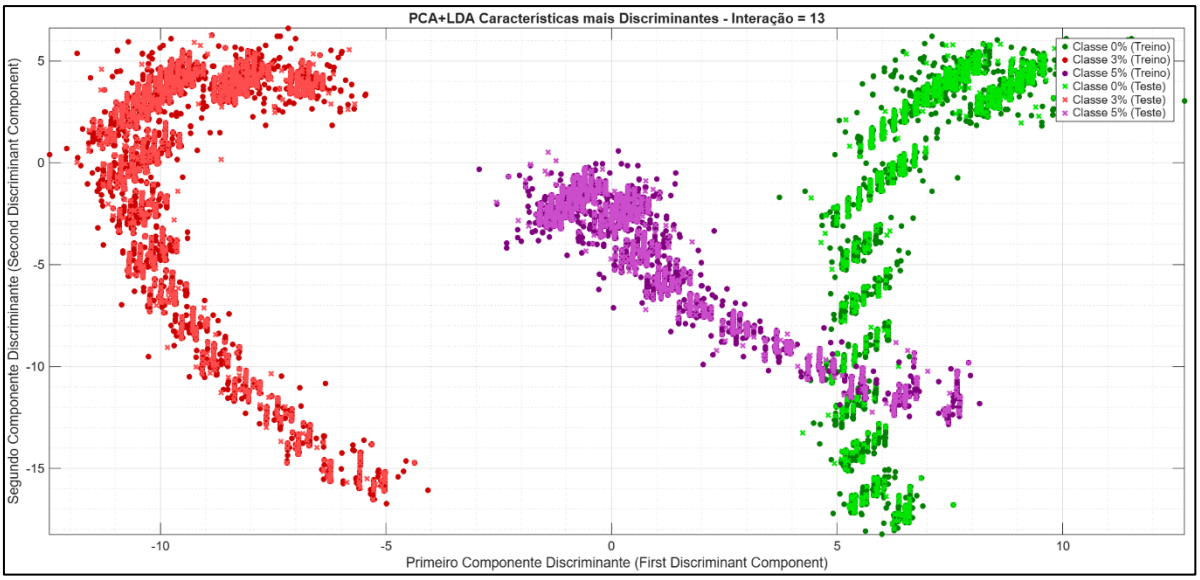
APÊNDICE A – ARQUIVOS COM OS DADOS MEDIDOS DOS FLUÍDOS.

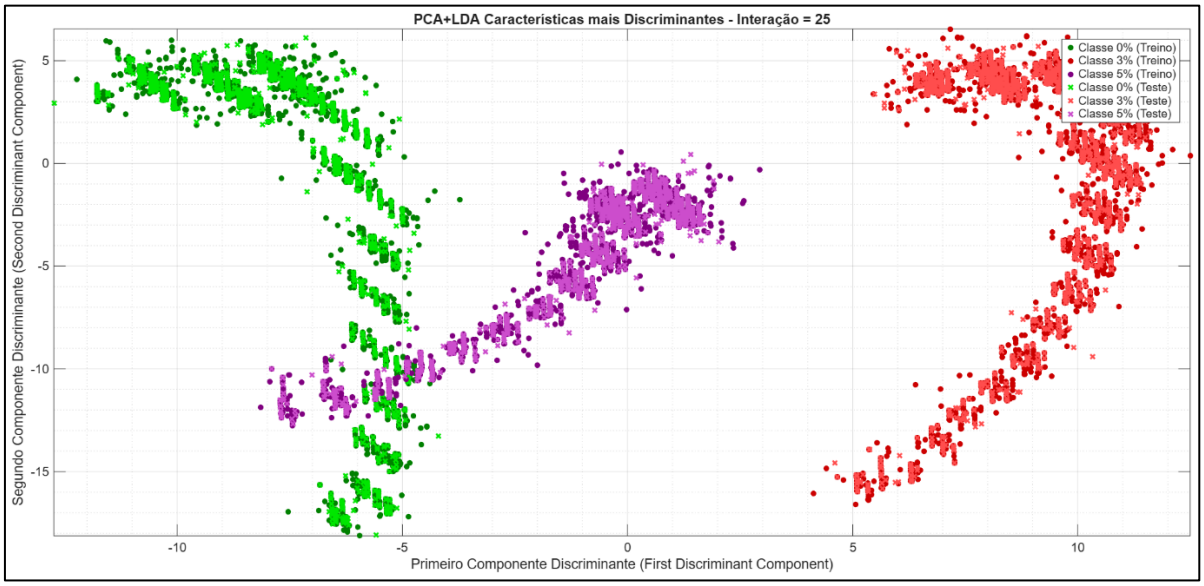
Os arquivos contendo os dados medidos dos fluidos gerados na bancada de testes foram armazenados em formato “.xlsx”. Por esse motivo, não é possível anexá-los diretamente ao documento. Para garantir o acesso às informações utilizadas na obtenção dos resultados apresentados nesta tese, disponibiliza-se o respectivo DOI, por meio do qual os arquivos podem ser consultados.

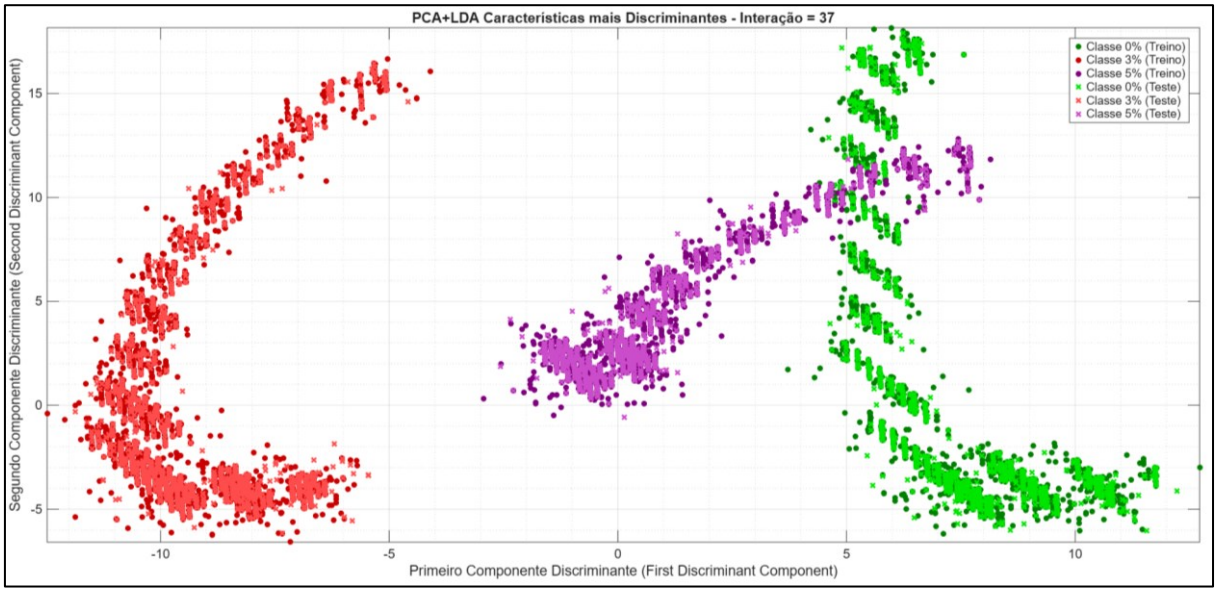
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.21312175

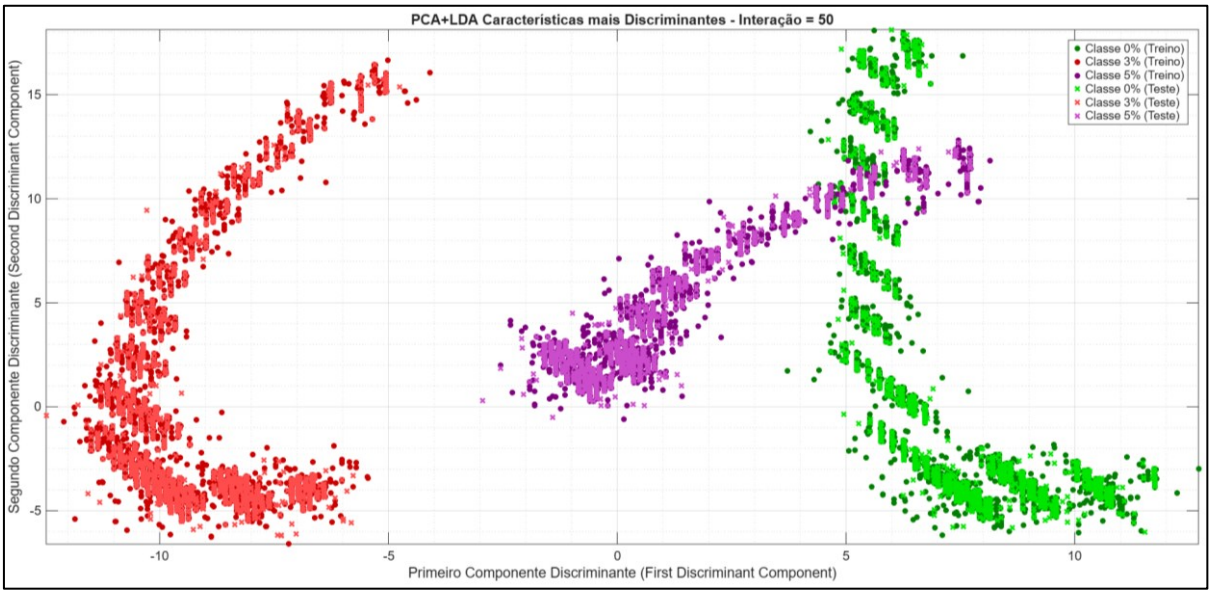
APÊNDICE B – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT3 DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO.


PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 1
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

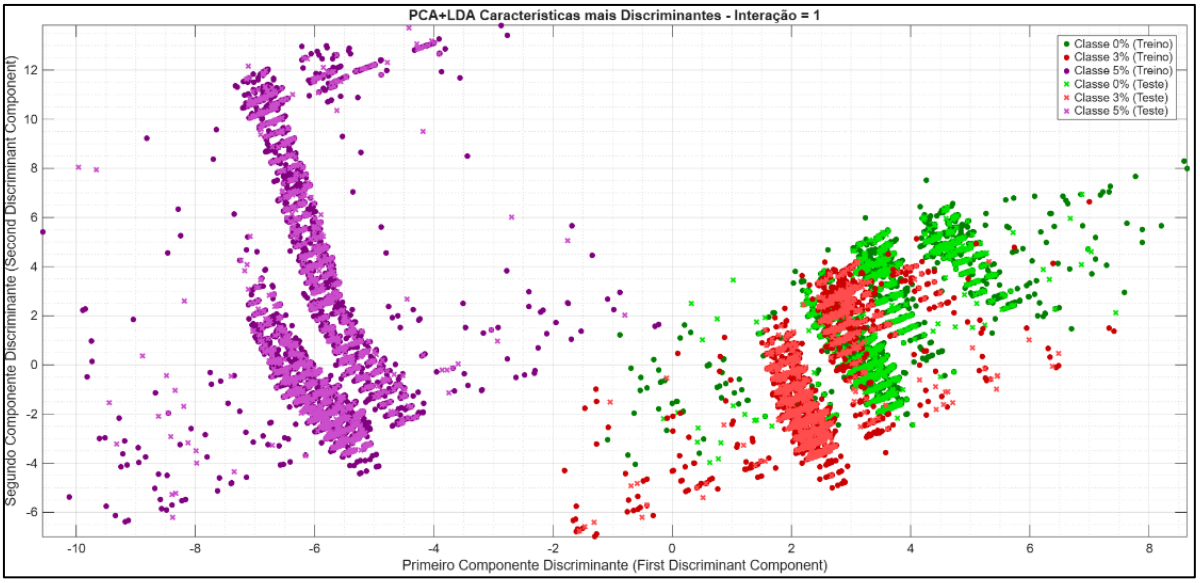

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 13
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

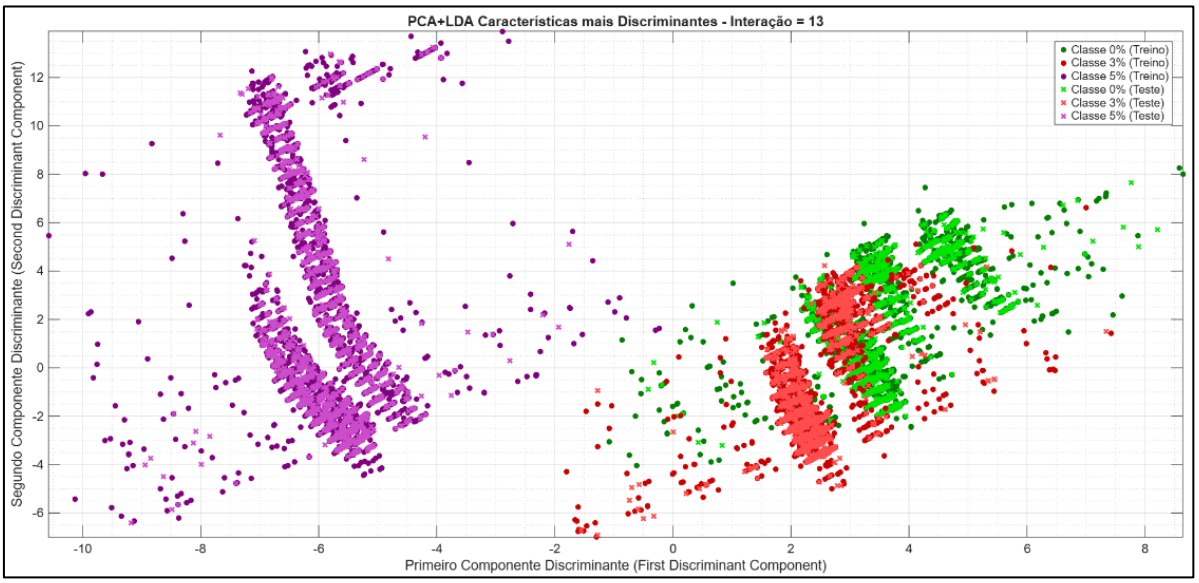

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 25
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

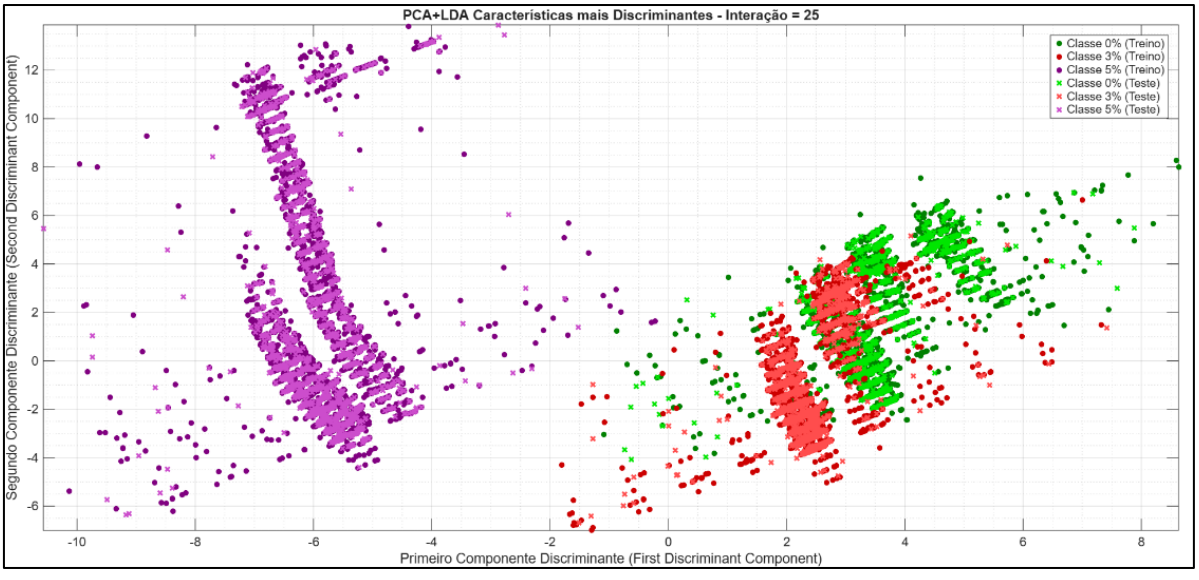

PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 37
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)
15
10
5
0
-5
-10
-5
0
5
10

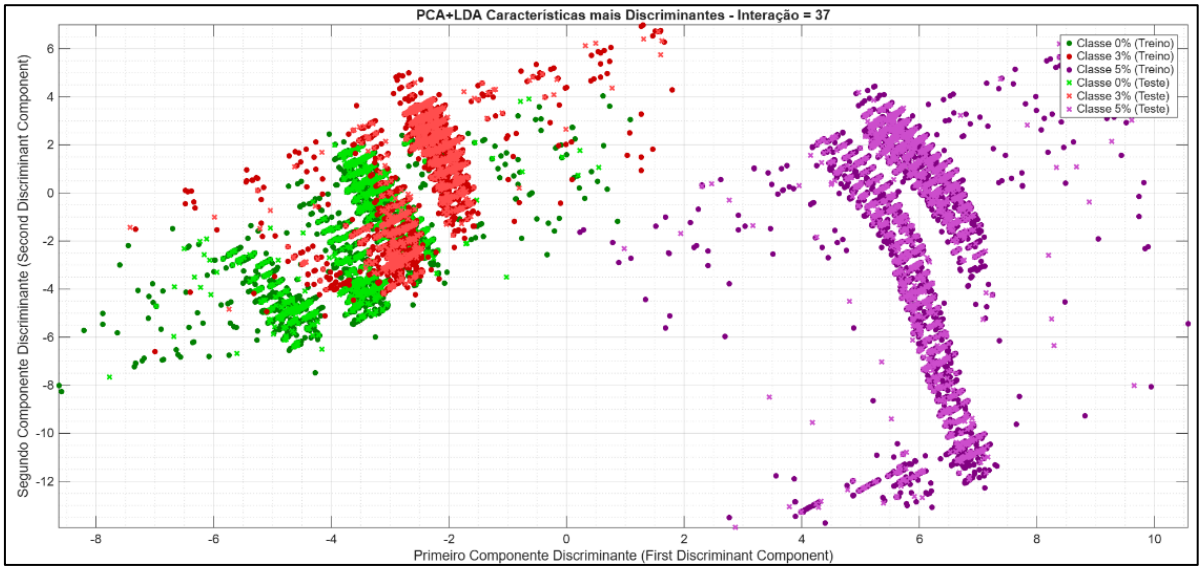

PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 50
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)
15
10
5
0
-5
-10
-5
0
5
10

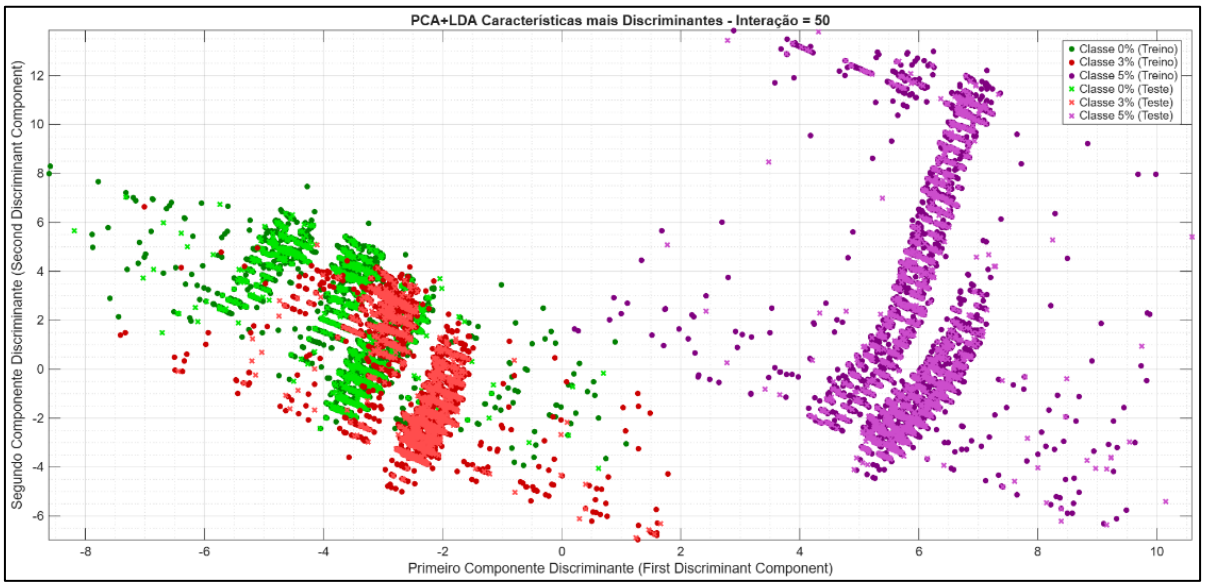
APÊNDICE C – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT4 DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO.


PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 1
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

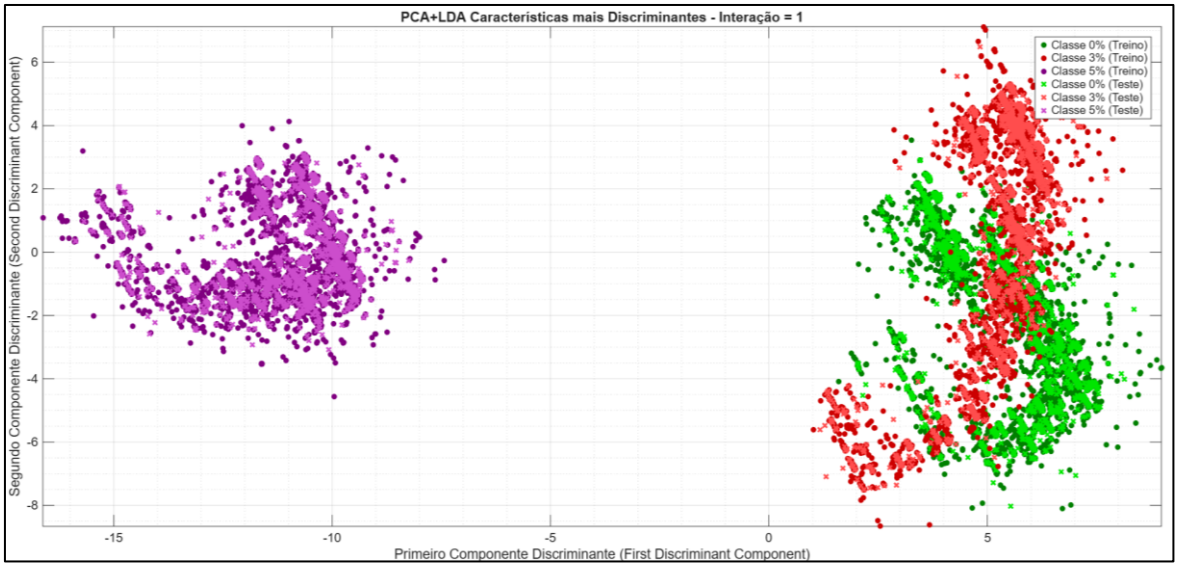

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 13
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

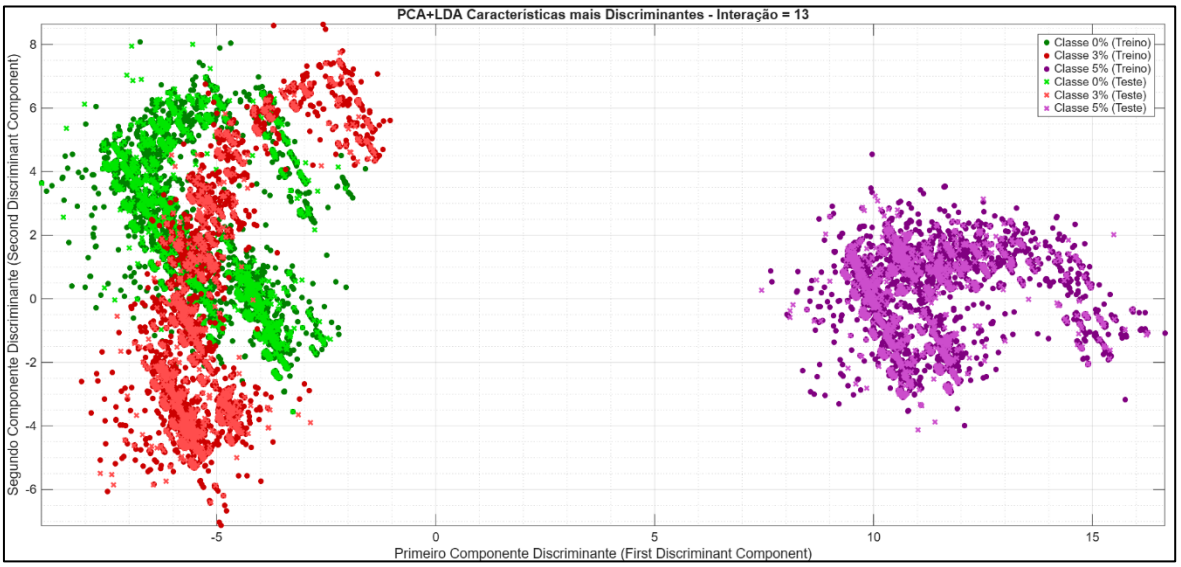

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 25
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

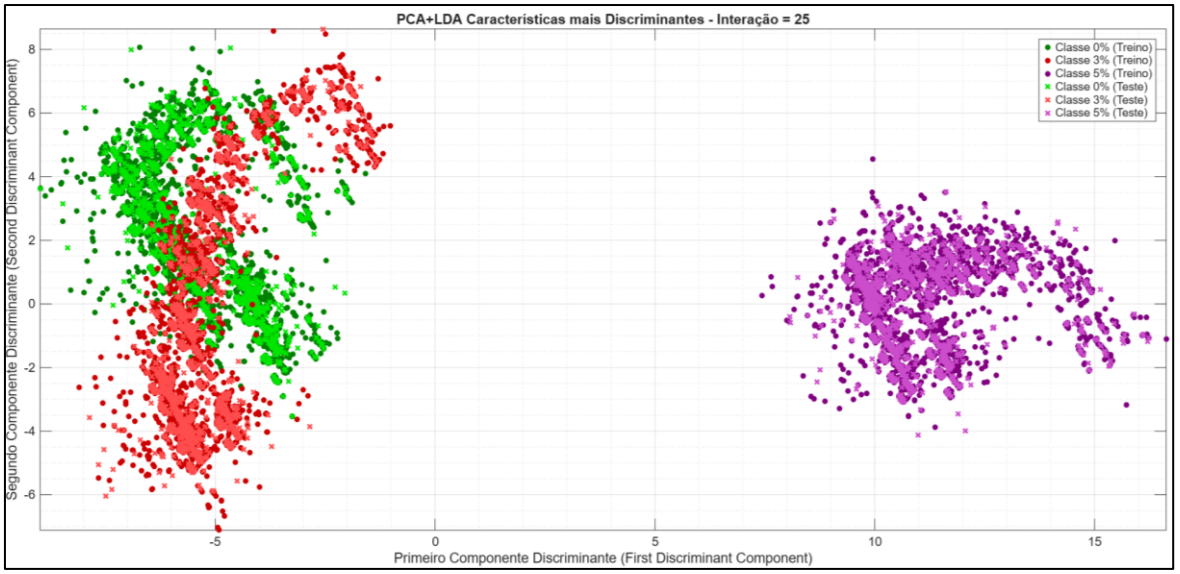

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 37
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

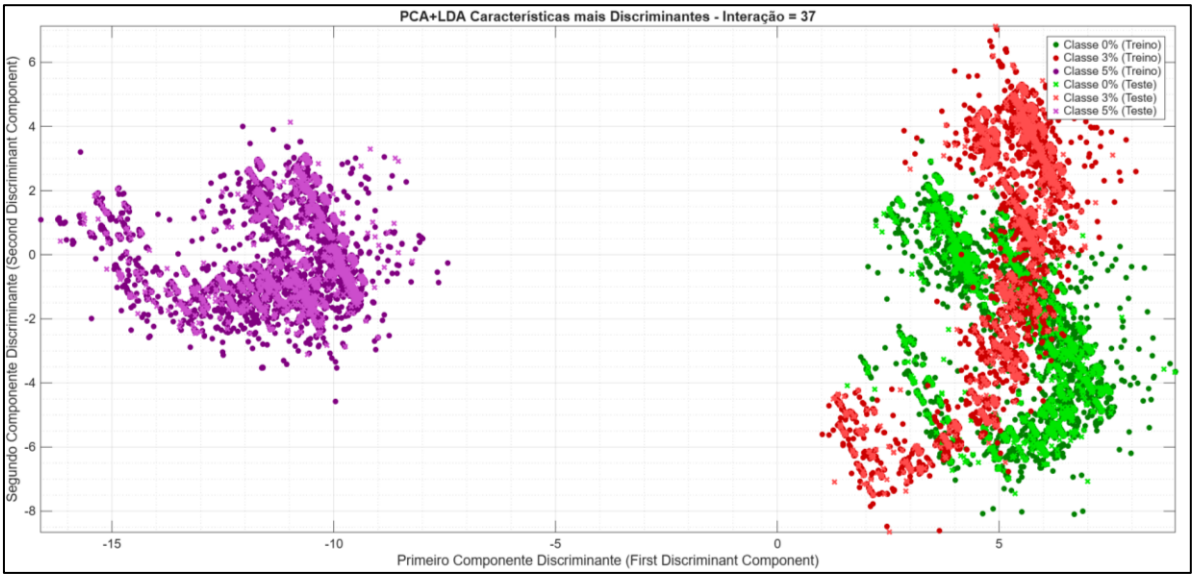

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 50
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

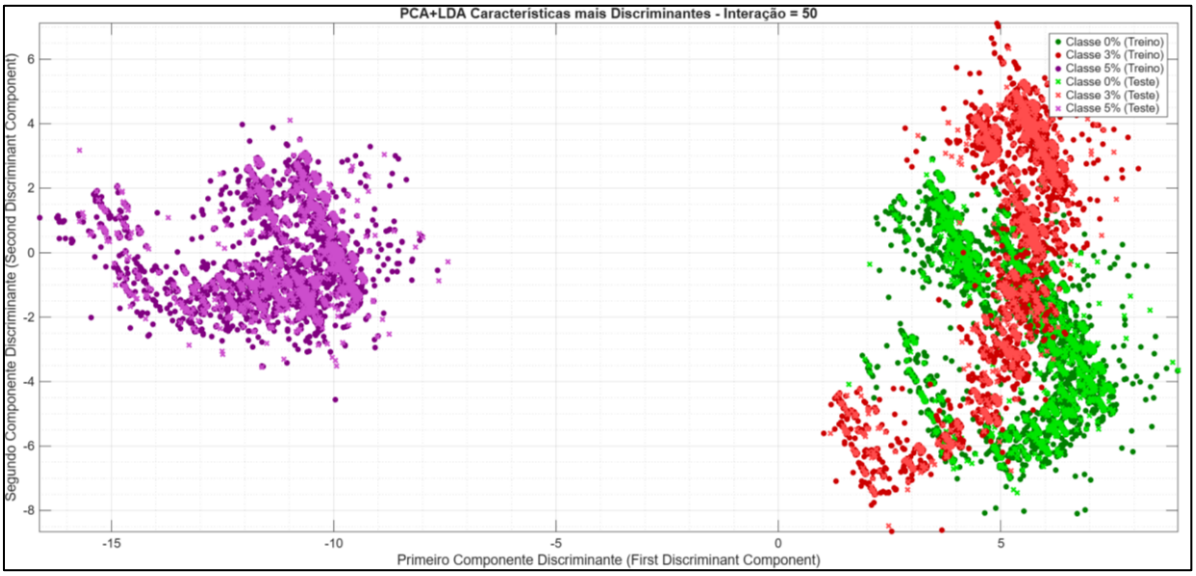
APÊNDICE D – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT4LV DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO.


PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 1
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

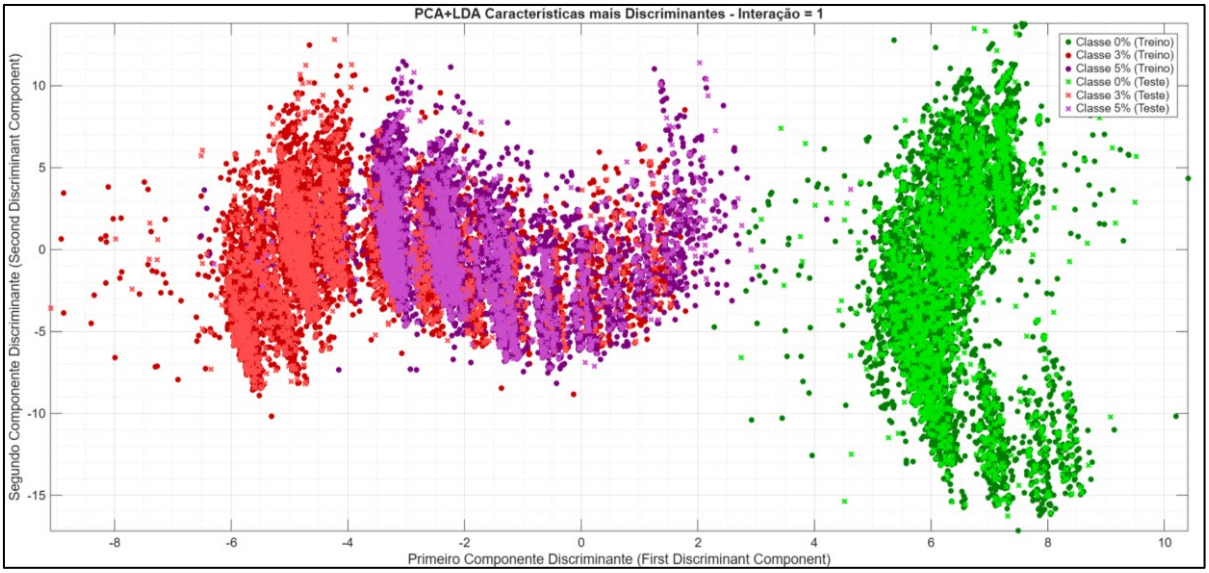

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 13
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

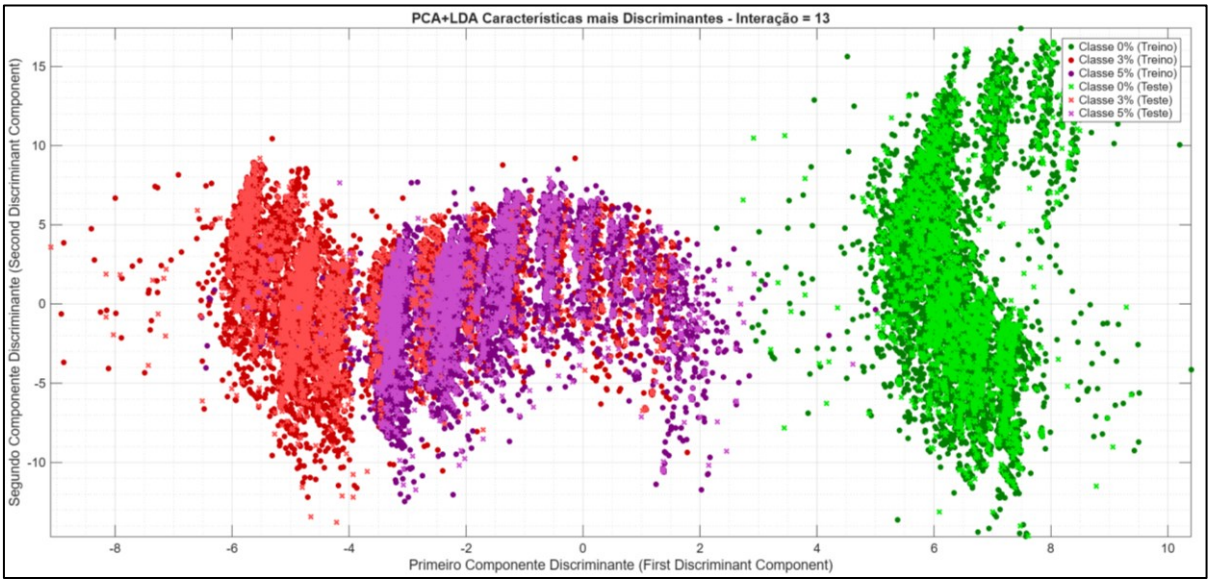

PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 25
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

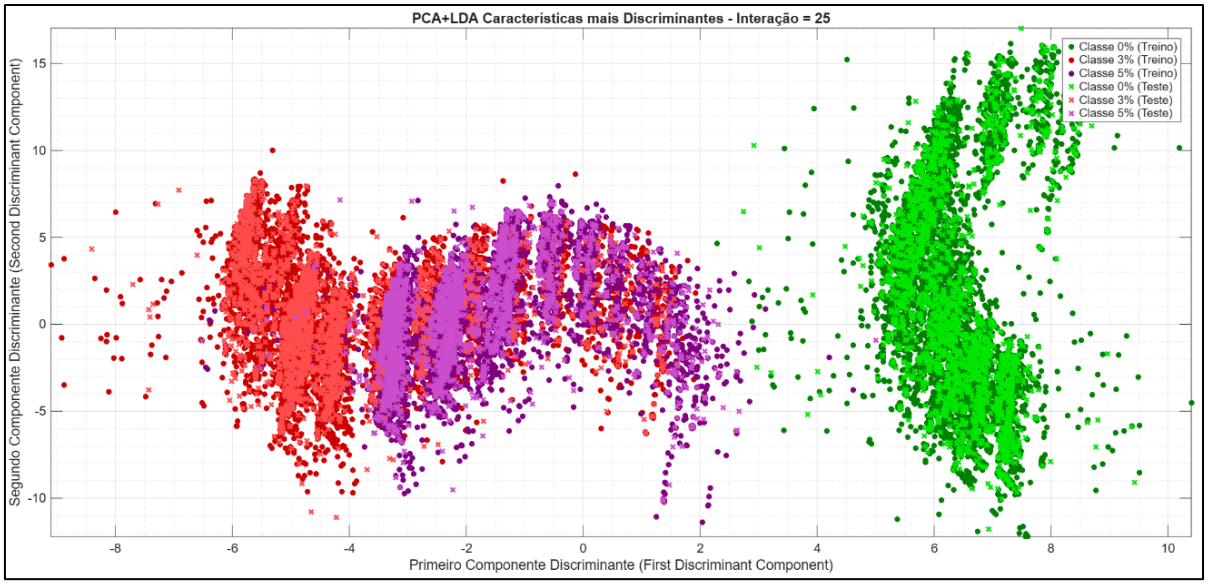

PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 37
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

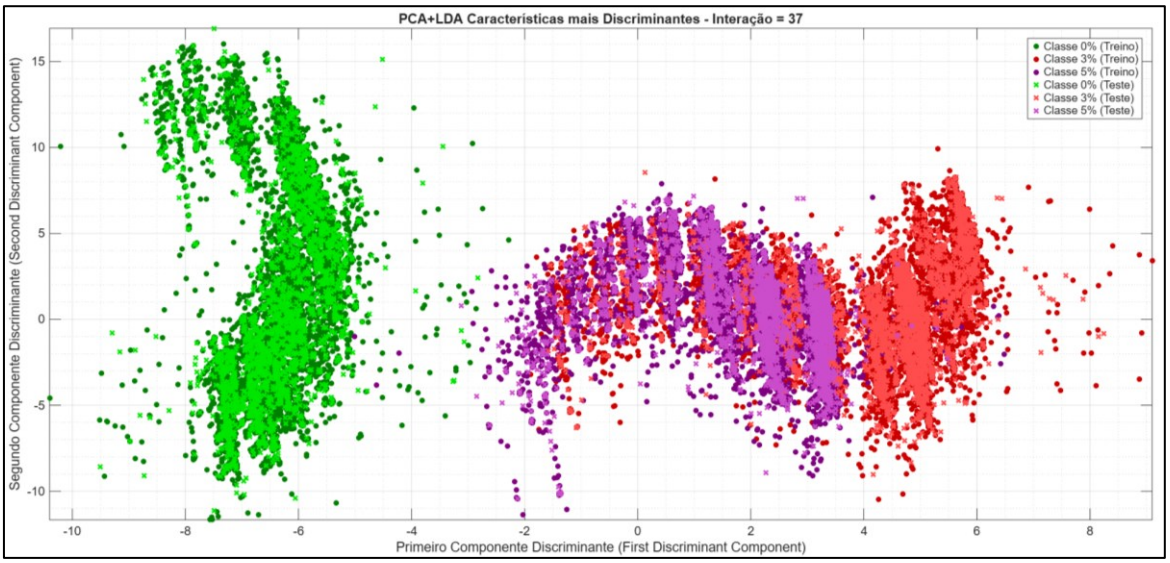

PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 50
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

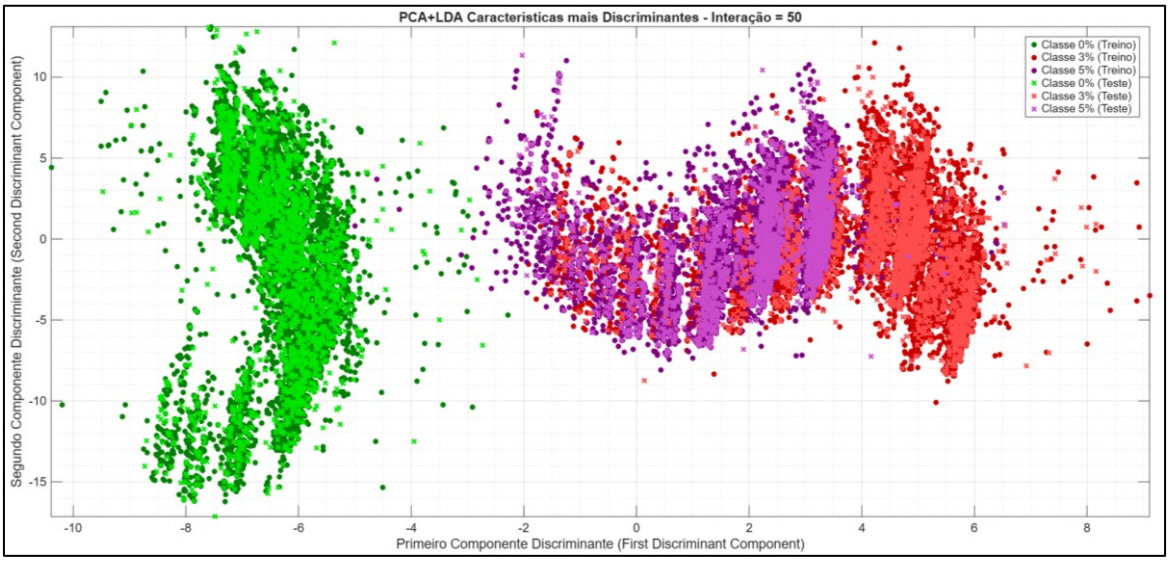
APÊNDICE E – IMAGENS DAS PROJEÇÕES NAS COMPONENTES DISCRIMINANTES PRINCIPAIS (LDA) APÓS APLICAÇÃO DO PCA (PCA + LDA) DAS MATRIZES DE TREINO E TESTES DO FLUÍDO DOT5.1 DA PRIMEIRA, DÉCIMA TERCEIRA, VIGÉSIMA QUINTA, TRIGÉSIMA SÉTIMA E QUINQUAGÉSIMA INTERAÇÃO.


PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 1
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)


PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 13
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)


PCA+LDA Caracteristicas mais Discriminantes - Interação = 25
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)


PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 37
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)


PCA+LDA Características mais Discriminantes - Interação = 50
Classe 0% (Treino)
Classe 3% (Treino)
Classe 5% (Treino)
Classe 0% (Teste)
Classe 3% (Teste)
Classe 5% (Teste)
Segundo Componente Discriminante (Second Discriminant Component)
Primeiro Componente Discriminante (First Discriminant Component)

ANEXO A – DOCUMENTOS DAS PATENTES DA BANCADA E DOS ALGORITMOS E PROTOCOLO

Os arquivos referentes à patente da bancada experimental, ao protocolo associado e à patente do algoritmo de análise de dados possuem grande volume e, caso fossem anexados integralmente, tornariam o arquivo da tese excessivamente pesado. Por esse motivo, não é possível incluí-los diretamente neste documento. Para assegurar o acesso às informações utilizadas na obtenção dos resultados aqui apresentados, disponibiliza-se o respectivo DOI, por meio do qual os arquivos podem ser consultados.

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.21765822